



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

---

**Modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado orientado a la evaluación ex-ante, bajo condiciones de incertidumbre, de proyectos alternativos de sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia: tranvía o metro ligero (LRT) frente a autobuses semirrápidos (BHLS o BRT)**

---

TESIS DOCTORAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

Autor

**Emilio José Conles Barrera**

Directores

Margarita Novales Ordax

Alfonso Orro Arcay



A Coruña, Junio de 2020

**Conles, E. (2020).** *Modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado orientado a la evaluación ex-ante, bajo condiciones de incertidumbre, de proyectos alternativos de sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia: tranvía o metro ligero (LRT) frente a autobuses semirrápidos (BHLS o BRT)*. PhD Thesis (Doctoral Program in Civil Engineering), University of A Coruña. June 2020. A Coruña, Spain.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



# Agradecimientos

En origen, la idea de desarrollar la presente tesis surge a raíz de mi participación en el proyecto de investigación '*Comparación tecnológica, económica y de captación de usuarios de los nuevos avances en sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia*', realizado en el seno del Grupo de Ferrocarriles y Transportes de la Universidade da Coruña. Este proyecto formó parte del 'VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011', habiendo contado con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad, así como con la aportación económica de la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Sirvan estas primeras líneas para expresar mi gratitud hacia las entidades financiadoras.

Dicho esto, quisiera reconocer y agradecer la ardua labor desempeñada por Marga Novales y Alfonso Orro, directores de esta tesis, para hacer posible que la misma haya llegado finalmente a la estación de destino. La dedicación prestada y el esmero puesto a lo largo de todo este trayecto —desde aquellas largas y densas reuniones de los comienzos hasta las más recientes y exhaustivas labores de revisión del texto, pasando por todas las sugerencias, ideas y soluciones aportadas entre uno y otro momento— han sido, sin duda, fundamentales para que todas las tareas de investigación llevadas a cabo cristalizaran en el documento que ahora tenemos ante nosotros.

Mención específica merecen también mis antiguos compañeros en el Grupo de Ferrocarriles y Transportes de la UDC, Javier Anta, Ana Martínez-Pardo y José Benito Pérez-López. Haber trabajado con ellos solo puede calificarse como un auténtico privilegio. Siempre será de agradecer su permanente predisposición a prestarme su colaboración, así como su gran valía humana y profesional.

En estos tiempos de cierta minusvaloración de la función docente, tampoco quisiera olvidar el papel básico de todos aquellos que, de una forma u otra, han ido dejando su grano de arena —en forma de transmisión del conocimiento— a lo largo de mi formación académica y científica, primero como estudiante y después como investigador '*in progress*'. Dado que siempre he creído en la transversalidad del conocimiento, esta tesis también puede ser vista, al menos en parte, como el resultado del sumatorio de las contribuciones de todos ellos y todas ellas... y si dicho resultado no ha alcanzado mayores cotas de excelencia, me temo que habrá sido más bien porque todas esas aportaciones recibidas han tenido que pasar necesariamente por el tamiz particular de todos mis defectos e impericias.

Ahora que es momento de hacer balance, tampoco podría dejar pasar la oportunidad de volver la vista atrás y recordar a todos aquellos compañeros que he tenido la fortuna de encontrarme durante este largo camino. La lista es extensa —y seguramente incompleta por las flaquezas de la memoria—, pero bien merecen al menos una alusión en estas líneas compañeros y compañeras como Víctor, Diego, Javi, Falki/Himar, Horacio, Santiago, Héctor Del Río, Bruno, Yanmei, Alba, Chema, Jose, David, Silvia, Gael, Pablo Ures, Héctor G. Rábade, Acacia, Breixo, María, Antonio, Ibuki, Paco, Javi Paz, Mirian, Pablo Vázquez, Gemma, Roberto, Santi, Miguel, Rocío, Ronnie, Esteban, Juan, Gonzalo, Alejandro, Nacho, Juan Fernando, ... Aunque resulte ciertamente difícil condensar en un único agradecimiento tantas épocas y tan diferentes entre sí, no puedo menos que daros las gracias a todos y a todas por los muchos momentos compartidos. Y no... esos momentos ni se perderán en el tiempo ni se diluirán en la lluvia. Persistirán en el recuerdo sólidos como el granito.

Ya por último en el orden arbitrario de estas líneas, pero en primer lugar en el orden inexorable de la vida, me resulta indispensable poner fin a estos agradecimientos con una mención especial a mis padres y hermana. Por haber estado siempre, por ser parte de todo... ¡gracias!

Y ahora que lo más importante de esta tesis está ya contado, con una simple vuelta de página, crucemos, como Alicia, al otro lado del espejo...

*¡Allá vamos!*



# Resumen

En la presente tesis se lleva a cabo el diseño, desarrollo, implementación y ejecución de un modelo de transporte específicamente concebido para la previsión de los efectos que, sobre un conjunto de variables representativas de los volúmenes y condiciones de viaje, serían producidos por la hipotética implantación —en un corredor, eje o itinerario de unas características dadas— de cada uno de los dos tipos fundamentales de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia. Estas dos clases principales de sistemas son los modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada, con denominaciones como BHLS (*Bus with High Level of Service*) o BRT (*Bus Rapid Transit*).

El modelo analítico propuesto sistematiza las interdependencias entre procesos como la prognosis de la demanda (en el modo de transporte público y en otras posibles opciones modales de viaje), la caracterización dinámica de los atributos de la oferta modal, la valoración por los viajeros de cada una de las opciones (a través del concepto de coste generalizado), y la estimación de las elecciones agregadas de los viajeros (reparto modal y efecto sobre el volumen total de viajes), poniendo especial detalle en la modelización de las operaciones de los diferentes sistemas de transporte público y en la previsión y valoración de sus variables-atributo, combinadas en su coste generalizado de viaje. Además, el modelo se diseña para la predicción de la futura evolución de las respectivas variables de transporte a lo largo de un determinado horizonte de evaluación, por lo que sus resultados son fundamentales como base de partida para una adecuada evaluación socioeconómica *ex-ante* (es decir, prospectiva) de la posible implantación y selección de uno de los dos tipos de modos de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia.

Complementariamente, se incorpora en el desarrollo del modelo el tratamiento metodológico de la incertidumbre (tanto asociada a las variables de entrada como inherente al proceso de modelización), recurriendo para ello a la implementación de múltiples simulaciones aleatorias con valores extraídos de acuerdo a las distribuciones de probabilidad de las variables pertinentes, en aplicación del método de Montecarlo.

Por último, se pone en práctica el funcionamiento del modelo mediante su aplicación a un ejemplo de cálculo basado en un conjunto de datos artificiales. Dichos datos han sido diseñados con la intención de que puedan resultar representativos de situaciones relativamente habituales en corredores, ejes o itinerarios con volúmenes intermedios de demanda de transporte público, aunque, no obstante, los resultados obtenidos para este ejemplo, así como las conclusiones extraídas del mismo, son de aplicación específica al caso particularmente planteado (o a otros relativamente similares), por lo que no deben ser directamente generalizados o extrapolados a cualesquiera otras condiciones. Para concluir, se analizan detalladamente los resultados de este ejemplo, y se obtiene finalmente un balance entre el incremento en el excedente o beneficio de los viajeros y el coste de inversión inicial a modo de orientación preliminar aproximada, en un caso como el propuesto, sobre la posible rentabilidad socioeconómica de los sistemas de capacidad intermedia y sobre la valoración comparativa de sus dos principales modalidades.



# Abstract

The major purpose of this PhD Thesis is the design, development, computational implementation and execution of a transport model specifically devised for the forecasting of the effects that would be generated by the hypothetical introduction – into a corridor, axis or route with given characteristics – of each one of the two main types of urban and metropolitan middle-capacity transit systems. Such effects are quantitatively reflected in the model by a set of variables indicative, among others, of trip volumes and travel conditions. For this analysis, the two main classes of middle-capacity transit systems are the light rail modes (LRT and/or modern tramway) and the bus semirapid transit systems with exclusive right-of-way, commonly termed as BHLS (Bus with High Level of Service) or BRT (Bus Rapid Transit).

The proposed analytical model systematizes the interdependencies between several processes such as the travel demand prognosis (for the public transit mode and also for other possible modal options), the dynamic characterization of the modal supply's attributes, the valuation of each one of the modal options by the travelers (by means of the generalized cost concept), and the estimation of the aggregated choices of such travelers (modal split and effects on the total trips volume). In these analyses, a detailed treatment is given to the modeling of the different public transit systems' operations, as well as to the prediction and valuation of their attribute-variables, combined into their generalized travel cost. Furthermore, the model is designed in order to forecast the future evolution of the relevant transport-related variables over the years of a certain appraisal period. Consequently, the model results serve as a fundamental input for a right *ex-ante* (i.e. prospective) socioeconomic assessment of the possible implementation and selection of one of these two types of urban and metropolitan middle-capacity transit systems.

In addition, the model development has incorporated the methodological treatment of the related uncertainty, linked to the data or input variables as well as to the modeling process. Such uncertainty is methodologically treated by means of the implementation of multiple random simulations with values drawn from the probability distributions of the appropriate variables, applying thus the Monte Carlo method.

Finally, the model functioning is tested and put into practice by applying it to a calculation example that is based on a set of artificial data. Such data have been specially designed to be illustrative of fairly usual conditions in corridors, axes or routes with intermediate volumes of public transit demand. However, the results obtained for this example, as well as the conclusions derived from it, are of specific application to the data set of this particular case (or to others as much as they be relatively similar), so such results and conclusions should not be immediately overgeneralized or extrapolated to any other conditions. To conclude, the results of this example are thoroughly analyzed, and a balance of the increase in the travelers' surplus or benefit against the start-up investment costs is finally obtained as a proxy-value to pre-estimate, in a case like this, the possible socioeconomic performance of the middle-capacity transit systems and the comparative appraisal of their two main types.



# Resumo

Na presente tese lévase a cabo o deseño, desenvolvemento, implementación e execución dun modelo de transporte especificamente concibido para a previsión dos efectos que, sobre un conxunto de variables representativas dos volumes e condicións de viaxe, serían producidos pola hipotética implantación –nun corredor, eixe ou itinerario dunhas características dadas– de cada un dos dous tipos fundamentais de sistemas de transporte público urbano e metropolitano de capacidade intermedia. Estas dúas clases principais de sistemas son os modos ferroviarios lixeiros (metro lixeiro ou tranvía moderno) e os sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada, con denominacións como BHLS (*Bus with High Level of Service*) ou BRT (*Bus Rapid Transit*).

O modelo analítico proposto sistematiza as interdependencias entre procesos como a prognose da demanda (no modo de transporte público e noutras posibles opcións modais de viaxe), a caracterización dinámica dos atributos da oferta modal, a valoración polos viaxeiros de cada unha desas opcións (a través do concepto de custo xeneralizado), e a estimación das eleccións agregadas dos viaxeiros (reparto modal e efecto sobre o volume total de viaxes), poñendo especial detalle na modelización das operacións dos diferentes sistemas de transporte público e na previsión e valoración das súas variables-atributo, combinadas no seu custo xeneralizado de viaxe. Ademais, o modelo deséñase para a predición da futura evolución das respectivas variables de transporte ao longo dun determinado horizonte de avaliación, polo que os seus resultados son fundamentais como base de partida para unha adecuada avaliación socioeconómica *ex-ante* (é dicir, prospectiva) da posible implantación e selección dun dos dous tipos de modos de transporte urbano e metropolitano de capacidade intermedia.

Complementariamente, incorpórase no desenvolvemento do modelo o tratamento metodolóxico da incertidume (tanto asociada ás variables de entrada como inherente ao proceso de modelización), recorrendo para isto á implementación de múltiples simulacións aleatorias con valores extraídos conforme ás distribucións de probabilidade das variables pertinentes, en aplicación do método de Montecarlo.

Por último, ponse en práctica o funcionamento do modelo mediante a súa aplicación a un exemplo de cálculo baseado nun conxunto de datos artificiais. Ditos datos foron deseñados coa intención de que poidan resultar representativos de situacións relativamente habituais en corredores, eixes ou itinerarios con volumes intermedios de demanda de transporte público, mais, non obstante, os resultados obtidos para este exemplo, así como as conclusións extraídas do mesmo, son de aplicación específica ao caso particularmente proposto (ou a outros relativamente similares), polo que non deben ser directamente xeneralizados ou extrapolados a calquera outras condicións. Para concluír, analízanse detalladamente os resultados deste exemplo, e obtense finalmente un balance entre o incremento no excedente ou beneficio dos viaxeiros e o custo de investimento inicial a modo de orientación preliminar aproximada, nun caso coma o proposto, sobre a posible rendibilidade socioeconómica dos sistemas de capacidade intermedia e sobre a valoración comparativa das súas dúas principais modalidades.





## Resumen extendido

Uno de los retos más desafiantes a los que deben hacer frente las ciudades y áreas metropolitanas de nuestro tiempo consiste en satisfacer las necesidades de movilidad de la población residente y de sus potenciales visitantes dentro de un triple marco de eficiencia económica, bienestar social y protección ambiental. Esta triple dimensión (económica, social y ambiental) concuerda, no en vano, con las tres facetas del concepto de sostenibilidad, cuya aplicación a las diversas esferas de la actividad humana se erige no solo como una creciente exigencia de la sociedad actual, sino también como una obligación ineludible de cara a la preservación de los recursos necesarios para atender las necesidades de las generaciones futuras.

Atendiendo a los objetivos de sostenibilidad dentro del ámbito de la movilidad urbana y metropolitana, las redes de transporte público colectivo están llamadas, a medio y largo plazo, a seguir desempeñando un papel cada vez más fundamental e imprescindible en el reto de dar respuesta a las necesidades de movilidad de nuestras ciudades y áreas metropolitanas, siendo su contribución necesaria y decisiva para poder avanzar hacia los objetivos de movilidad sostenible en su triple vertiente económica, social y ambiental. Particularmente, y en relación con la provisión de servicios de transporte público colectivo en ciudades y áreas metropolitanas, no es infrecuente encontrarse en ellas con corredores, ejes o itinerarios que, atendiendo a las relaciones origen-destino que se desarrollan en su área de influencia, aglutinan volúmenes intermedios de demanda de viajes en transporte público. En este sentido, se entienden como volúmenes intermedios de demanda de transporte público aquellos para los que, por una parte, los servicios convencionales de autobús en tráfico mixto (sin plataforma reservada ni carril-bus) comienzan a evidenciarse como incapaces de atender satisfactoriamente el volumen de pasajeros que potencialmente podría alcanzarse, degradándose así las prestaciones y nivel de servicio que permitirían al transporte público resultar suficientemente atractivo y competitivo frente al transporte motorizado privado. Por el lado contrario, dichos volúmenes intermedios de demanda de transporte público resultan manifiestamente insuficientes para justificar la implantación de sistemas de transporte urbano/metropolitano de gran capacidad, tales como el metro o el ferrocarril de cercanías, dados los muy altos costes de implantación de estos últimos. Estos corredores, ejes o itinerarios de demanda intermedia de transporte público tienden a presentarse más frecuentemente en ciudades de tamaño medio (por ejemplo entre 200,000 y 800,000 habitantes), correspondiendo al principal eje troncal o estructurante de dichas ciudades o a un reducido número de ellos. No obstante, también es posible encontrar este rango de volúmenes de demanda en relaciones de viaje relativamente importantes (aunque no troncales) de las grandes ciudades y áreas metropolitanas.

A la hora de proponer la implantación de un nuevo modo de transporte público urbano y/o metropolitano sobre estos corredores, ejes o itinerarios de demanda intermedia (generalmente partiendo de una situación previa en la que esos servicios son operados mediante autobús convencional), las administraciones o autoridades planificadoras tienen disponibles ante sí un conjunto de opciones o alternativas tecnológicas que, por su especial adecuación a dichos volúmenes de demanda, pueden agruparse genéricamente bajo el concepto de 'sistemas de transporte urbano/metropolitano de capacidad intermedia'. Como características generales más significativas de este rango de sistemas de transporte público cabe destacar que se trata de modos mayoritariamente en superficie, con circulación sobre plataforma reservada (categoría B) en al menos gran parte de su recorrido, y normalmente dotados de sistemas de priorización semafórica en las intersecciones con el tráfico general, para favorecer con ello la continuidad de circulación del transporte público. A su vez, dentro de estos modos de transporte público de capacidad intermedia se distinguen dos grandes clases de sistemas: sistemas basados en ferrocarril ligero urbano y sistemas basados en autobuses semirrápidos, de altas prestaciones o de alto nivel de servicio. Entre los sistemas ferroviarios ligeros se incluyen básicamente el metro ligero y el tranvía moderno, mientras que entre los modos de capacidad intermedia basados en vehículos de tipo

autobús se incluiría a los sistemas que, según el ámbito geográfico y las características específicas de cada uno, pueden recibir denominaciones tales como Autobús de Alto Nivel de Servicio (BHLS, *Bus with High Level of Service*) o Autobús de Tránsito Rápido (BRT, *Bus Rapid Transit*), si bien la denominación genérica más descriptiva y apropiada para este segundo grupo sería la de ‘sistemas de autobuses semirrápidos sobre plataforma reservada’.

A lo largo de las décadas precedentes (desde mediados de los años 80s) se ha ido manifestando —sobre todo en Europa y, en particular, en España— una predisposición o sesgo bastante generalizado a optar en estas situaciones por los modos ferroviarios ligeros de manera prácticamente sistemática (sin considerar apenas otras posibles alternativas a los mismos), lo que ha llevado a que algunas implantaciones de tranvía moderno o metro ligero no hayan alcanzado los niveles de beneficios socioeconómicos que justificarían la inversión realizada. En la actualidad no existe al respecto un consenso general o suficientemente amplio sobre cuál de los dos grandes tipos de sistemas de capacidad intermedia presenta habitualmente una mayor contribución neta al bienestar o prosperidad de la sociedad (en términos del balance total entre los resultados o beneficios producidos y los costes incurridos o recursos consumidos). En consecuencia, la adecuada selección de uno u otro tipo de sistema debe sustentarse, para cada caso particular, en técnicas de evaluación de alternativas, entre las cuales el análisis coste-beneficio destaca como una de las más comúnmente aceptadas por su solidez técnica, coherencia interna y neutralidad. En cualquier caso, la realización de una correcta evaluación *ex-ante* (es decir, con fines prospectivos) de ambos tipos de alternativas está decisivamente condicionada por la validez de la prognosis que pueda efectuarse sobre un amplio conjunto de variables de transporte (volúmenes de viajes, características o atributos de la oferta de transporte, costes generalizados de viaje en las distintas opciones modales, reparto modal, etc.), que resultan imprescindibles como ‘*inputs*’ o variables de entrada para dichas técnicas de evaluación. A su vez, para poder llevar a cabo este ejercicio de prognosis de manera racional, robusta y consistente es preciso recurrir a la modelización formal (típicamente analítica) de los diferentes escenarios alternativos que serían objeto de evaluación. Así pues, la disponibilidad de un modelo de transporte específicamente diseñado para el análisis detallado de los atributos o características de cada uno de los sistemas bajo estudio (modos ferroviarios ligeros y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada), así como de los futuros escenarios de movilidad derivados de su hipotética implantación en un determinado corredor, eje o itinerario, constituye una condición previa imprescindible para garantizar un adecuado nivel de fiabilidad en cualquier proceso posterior de evaluación y selección de uno de los dos grandes tipos de sistemas de capacidad intermedia.

Por consiguiente, la presente tesis aborda como objetivo principal el diseño, desarrollo, implementación y ejecución de un modelo de transporte específicamente concebido para el análisis y futuro pronóstico de los efectos que, sobre las pertinentes variables de transporte y movilidad, serían generados por la hipotética implantación —en un corredor, eje o itinerario de unas características dadas— de cada uno de los dos tipos de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, siendo estos los modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT). En este sentido, el conjunto de variables de transporte y movilidad que son objeto de modelización están conformadas de acuerdo a los requerimientos de su potencial aplicación posterior —ya fuera del alcance de la tesis— como ‘*inputs*’ o variables de entrada en una evaluación coste-beneficio *ex-ante* de cada una de las respectivas alternativas.

Dado el objeto de estudio de la tesis, antes de afrontar el diseño y desarrollo de dicho modelo se realiza un análisis previo de las características generales de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, así como de las características específicas tanto de los modos basados en ferrocarril ligero urbano como de los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada. Se revisa asimismo el estado del conocimiento en relación con los estudios comparativos existentes sobre estas dos grandes clases de sistemas, completándose dicha revisión con un análisis más en detalle de los costes de implantación, de los costes de operación y mantenimiento, y de los costes totales anualizados de ambos tipos de modos de transporte público.

Por otra parte, el modelo desarrollado en la tesis se basa en el planteamiento y análisis de tres futuros escenarios alternativos. Dado el carácter comparativo o incremental de la evaluación coste-beneficio (es decir, la cuantificación de costes y beneficios de los planes o proyectos se ha de plantear siempre en términos de diferencias entre cada uno de los escenarios ‘con proyecto/alternativa’ y el escenario ‘sin proyecto’), el modelo analiza no solamente los dos escenarios en los que se implantarían respectivamente cada uno de los tipos fundamentales de sistemas de capacidad intermedia (metro ligero o tranvía moderno, por un lado, y BHLS o BRT, por otro), sino también un escenario base o escenario de referencia en el que no se acometería la implantación de ninguno de estos dos nuevos modos (escenario ‘sin proyecto’). Como situación de partida (año base) se asume la existencia previa de una línea de transporte público con el mismo itinerario y similar cobertura zonal que las hipotéticas nuevas líneas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT, pero operada mediante un modo de menor capacidad e inferiores atributos de servicio (autobús convencional en tráfico mixto). El escenario base consiste por tanto en suponer que se mantenga la operación de dicha línea de autobús convencional a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación. Consecuentemente, la definición de los escenarios analizados en el modelo se basa en la premisa de que en cada caso se pretenderá evaluar la posible sustitución de una línea existente de autobús convencional en tráfico mixto (sometida en principio a unos volúmenes de demanda relativamente elevados para dicho modo) por una línea de trazado equivalente, o bien de metro ligero o tranvía o bien de BHLS o BRT.

Además, el horizonte o período de evaluación ha de prolongarse en estos casos por un elevado número de años (habitualmente no menos de 30 años de duración). A lo largo de dicho horizonte o período de evaluación, el modelo distingue explícitamente, para cada escenario, varias fases distintas en respuesta a las diferentes condiciones de contorno en las que se desarrolla la oferta y demanda de transporte durante las etapas de implantación y de posterior explotación de los sistemas de transporte público. Así, para cada uno de los dos escenarios en los que se introducirían los nuevos sistemas de capacidad intermedia, se definen y analizan sucesivamente las siguientes fases: una fase de implantación de los nuevos modos de transporte público (correspondiente a las etapas de proyecto, construcción, pruebas en blanco, etc., durante las que el servicio de transporte público tiene que ser prestado todavía por el modo preexistente, es decir, por autobús convencional), una fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (primeros años tras la puesta en marcha, caracterizados por una progresiva readaptación de la demanda a los nuevos atributos de nivel de servicio ofertados por el modo introducido), y una fase de madurez del servicio (etapa definitiva y de mayor duración en el ciclo de vida comercial, con unos patrones de comportamiento de la demanda más consolidados y estables). En el caso del escenario base (continuidad de la operación del servicio mediante autobús convencional), se considera que la totalidad del horizonte o período de evaluación se encuadra ya desde un principio en su fase de madurez.

Aunque el objetivo principal del modelo se centra en los modos de transporte público, dicho modelo debe ser planteado desde un cierto enfoque multimodal, ya que es necesario tener en cuenta que los cambios en la oferta y en la demanda producidos por la introducción y servicio de los nuevos modos de capacidad intermedia también afectan de forma cruzada a los volúmenes de viajes en otros modos de transporte y a sus respectivos atributos o condiciones de viaje (dándose esta relación también de forma recíproca entre las diversas opciones modales existentes). Además, la inclusión en el modelo de otras opciones modales es imprescindible para poder evaluar posteriormente los posibles cambios en el excedente de los usuarios de dichos modos de transporte, así como para cuantificar las posibles variaciones en el total de los costes externos generados (por ejemplo, a través de cambios en el volumen de viajes realizados en automóvil particular). Por tanto, además de los respectivos tipos de modos de transporte público (metro ligero o tranvía, BHLS o BRT, y autobús convencional), se incluyen dentro del modelo aquellas otras opciones modales que se consideran más relevantes en el ámbito de la movilidad urbana y metropolitana. Se consideran en este sentido los modos de transporte motorizado privado más habituales, así como las modalidades más representativas de desplazamiento no motorizado y de ‘micromovilidad’ (tratando a las opciones modales de este segundo grupo al menos como alternativas

incorporadas dentro de la formulación del reparto modal). En concreto, se introducen en la modelización el automóvil particular y la moto o ciclomotor como dos opciones típicas de transporte motorizado privado, mientras que como opciones fundamentales de desplazamiento no motorizado y de 'micromovilidad' se incluyen el modo peatonal (viaje a pie) y la opción agrupada de bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal.

El modelo desarrollado en la tesis permite definir las características particulares de varios corredores, ejes o itinerarios distintos en los que se plantearía la hipotética implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia, aunque, no obstante, no se incorporan en la modelización posibles interacciones o efectos de red entre corredores diferentes, es decir, los cálculos del modelo son independientes para cada uno de estos corredores, ejes o itinerarios, en caso de definirse efectivamente más de uno. Por otra parte, el modelo define y trata por separado —para, posteriormente, agregar los resultados cuando proceda— las distintas condiciones de demanda, oferta, costes de viaje, etc. que pueden presentarse en una serie de períodos horarios diferenciados, los cuales corresponderían a situaciones tales como horas punta, horas valle, o cualesquiera otros períodos horarios específicos que se considere oportuno distinguir. Esta diferenciación es particularmente conveniente, ya que analizar únicamente las condiciones previstas para la hora punta, y tratar de extender o extrapolar los resultados de este período a la totalidad del horario de servicio del transporte público, podría conducir posteriormente a una evaluación notablemente distorsionada de los beneficios totales del proyecto. Además, el modelo define y analiza de forma diferenciada —en cada corredor, eje o itinerario y para cada uno de los períodos horarios— las condiciones de demanda y oferta de transporte propias de cada uno de los dos sentidos de viaje. Esta distinción atañe, lógicamente, a aquellos casos en los que se analicen líneas de transporte público de doble sentido, siendo esta la situación más habitual (la excepción al respecto la constituirían las líneas circulares de sentido único). Por su parte, la duración total del horizonte o período de evaluación es fraccionada por el modelo en años como unidad de discretización, a efectos de estimar la evolución en el tiempo de los futuros valores de la serie de variables de transporte y movilidad que caracterizan cada escenario.

En relación con el conjunto de datos que son tenidos en cuenta por el modelo, cabe destacar la amplia gama de variables de entrada considerada, lo que contribuye a una mayor riqueza de posibilidades en el tratamiento de los factores que potencialmente pueden influir en los resultados de los proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia. Este conjunto de variables de entrada comprende principalmente aspectos tales como las características genéricas de la línea de transporte público, las características de los vehículos, los criterios a aplicar en la operación y explotación del servicio, las características de la demanda de transporte público y de la movilidad y reparto modal en los corredores o itinerarios afectados, las características de las condiciones de viaje en vehículo motorizado privado, los costes unitarios relativos al tiempo de viaje, los costes unitarios relativos al consumo de energía en vehículo motorizado privado, etc. Otra faceta que paralelamente se contempla en las variables de entrada es la relativa al tratamiento del nivel de incertidumbre previsiblemente asociado a cada clase de dato. Dependiendo de este previsible nivel de incertidumbre, en los datos incorporados al modelo se distingue, a efectos prácticos, entre aquellos para los que se propone la definición de un único valor o valor fijo (al entenderse que generalmente pueden ser conocidos con un nivel suficiente de precisión y certidumbre), y aquellos otros para los que se considera que estarán habitualmente sometidos en la práctica a un notable nivel de incertidumbre y que, por tanto, es más apropiado tratarlos desde un principio como una variable aleatoria. Para este segundo tipo de variables de entrada se definen como datos los parámetros que especifican su distribución de probabilidad. Se consideran al respecto en el modelo distribuciones triangulares, por lo que dichos parámetros corresponden a los valores de la moda, del mínimo y del máximo.

A nivel de cálculo, el núcleo central del modelo recoge y sistematiza, en cada uno de los posibles escenarios y a lo largo de cada fase o etapa del horizonte de evaluación, las interdependencias mutuas entre las siguientes clases de procesos:

- Prognosis de la demanda: caracterizada a través del cálculo de los volúmenes de viajes (viajes/hora) en cada una de las opciones modales, así como por la suma o volumen total para el conjunto de opciones o alternativas en el corredor, eje o itinerario analizado.
- Previsión dinámica de las características de la oferta: consiste en la determinación de valores para las variables de dimensionamiento y operación del servicio de transporte público, así como para las variables representativas de los atributos o características que las distintas opciones modales presenten para los potenciales viajeros. El modelo incorpora al respecto la notable influencia que sobre los valores de estas variables ejercen los volúmenes de viajes pronosticados para cada modo (atributos dinámicos de la oferta).
- Valoración de las opciones o alternativas: en función de los atributos presentados por las opciones modales (oferta), y de la apreciación relativa que los viajeros harían de cada uno de esos atributos, se efectúa una valoración completa de cada alternativa modal (por medio del concepto de coste generalizado), así como una valoración combinada del conjunto total de opciones modales disponibles (a través del coste compuesto de viaje).
- Estimación de las elecciones agregadas de los viajeros: la valoración realizada de cada opción modal (a través del coste generalizado de viaje en cada una de ellas) sirve de base para pronosticar los cambios en el reparto modal (con consideración de la probable existencia de viajeros cautivos de alguna opción modal en particular), mientras que el coste compuesto de viaje del conjunto de alternativas influye, a través del proceso de distribución de viajes, en el volumen total de desplazamientos previsiblemente efectuados sobre el corredor, eje o itinerario que es objeto de análisis.

Como base para el desarrollo de las partes del modelo dedicadas a la previsión de la demanda de viajes y de las elecciones agregadas de los viajeros se recurre al marco teórico de referencia de un modelo gravitacional sintético de distribución y de reparto modal. Sobre esta base se desarrollan y aplican sucesivamente en el modelo formulaciones incrementales, dando lugar a un tipo de modelización que se encuadra dentro de los denominados modelos de pivoteo o de *'pivot-point'*. La ventaja práctica de este tipo de modelización es la posibilidad que ofrece de estimar la demanda futura de viajes a partir del conocimiento de los niveles actuales de dicha demanda (por ejemplo, el volumen de viajes y el reparto modal entre las distintas opciones de transporte), junto con únicamente los cambios o variaciones en los atributos o variables de nivel de servicio de dichas alternativas previstos entre la situación actual y la hipotética situación futura (cuantitativamente traducidos a cambios de coste generalizado). Esta posibilidad permite prescindir del conocimiento de los valores específicos de todos aquellos atributos o variables de nivel de servicio para los que se pueda asumir que no van a cambiar entre una y otra situación.

Así pues, la variable fundamental en torno a la que se configura el modelo de demanda es el coste generalizado de viaje en las distintas opciones modales. El coste generalizado constituye una variable cuantitativa en la que se combinan aditivamente, de acuerdo a su importancia relativa, los principales atributos asociados a la desutilidad de efectuar un viaje en una determinada opción modal (es decir, el conjunto de desincentivos a los que se enfrenta un individuo para la realización de dicho viaje). En el coste generalizado se convierten los distintos valores de esta serie de atributos (tales como los tiempos empleados en cada etapa, el dinero gastado, otras posibles incomodidades, etc.) a una magnitud común, que suele expresarse en unidades monetarias equivalentes, agregando sus respectivos valores en una única cuantía.

Por tanto, dado que además el modelo de pronóstico de demanda utiliza una formulación de tipo incremental, es necesario calcular las variaciones de coste generalizado de las opciones modales a lo largo del tiempo (es decir, entre distintos años), así como, posteriormente, obtener las diferencias de dichos costes entre los escenarios alternativos.

En este sentido, se calculan en el modelo para los diferentes modos de transporte público las variaciones en las siguientes componentes de coste generalizado: la tarifa abonada o desembolsada por viaje; el coste atribuido al tiempo medio transcurrido a bordo del vehículo de transporte público; el posible incremento del coste del tiempo de viaje a bordo generado por los efectos de incomodidad derivados del nivel de congestión o aglomeración de pasajeros; el coste del tiempo medio de espera en parada o estación; y el coste adicional asignado a las posibles deficiencias en la fiabilidad de horarios del transporte público (potenciales retrasos, incertidumbre generada sobre el tiempo de llegada, etc.). Para los nuevos modos de capacidad intermedia de posible implantación se incorpora además en el modelo la potencial reducción en el coste generalizado de viaje atribuida a la valoración del *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT (con respecto, en ambos casos, al autobús convencional).

Por su parte, para las opciones modales de transporte motorizado privado el modelo procede a calcular los cambios o variaciones previstas en los siguientes elementos de su coste generalizado de viaje: el coste medio generado al viajero a causa del tiempo de viaje transcurrido en el vehículo motorizado privado, incluyendo los posibles incrementos del coste por unidad de tiempo por la realización del desplazamiento en condiciones de elevada congestión viaria, con las consiguientes molestias adicionales para conductor y acompañantes; el coste ocasionado al viajero a consecuencia de la irregularidad, variabilidad o incertidumbre (falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado; el coste privado producido para el viajero por el consumo energético del vehículo motorizado particular (en forma de combustibles y/o energía eléctrica según la clase de vehículo); y otros posibles costes modales relacionados con la utilización del transporte motorizado privado (p. ej. costes de aparcamiento, posibles peajes urbanos o metropolitanos, otras restricciones adicionales sobre el uso del automóvil, etc.) que, desde el punto de vista del modelo, se consideran aplicados de forma exógena (como variables de entrada a especificar por el analista).

Por lo que respecta a los modos no motorizados y de 'micromovilidad' (viaje a pie, y bicicleta u otros vehículos de movilidad personal), el tratamiento de las variaciones en el coste generalizado de estas alternativas está limitado en el modelo a la aplicación de acciones exógenas (ajenas a los cálculos internos del propio modelo), por lo que se toman también como variables de entrada con valores previstos por el analista. En cualquier caso, a este tipo de variaciones exógenas se les asigna en el modelo valores comunes para los tres escenarios, de forma que no se desvirtúe la equidad entre las condiciones de contorno en las que se desarrolla la comparación entre sistemas de transporte público.

De acuerdo a las premisas anteriormente descritas, y siguiendo el orden necesario para el cálculo sucesivo de las variables, el núcleo central del modelo parte de la obtención de los volúmenes de viajes por hora en cada modo de transporte, para a continuación proceder al dimensionamiento del servicio de transporte público (fundamentalmente la determinación del intervalo de operación más apropiado). Tras ello se intercalan algunos cálculos básicos relativos a la intensidad de circulación en tráfico mixto, ya que, en el caso del autobús convencional, esta intensidad también afecta notablemente a las condiciones de operación de dicha modalidad de transporte público. Se continúa después con la obtención de una serie de variables intermedias que conducen finalmente a la estimación de la velocidad media de operación de cada uno de los modos de transporte público. Se determinan a continuación los valores de otros atributos de los modos de transporte público en relación con aspectos como el tiempo medio transcurrido a bordo del vehículo en cada viaje, el nivel de aglomeración de pasajeros, el tiempo medio de espera en parada, o la fiabilidad de horarios. Todo ello permite estimar el coste generalizado por viaje medio para cada uno de los modos de transporte público. A continuación el modelo pasa a analizar los cambios producidos en los atributos de las opciones de vehículo motorizado privado (automóvil y moto/ciclomotor), con sus correspondientes variaciones en los costes generalizados de viaje. Se incorporan al respecto los costes generados por el propio tiempo de viaje en el vehículo, por la irregularidad o variabilidad que afecta a dicho tiempo, y por el gasto asociado al consumo energético (combustibles y/o energía eléctrica). Con ello se dispone finalmente de las variables necesarias para el cálculo de la variación (entre cada año sucesivamente analizado y otro anterior) del coste generalizado de viaje medio en cada una de las opciones modales de transporte, para lo cual se

retoman los resultados anteriormente obtenidos para los modos de transporte público y se añaden las opciones no motorizadas y de 'micromovilidad'. Estas variaciones en el coste generalizado de cada una de las opciones de transporte conducen a nuevos repartos modales, tanto a nivel de viajeros no cautivos como a nivel general (es decir, incluyendo las proporciones de usuarios cautivos de alguna de las opciones modales). Una vez conocidos los cambios de coste generalizado de las opciones y determinado el reparto modal, se procede en el modelo al cálculo de las correspondientes variaciones del coste compuesto de viaje (promediado o ponderado según las proporciones de viajeros cautivos y no cautivos). Estas variaciones de coste compuesto son utilizadas a su vez para la estimación del nuevo volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales. Esta variable, junto con las nuevas cuotas de reparto modal general, conduce nuevamente a los volúmenes de viajes por hora efectuados en cada modo de transporte.

La obtención de soluciones válidas (soluciones de equilibrio) para la serie de ecuaciones acopladas que se derivan del párrafo anterior requiere la aplicación de procedimientos iterativos para cualquiera de los años del horizonte o período de evaluación posteriores al año base (es decir, para las previsiones del modelo sobre valores futuros), puesto que variables básicas para la resolución de dicho sistema de ecuaciones (como los futuros volúmenes de viajes en cada opción modal o, alternativamente, las variaciones de coste generalizado de viaje para cada una de estas opciones) forman parte *a priori* de las incógnitas del problema. Estos procedimientos de resolución se materializan en el modelo a través de un conjunto de módulos iterativos de cálculo, cada uno de los cuales es de aplicación particular a un determinado escenario y a una fase específica del horizonte o período de evaluación.

Por otra parte, desde el inicio del desarrollo del modelo se incorpora el tratamiento metodológico de la incertidumbre asociada a todo el proceso de prognosis. Esta incertidumbre proviene de una combinación entre los efectos, por un lado, de las limitaciones en la información disponible (incertidumbre sobre la fiabilidad o exactitud de los valores que han de ser utilizados por el modelo como datos de entrada y, en especial, sobre la posible evolución futura de algunos de dichos datos), y, por otro lado, de las inevitables limitaciones metodológicas de modelización (aquellas que están relacionadas con las simplificaciones, hipótesis asumidas, u otras posibles fuentes de inexactitud, que limitan las capacidades analíticas del propio modelo para reflejar con total fidelidad la realidad presente o futura). Para abordar metodológicamente esta cuestión se recurre al tratamiento como variables aleatorias de todas aquellas variables previsiblemente sujetas a un sensible nivel de incertidumbre, cada una de ellas caracterizada por su distribución de probabilidad (se asumen al respecto, en el caso de este modelo, distribuciones triangulares). Además, es preciso tener presente a lo largo de la modelización la previsible existencia de correlaciones estadísticas entre algunas de las variables del modelo dotadas de aleatoriedad (por ejemplo, distintas variables de entrada que estén vinculadas a la renta o nivel socioeconómico de los viajeros, la evolución del precio de distintos tipos de combustibles como gasolina y diésel, etc.), por lo que se introduce en este proceso de aleatorización un razonable nivel de correlación entre este tipo de variables. Se aplican a continuación en la modelización las técnicas de simulación estadístico-numérica conocidas como método de Montecarlo, consistentes en este caso en la implementación computacional de múltiples simulaciones o realizaciones del modelo ejecutadas a partir de distintas combinaciones de valores aleatorios, extraídos estos de acuerdo a las distribuciones de probabilidad de las respectivas variables. De este modo, para cada una de las variables de interés obtenidas como resultado del modelo se genera finalmente una muestra estadística de múltiples valores de la variable (con un tamaño igual al número de simulaciones aleatorias que se hayan efectuado). Esta muestra de probables resultados de cada variable de interés puede a su vez ser tratada estadísticamente y caracterizada mediante parámetros como su media, desviación estándar, diversos percentiles, etc., así como por medio de histogramas de frecuencias relativas.

Para finalizar, se aplica el modelo desarrollado a un ejemplo numérico de cálculo basado en un conjunto de datos que, aunque de origen artificial, han sido diseñados de forma que puedan resultar representativos —en un contexto de ciudades europeas de tamaño medio— de situaciones relativamente habituales en corredores, ejes o itinerarios con volúmenes intermedios de demanda de transporte público, en los

cuales, por tanto, sería razonable plantearse la posible conveniencia de implantar un sistema de capacidad intermedia. Dicho ejemplo de aplicación numérica se caracteriza, a grandes rasgos, por analizar una línea de transporte público de 10 km de longitud, con un número total anual de pasajeros cifrado, para el año base (con autobús convencional), en 10,000,000 pax/año, y con unas cuotas de reparto modal inicial (también en el año base) que, dependiendo del período horario, se sitúan alrededor de entre el 15% y el 25%.

Aunque las conclusiones que se derivan de este ejemplo de aplicación deben ser tomadas únicamente con carácter orientativo (en función de la mayor o menor similitud de cada caso real con el caso planteado y teniendo presente que las cifras obtenidas se refieren meramente a unos datos particulares), es interesante destacar, por su relevancia, algunos resultados finales. Así, desde el punto de vista de los beneficios o aumentos de bienestar o satisfacción percibidos de forma directa por el conjunto total de usuarios y viajeros afectados en sus desplazamientos por la intervención en el corredor o eje (excedente de los viajeros), el escenario de implantación de un sistema de metro ligero o tranvía moderno (abreviadamente escenario 'R') presentaría unos resultados moderadamente mejores que los del escenario de implantación de una línea de BHLS o BRT (escenario 'B'). En concreto, con una tasa social de descuento del 3.5%, el valor actualizado del incremento de excedente de los viajeros generado en el escenario 'R' se sitúa, de media, en los 517.3 M€ (en comparación con el escenario base de referencia), con una probabilidad del 97.5% de que se llegue al menos a los 295.9 M€ y un 2.5% de posibilidades de superar los 778.9 M€. Por su parte, el escenario 'B' generaría, como promedio, un incremento en el excedente de los viajeros con un valor actual de 457.0 M€, con un 97.5% de probabilidades de alcanzar al menos los 257.2 M€ y un 2.5% de posibilidades de que se superen los 692.4 M€.

Además, para posibilitar la extracción de unas conclusiones preliminares sobre la posible rentabilidad socioeconómica de estos proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia, se ha tomado como aproximación orientativa el balance entre el incremento de excedente generado para los viajeros y la inversión inicial estimada para la implantación y puesta en servicio de cada uno de los modos de capacidad intermedia (210 M€ para la línea de metro ligero o tranvía y 130 M€ para BHLS o BRT). En este sentido, se ha observado en el caso planteado como ejemplo que, excepto con tasas sociales de descuento muy elevadas, el incremento de excedente de los viajeros generado por los proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia superaría a sus costes de inversión inicial. Además, esta diferencia continuaría resultando positiva incluso si se tomasen para el incremento de excedente de los viajeros los valores del percentil 2.5, los cuales presentan una muy alta probabilidad (97.5%) de ser sobrepasados. Este hecho permite anticipar que la implantación de sistemas de capacidad intermedia en un caso similar al analizado conduciría muy probablemente a una rentabilidad socioeconómica positiva, siendo el principal riesgo para dicha rentabilidad los posibles sobrecostes en la implementación práctica de los proyectos.

Analizando los resultados del ejemplo para cada uno de los dos tipos de sistemas de capacidad intermedia se obtiene asimismo que, para una tasa social de descuento del 3.5%, la diferencia entre el beneficio producido en forma de incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial se cifra, en valores medios, en 307.3 M€ en el caso del escenario 'R' (metro ligero o tranvía) y en 327.0 M€ en el escenario 'B' (BHLS o BRT). Se observa por tanto un resultado neto ligeramente favorable al escenario 'B', aunque por un margen ciertamente estrecho (unos 20 M€ de ventaja a favor del escenario 'B', lo que representa aproximadamente un 6% en relación con el montante calculado para el escenario 'R'). En conclusión, la magnitud de la ventaja obtenida para el escenario 'B' en términos de la diferencia entre el incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial parece —a falta de una evaluación completa con aspectos como las externalidades y los costes de operación y mantenimiento de cada sistema— insuficientemente amplia como para poder determinar concluyentemente una mayor rentabilidad socioeconómica de dicho escenario. La comparación entre sistemas en el ejemplo de aplicación planteado se encuentra más bien en una situación próxima al 'empate técnico', aunque teniendo presente que los resultados parciales obtenidos muestran una reducida ventaja en favor del sistema de BHLS o BRT.



En síntesis, esta tesis pretende aportar una herramienta que sirva de base para la adecuada estimación de las variables de transporte necesarias para una correcta evaluación coste-beneficio (*ex-ante*) de la hipotética implantación de un modo de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, comparando al respecto las dos principales clases de alternativas existentes: modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT). Se aspira con ello a contribuir a una mejora en los procesos de evaluación y selección de este tipo de sistemas, de forma que la toma de decisiones en este ámbito pueda ser realizada a partir de pronosis más precisas —o al menos mejor fundamentadas dentro de los marcos teóricos generalmente aceptados— sobre los futuros resultados de cada uno de estos sistemas de transporte público, especialmente en relación a variables como los volúmenes de demanda de viajes, las cuotas de reparto modal entre opciones de movilidad, los costes generalizados de viaje en cada opción modal, etc., todo ello con valores particularizados para las características de cada corredor, eje o itinerario analizado. En último término se contribuiría así, mediante una toma de decisiones mejor informada, a la selección de la alternativa que en cada caso aporte globalmente un mayor bienestar o prosperidad al conjunto de la sociedad, con una asignación más eficiente y sostenible de los recursos invertidos en materia de transporte público urbano y metropolitano.



# Índice de Contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Resumo</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen extendido</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Contenidos</b>	<b>XXI</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XXXIX</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>XLIII</b>

## **CAPÍTULO 1**

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contextualización .....	1
1.1.1. Panorama y retos de la movilidad urbana y metropolitana en el marco del desarrollo sostenible .....	1
1.1.2. El aumento de la población urbana y la expansión metropolitana .....	5
1.1.3. La movilidad urbana en un escenario dinámico y cambiante .....	6
1.1.4. La indispensabilidad del transporte público colectivo en ciudades y áreas metropolitanas .....	7
1.2. Motivación.....	9
1.2.1. Los modos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia: metro ligero o tranvía moderno y sistemas de autobuses semirrápidos o de alto nivel de servicio .....	9
1.2.2. La necesidad de una evaluación rigurosa de los planes e infraestructuras de transporte.....	14
1.3. Exposición de objetivos.....	22
1.4. Estructura del documento.....	27

## **CAPÍTULO 2**

<b>2. Sistemas de capacidad intermedia y estudios comparativos (Estado del conocimiento)</b>	<b>31</b>
2.1. Introducción .....	31
2.2. Sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia .....	31
2.2.1. Definición general .....	31
2.2.2. Características comunes esenciales .....	33
2.2.2.1. Modos en superficie .....	34
2.2.2.2. Circulación en plataforma reservada .....	34
2.2.2.3. Dotación de sistemas de priorización semafórica para el transporte público .....	36
2.2.3. Sistemas basados en ferrocarril ligero urbano .....	37

2.2.4.	Sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio .....	41
2.2.5.	Los modos de capacidad intermedia dentro del espectro de sistemas de transporte público urbano y metropolitano .....	47
2.3.	Estado del conocimiento sobre la comparación entre sistemas de transporte ferroviario urbano o metropolitano y sistemas basados en autobuses .....	48
2.3.1.	Estudios comparativos .....	48
2.3.1.1.	Análisis de carácter generalista o cualitativo .....	48
2.3.1.2.	Estudios relacionados con la demanda potencial y el atractivo para el viajero.....	54
2.3.1.3.	Estudios centrados en el análisis de costes o en la evaluación de inversiones .....	59
2.3.1.4.	Otros tipos de estudios comparativos.....	68
2.3.2.	Revisión detallada de costes de implantación y de operación y mantenimiento .....	70
2.3.2.1.	Costes iniciales de implantación.....	71
2.3.2.1.a.	Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV).....	71
2.3.2.1.b.	Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013).....	73
2.3.2.2.	Costes de operación y mantenimiento .....	76
2.3.2.2.a.	Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV).....	76
2.3.2.2.b.	Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013).....	77
2.3.2.3.	Coste total anual del sistema de transporte .....	78
2.3.2.3.a.	Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV).....	78
2.3.2.3.b.	Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013).....	80
2.3.2.4.	Conclusiones.....	81

## CAPÍTULO 3

<b>3.</b>	<b>Descripción general del modelo</b>	<b>83</b>
3.1.	Introducción.....	83
3.2.	Escenarios a modelizar .....	84
3.3.	Segmentación temporal del horizonte o período de evaluación.....	85
3.4.	Conjunto de opciones modales en cada escenario y fase.....	86
3.5.	Caracterización particular de líneas, períodos horarios, sentidos de viaje y años .....	88
3.5.1.	Caracterización particular de diferentes corredores, ejes o itinerarios.....	88
3.5.2.	Diferenciación de períodos horarios .....	89
3.5.3.	Diferenciación de sentidos de viaje.....	89
3.5.4.	Discretización en el tiempo del horizonte o período de evaluación .....	89
3.6.	Tratamiento metodológico de la incertidumbre .....	90
3.7.	Principios metodológicos y simplificaciones básicas .....	92
3.7.1.	Bases del modelo de demanda de viajes y de reparto modal .....	92
3.7.2.	Condiciones previas en el diseño y operación de los distintos modos de transporte público.....	93
3.7.3.	Composición del coste generalizado de cada opción modal.....	94
3.7.4.	Disponibilidad de información de viajes en transporte público solo a nivel de línea y tratamiento homogeneizado del corredor, eje o itinerario .....	96
3.8.	Funcionamiento general del modelo .....	97
3.8.1.	Esquema básico de funcionamiento del modelo .....	97

3.8.2. División del núcleo central del modelo en módulos de cálculo .....	99
3.8.3. Diferenciación entre bucles iterativos (tipos A y B) .....	101

## CAPÍTULO 4

<b>4. Bases adoptadas para la modelización de la demanda de transporte</b> .....	<b>103</b>
4.1. Introducción .....	103
4.2. Bases del modelo de demanda de viajes y de reparto modal.....	104
4.2.1. Formulación general .....	104
4.2.2. Hacia un modelo particular simplificado .....	107
4.3. Formulación incremental del modelo de demanda.....	110
4.3.1. Formulación incremental del reparto modal (con inclusión de viajeros cautivos) .....	111
4.3.2. Formulación incremental de los volúmenes de viajes totales y por modos (con consideración de viajeros cautivos).....	112
4.4. Obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ a partir de datos conocidos en dos estados o situaciones distintas.....	117
4.4.1. Obtención de valores del parámetro $\lambda$ .....	117
4.4.2. Obtención de valores del parámetro $\theta$ .....	118
4.4.3. Particularización: Obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ según los datos característicos del modelo .....	119
4.4.3.1. Parámetro $\lambda$ .....	120
4.4.3.2. Parámetro $\theta$ .....	121
4.5. Coste generalizado y paralelismos con la utilidad representativa o sistemática.....	123

## CAPÍTULO 5

<b>5. Definición de los datos o variables de entrada del modelo</b> .....	<b>131</b>
5.1. Introducción .....	131
5.2. Caracterización básica de las líneas de transporte público .....	132
5.2.1. Número de líneas a analizar .....	132
5.2.2. Tipología de las líneas .....	132
5.2.3. Longitud de las líneas.....	133
5.2.4. Número de paradas o estaciones en cada línea .....	133
5.2.5. Localización (coordenada longitudinal) de las paradas o estaciones a lo largo de cada línea.....	133
5.2.6. Proporción de paradas entrantes o en bahía (en autobús convencional en tráfico mixto)....	133
5.3. Caracterización básica de los vehículos o unidades de transporte público.....	134
5.3.1. Capacidad estática de las unidades de transporte, dada una densidad de pasajeros de pie de referencia .....	135
5.3.2. Número de plazas de asiento en las unidades de transporte .....	135
5.3.3. Número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) en las unidades de transporte.....	136
5.3.4. Aceleración de las unidades de transporte o vehículos .....	136
5.3.5. Deceleración de las unidades de transporte o vehículos .....	137
5.3.6. Para cada sistema de transporte público, índice identificativo del tipo de vehículo o unidad de transporte asignado a cada línea .....	137

5.3.7.	Porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación .....	138
5.4.	Caracterización básica de la operación y explotación del servicio de transporte público .....	139
5.4.1.	Número de períodos horarios diferenciados .....	139
5.4.2.	Horas anuales asignadas a cada período horario de operación.....	140
5.4.3.	Intervalo mínimo de diseño .....	140
5.4.4.	Intervalo máximo (intervalo de servicio).....	144
5.4.5.	Coefficiente de utilización de la capacidad programada .....	144
5.4.6.	Máxima velocidad programada u objetivo para cada tramo (en plataforma reservada).....	145
5.4.7.	Precios de las diferentes modalidades de tarifa .....	146
5.4.8.	Proporción de viajes en transporte público que son abonados mediante cada modalidad tarifaria .....	146
5.5.	Definición básica de parámetros relacionados con el rendimiento operativo de los modos de transporte público .....	147
5.5.1.	Tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior.....	147
5.5.2.	Factor de eficacia unitaria de los canales de paso.....	150
5.5.3.	Índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros ....	151
5.5.4.	Tiempo medio por parada para las operaciones de apertura y cierre de puertas .....	153
5.5.5.	Coefficiente de tiempo de terminales .....	154
5.6.	Caracterización básica de la utilización (demanda) de las líneas de transporte público .....	156
5.6.1.	Volumen inicial (año base) de viajes en transporte público.....	156
5.6.2.	Coefficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda.....	156
5.6.3.	Coefficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea.....	157
5.6.4.	Coefficiente de pico intrahorario o de hora punta .....	159
5.7.	Establecimiento de horizontes temporales y datos para la división en fases o etapas .....	160
5.7.1.	Duración total del horizonte temporal o período de evaluación .....	160
5.7.2.	Velocidad media de avance en la implantación, en cada línea, de los nuevos modos de transporte público.....	162
5.7.3.	Duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público .....	163
5.8.	Caracterización general de la movilidad y del reparto modal en los itinerarios o corredores afectados.....	164
5.8.1.	Proporción inicial (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público .....	164
5.8.2.	Proporciones iniciales (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual .....	164
5.8.3.	Reparto modal inicial (año base) .....	165
5.8.4.	Composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje.....	166
5.8.5.	Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público.....	167
5.8.6.	Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual .....	168
5.8.7.	Evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos (ajenos a los costes de transporte o atributos de viaje en los itinerarios o corredores analizados) .....	169

5.9. Caracterización básica de las condiciones de circulación de vehículos motorizados en tráfico mixto (datos de estudios de tráfico) .....	172
5.9.1. Velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico (en vías con interrupciones del flujo).....	174
5.9.2. Capacidad viaria inicial para tráfico mixto .....	176
5.9.3. Capacidad viaria para tráfico mixto tras la implantación de los nuevos sistemas de transporte público .....	178
5.9.4. Parámetros $\alpha$ y $\beta$ de la fórmula BPR .....	178
5.9.5. Factores de conversión a automóviles ligeros equivalentes .....	181
5.10. Características adicionales sobre los viajes realizados en vehículo motorizado privado .....	183
5.10.1. Ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el itinerario o corredor en los desplazamientos realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de viaje por pasajero del transporte público .....	183
5.10.2. Contribución de vehículos realizando viajes pasantes al ratio Volumen/Capacidad .....	184
5.10.3. Tasa inicial (año base) de ocupación en automóvil particular .....	185
5.10.4. Tasa de ocupación en moto o ciclomotor .....	187
5.10.5. Evolución futura de la tasa de ocupación en automóvil particular .....	188
5.10.6. Proporción de cumplimiento de la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses de transporte público desde paradas .....	190
5.11. Datos sobre costes unitarios relativos al tiempo de viaje .....	191
5.11.1. Coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo .....	191
5.11.1.1. Coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo <i>commuting</i> .....	195
5.11.1.2. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo <i>commuting</i> , para viajes en transporte público .....	197
5.11.1.3. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo <i>commuting</i> , para viajes en transporte público .....	198
5.11.1.4. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes de tipo <i>commuting</i> .....	199
5.11.1.5. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado .....	199
5.11.1.6. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes en tiempo de trabajo remunerado .....	200
5.11.2. Valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público) .....	200
5.11.3. Valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje .....	202
5.11.3.1. Valoración del coste unitario del tiempo medio de retraso (transporte público).....	204
5.11.3.2. Valoración del coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje (transporte motorizado privado) .....	205
5.11.4. Evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje (en unidades monetarias constantes) .....	207
5.12. Datos sobre costes unitarios relativos al consumo de energía .....	208
5.12.1. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de automóviles particulares .....	208
5.12.1.1. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa.....	210

5.12.1.2. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina) .....	210
5.12.1.3. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa .....	212
5.12.1.4. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina) .....	213
5.12.2. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de motos y ciclomotores .....	215
5.12.2.1. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica .....	215
5.12.2.2. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica.....	216
5.12.3. Consumo de energía en vehículos eléctricos y proyecciones de reducción de consumo de combustible en motores de combustión interna.....	217
5.12.3.1. Consumo promedio de energía en automóviles eléctricos.....	218
5.12.3.2. Consumo promedio de energía en motos y ciclomotores eléctricos.....	219
5.12.3.3. Reducción proporcional del consumo medio de combustible esperable al final del horizonte de evaluación .....	220
5.12.3.3.a. Reducción de consumo medio en automóviles de gasolina .....	221
5.12.3.3.b. Reducción de consumo medio en automóviles diésel .....	221
5.12.3.3.c. Reducción de consumo medio en motos y ciclomotores de gasolina .....	222
5.12.4. Precios de los combustibles y de la energía eléctrica.....	222
5.12.4.1. Precio inicial (año base) de venta de la gasolina .....	222
5.12.4.2. Precio inicial (año base) de venta del combustible diésel .....	223
5.12.4.3. Precio inicial (año base) de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos.....	223
5.12.4.4. Evolución futura del precio de venta de los productos energéticos (en unidades monetarias constantes) .....	224
5.12.4.4.a. Evolución futura del precio de venta de la gasolina.....	224
5.12.4.4.b. Evolución futura del precio de venta del combustible diésel .....	225
5.12.4.4.c. Evolución futura del precio de venta de la energía eléctrica .....	225
5.13. Estimación de posibles cambios en otros costes modales.....	226
5.13.1. <i>Bonus</i> modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional .....	226
5.13.2. Evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo .....	230
5.14. Datos adicionales para la obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda.....	232
5.14.1. Proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda .....	232
5.14.2. Proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda .....	233
5.14.3. Cuota modal del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda .....	233
5.14.4. Variación media por viajero, entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, del coste generalizado de las opciones modales de transporte.....	234
5.14.5. Ratio o cociente entre los parámetros $\theta$ y $\lambda$ del modelo de demanda .....	235



5.15. Parámetros numéricos relativos a la ejecución del modelo ..... 237

5.15.1. Número de simulaciones aleatorias a ejecutar ..... 237

5.15.2. Parámetros numéricos concernientes a la convergencia de las iteraciones ..... 237

5.15.2.1. Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo de las cuotas de reparto modal general ..... 237

5.15.2.2. Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales ..... 238

5.15.2.3. Coeficiente de avance relativo entre iteraciones..... 238

**CAPÍTULO 6**

**6. Aleatorización de las simulaciones del modelo ..... 239**

6.1. Introducción ..... 239

6.2. Bases o fundamentos teórico-prácticos ..... 240

6.2.1. Distribución triangular simétrica como suma de dos variables aleatorias independientes con distribución uniforme sobre intervalos de igual anchura ..... 240

6.2.1.1. Caso general..... 240

6.2.1.2. Caso particular: semisuma de dos variables con distribuciones uniformes estándar ..... 240

6.2.2. Transformación de valores entre dos distribuciones aleatorias distintas ..... 241

6.2.2.1. Método de transformación basado en la función inversa de la distribución acumulada ..... 241

6.2.2.2. Transformación de valores desde una distribución uniforme a una distribución triangular ..... 241

6.2.2.2.a. Caso general..... 241

6.2.2.2.b. Caso particular. Definición de la función triang<sup>I</sup> ..... 243

6.2.2.3. Transformación de valores entre dos distribuciones triangulares de diferentes parámetros ..... 244

6.2.2.3.a. Caso general..... 244

6.2.2.3.b. Caso particular. Definición de la función triang<sup>II</sup> ..... 247

6.2.3. Correlación entre dos variables aleatorias  $A$  y  $B$ , siendo  $A=m \cdot X+n \cdot Y$  y  $B=m \cdot X+n \cdot Z$  (con  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  independientes entre sí) ..... 248

6.2.3.1. Caso general..... 248

6.2.3.2. Particularizaciones..... 250

6.3. Aleatorización de datos o variables de entrada ..... 252

6.3.1. Variables relativas a los vehículos o unidades de transporte público ..... 252

6.3.1.1. Aleatorización del porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación ..... 252

6.3.2. Variables referentes a los parámetros relacionados con el rendimiento operativo de los modos de transporte público..... 253

6.3.2.1. Aleatorización del tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior ..... 253

6.3.2.2. Aleatorización del factor de eficacia unitaria de los canales de paso ..... 254

6.3.2.3. Aleatorización del índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros ..... 255

6.3.2.4. Aleatorización del tiempo medio por parada para las operaciones de apertura y cierre de puertas ..... 256

6.3.2.5. Aleatorización del coeficiente de tiempo de terminales ..... 256

6.3.3. Variables relativas a la división del horizonte temporal de evaluación en fases o etapas ..... 257

6.3.3.1. Aleatorización de la velocidad media de avance en la implantación, en cada línea, de los nuevos modos de transporte público ..... 257

6.3.3.2.	Aleatorización de la duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público .....	258
6.3.4.	Variables relativas a la movilidad y el reparto modal en los corredores o itinerarios afectados.....	259
6.3.4.1.	Aleatorización de la evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público .....	259
6.3.4.2.	Aleatorización de la evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual .....	260
6.3.4.3.	Aleatorización de la evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos (ajenos a los costes de transporte o atributos de viaje) .....	262
6.3.5.	Variables relativas a las condiciones de circulación de vehículos motorizados en tráfico mixto .....	263
6.3.5.1.	Aleatorización de la velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico .....	263
6.3.5.2.	Aleatorización de la capacidad viaria inicial para tráfico mixto .....	264
6.3.5.3.	Aleatorización de la capacidad viaria para tráfico mixto tras la implantación de los nuevos sistemas de transporte público.....	265
6.3.5.4.	Aleatorización de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ de la fórmula BPR.....	266
6.3.5.4.a.	Parámetros $\alpha$ .....	266
6.3.5.4.b.	Parámetros $\beta$ .....	268
6.3.5.5.	Aleatorización de los factores de conversión a automóviles ligeros equivalentes.....	269
6.3.5.5.a.	Autobuses .....	269
6.3.5.5.b.	Motos y ciclomotores.....	270
6.3.6.	Variables relativas a las características adicionales de los viajes realizados en vehículo motorizado privado.....	270
6.3.6.1.	Aleatorización del ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el corredor o itinerario en los desplazamientos realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de viaje por pasajero del transporte público.....	270
6.3.6.2.	Aleatorización de la contribución de vehículos realizando viajes pasantes al ratio Volumen/Capacidad .....	271
6.3.6.3.	Aleatorización de la tasa inicial (año base) de ocupación en automóvil particular .....	272
6.3.6.4.	Aleatorización de la tasa de ocupación en moto o ciclomotor .....	273
6.3.6.5.	Aleatorización de la evolución futura de la tasa de ocupación en automóvil particular .....	274
6.3.6.6.	Aleatorización de la proporción de cumplimiento de la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses de transporte público desde paradas .....	274
6.3.7.	Variables referentes a los costes unitarios relacionados con el tiempo de viaje .....	276
6.3.7.1.	Aleatorización del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo <i>commuting</i> .....	276
6.3.7.2.	Aleatorización del factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo <i>commuting</i> , para viajes en transporte público .....	276
6.3.7.3.	Aleatorización del factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo <i>commuting</i> , para viajes en transporte público.....	277
6.3.7.4.	Aleatorización de los factores de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público .....	277
6.3.7.4.a.	Para viajes de tipo <i>commuting</i> .....	278
6.3.7.4.b.	Para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado .....	279
6.3.7.4.c.	Para viajes en tiempo de trabajo remunerado.....	279
6.3.7.5.	Aleatorización de la valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público) .....	280

6.3.7.6.	Aleatorización de la valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje.....	281
6.3.7.6.a.	Coste unitario del tiempo medio de retraso (transporte público) .....	282
6.3.7.6.b.	Coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje (transporte motorizado privado) .....	282
6.3.7.7.	Aleatorización de la evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje.....	283
6.3.8.	Variables referentes a los costes unitarios relacionados con el consumo de energía .....	284
6.3.8.1.	Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa .....	284
6.3.8.2.	Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina) .....	284
6.3.8.3.	Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa .....	285
6.3.8.4.	Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina) .....	286
6.3.8.5.	Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica .....	287
6.3.8.6.	Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica.....	287
6.3.8.7.	Aleatorización del consumo promedio de energía en vehículos eléctricos (automóviles y motos/ciclomotores) .....	288
6.3.8.8.	Aleatorización de la reducción proporcional del consumo medio de combustible esperable al final del horizonte de evaluación .....	289
6.3.8.9.	Aleatorización del precio inicial (año base) de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos .....	291
6.3.8.10.	Aleatorización de la evolución futura del precio de venta de los productos energéticos (gasolina, combustible diésel y energía eléctrica).....	292
6.3.9.	Variables relativas a la estimación de posibles cambios en otros costes modales .....	293
6.3.9.1.	Aleatorización del <i>bonus</i> modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional .....	293
6.3.9.2.	Aleatorización de la evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo .....	294
6.3.10.	Variables adicionales relativas a la obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda .....	295
6.3.10.1.	Aleatorización de la variación media por viajero, entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, del coste generalizado de las opciones modales de transporte .....	295
6.3.10.2.	Aleatorización del ratio o cociente entre los parámetros $\theta$ y $\lambda$ del modelo de demanda .....	296
6.4.	Aleatorización primigenia de funciones de cálculo propias del modelo .....	298
6.4.1.	Aleatorización de funciones del modelo a utilizar en los cálculos preliminares .....	298
6.4.1.1.	Aleatorización primigenia de la función normalizada para la asignación de la cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio .....	298
6.4.2.	Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con el rendimiento operativo de los modos de transporte público .....	298
6.4.2.1.	Aleatorización primigenia del incremento del tiempo medio por persona y movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público por efecto de la densidad media de pasajeros de pie prevista .....	298
6.4.2.2.	Aleatorización primigenia de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía.....	299
6.4.2.3.	Aleatorización primigenia del coeficiente para la mayoración del tiempo teórico ideal de recorrido en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica .....	300

6.4.2.4.	Aleatorización primigenia del factor para la mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de la parada .....	301
6.4.3.	Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con el incremento del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos .....	302
6.4.3.1.	Aleatorización primigenia del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie.....	303
6.4.3.2.	Aleatorización primigenia del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie .....	303
6.4.4.	Aleatorización de funciones del modelo relativas a los tiempos de espera en parada y de retraso medio en transporte público .....	304
6.4.4.1.	Aleatorización primigenia del tiempo medio de espera en parada para el usuario del transporte público .....	304
6.4.4.2.	Aleatorización primigenia del tiempo de retraso medio en autobús convencional (operación en tráfico mixto).....	305
6.4.4.3.	Aleatorización primigenia del tiempo de retraso medio en los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica.....	305
6.4.5.	Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con los costes de viaje en vehículo motorizado privado.....	307
6.4.5.1.	Aleatorización primigenia del factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria.....	307
6.4.5.2.	Aleatorización primigenia de la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado .....	307
6.4.5.3.	Aleatorización primigenia del consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado.....	308
6.4.5.3.a.	Aleatorización primigenia del consumo promedio en automóviles diésel .....	310
6.4.5.3.b.	Aleatorización primigenia del consumo promedio en automóviles de gasolina .....	310
6.4.5.3.c.	Aleatorización primigenia del consumo promedio en motos y ciclomotores (de gasolina) .....	310

## CAPÍTULO 7

<b>7.</b>	<b>Cálculos preliminares del modelo</b>	<b>313</b>
7.1.	Introducción.....	313
7.2.	Cálculos preliminares relativos a la delimitación de fases o etapas durante el horizonte de evaluación.....	313
7.2.1.	Final de la fase de implantación del nuevo modo de transporte público y comienzo de la fase de introducción y consolidación del servicio.....	313
7.2.2.	Comienzo de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público .....	314
7.3.	Cálculo preliminar del tiempo teórico total de recorrido de una línea en condiciones ideales, para los modos de transporte público en plataforma reservada.....	315
7.3.1.	Longitudes de los tramos entre paradas o estaciones.....	315
7.3.2.	Longitud mínima necesaria entre paradas o estaciones consecutivas para alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo de cada tramo.....	316
7.3.3.	Tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales para cada tramo entre paradas o estaciones consecutivas.....	319
7.3.4.	Tiempo teórico total de recorrido de la totalidad de los tramos de una línea en condiciones ideales.....	323
7.4.	Cálculos preliminares relacionados con el uso de las líneas de transporte público .....	324
7.4.1.	Distancia media de desplazamiento de los pasajeros del modo de transporte público .....	324

7.4.2.	Tarifa media abonada por cada viaje en los modos de transporte público .....	325
7.5.	Cálculos preliminares relacionados con el uso de los vehículos motorizados privados .....	325
7.5.1.	Longitud media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado .....	325
7.5.2.	Capacidad viaria para tráfico mixto en los diferentes escenarios, a lo largo del horizonte de evaluación .....	326
7.5.3.	Tasa de ocupación en automóvil particular, a lo largo del horizonte de evaluación .....	327
7.6.	Cálculos preliminares relacionados con el volumen de viajes y el reparto modal en los itinerarios o corredores afectados .....	328
7.6.1.	Volumen total de viajes (por hora) en el año base mediante el conjunto completo de opciones modales.....	328
7.6.2.	Proporción (a lo largo del horizonte de evaluación) de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público .....	328
7.6.3.	Proporciones (a lo largo del horizonte de evaluación) de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual.....	329
7.7.	Cálculos preliminares relacionados con el coste unitario medio del tiempo de viaje.....	330
7.7.1.	Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte público, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación.....	330
7.7.2.	Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte motorizado privado, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación .....	331
7.8.	Cálculos preliminares relativos al reparto de vehículos-km (en transporte motorizado privado) por tipo de alimentación de energía.....	333
7.8.1.	Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa, a lo largo del horizonte de evaluación .....	333
7.8.2.	Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación .....	333
7.8.3.	Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de combustible diésel, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación .....	334
7.8.4.	Fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica, a lo largo del horizonte de evaluación .....	335
7.8.5.	Fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante uso de gasolina, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación .....	336
7.9.	Cálculos preliminares relativos a los precios futuros de los combustibles y de la energía eléctrica .....	336
7.9.1.	Precio de venta de la gasolina, a lo largo del horizonte de evaluación .....	336
7.9.2.	Precio de venta del combustible diésel, a lo largo del horizonte de evaluación .....	337
7.9.3.	Precio de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos, a lo largo del horizonte de evaluación.....	337
7.10.	Cálculos preliminares relativos a la obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda.....	338
7.10.1.	Cuotas de reparto modal no cautivo para cada opción de transporte en el año base .....	338
7.10.2.	Cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda .....	338
7.10.3.	Parámetro $\lambda$ de sensibilidad al coste generalizado de las alternativas en el reparto modal .....	339
7.10.4.	Parámetro $\theta$ de 'impedancia' o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes.....	339

7.11. Otros cálculos preliminares .....	340
7.11.1. Función normalizada para la asignación de la cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio .....	340

## CAPÍTULO 8

### **8. Núcleo de cálculo: Modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado** **343**

8.1. Introducción .....	343
8.2. Módulos de cálculo: Pautas para el inicio y continuación de cada bucle iterativo.....	345
8.2.1. Aproximaciones iniciales para la iteración de partida en el arranque de cada bucle iterativo .....	345
8.2.1.1. Inicio de bucles iterativos de tipo A .....	346
8.2.1.2. Inicio de bucles iterativos de tipo B .....	347
8.2.2. Continuidad del bucle para cualquier iteración distinta de la inicial o de partida .....	348
8.3. Núcleo de cálculo del modelo: Año base y módulos de cálculo (previsiones para el horizonte de evaluación) .....	348
8.3.1. Volumen de viajes por hora en cada modo de transporte .....	349
8.3.2. Dimensionamiento del servicio de transporte público .....	350
8.3.2.1. Volumen de pasajeros en la sección de máxima demanda de la línea de transporte público .....	350
8.3.2.2. Volumen de diseño para la línea de transporte público .....	351
8.3.2.3. Intervalo entre unidades de transporte público .....	352
8.3.2.3.a. Intervalo estrictamente necesario para atender el volumen de diseño.....	352
8.3.2.3.b. Intervalo restringido entre los límites mínimo y máximo .....	355
8.3.2.3.c. Intervalo restringido y redondeado inferiormente.....	356
8.3.2.4. Densidades de pasajeros de pie en los vehículos de transporte público .....	357
8.3.2.4.a. Densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda.....	358
8.3.2.4.b. Densidad de pasajeros de pie a lo largo de la línea (promedio).....	360
8.3.3. Intensidad de tráfico mixto.....	363
8.3.3.1. Volumen horario (o demanda) de tráfico mixto expresado en automóviles ligeros equivalentes .....	364
8.3.3.2. Ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto .....	366
8.3.4. Obtención de la velocidad media de operación del transporte público .....	367
8.3.4.1. Tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en las condiciones previstas de densidad .....	367
8.3.4.2. Demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía .....	372
8.3.4.3. Coeficiente para la mayoración del tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica .....	377
8.3.4.4. Factor para la mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de la parada .....	384
8.3.4.5. Tiempos de operación (entre terminales de la línea) .....	389
8.3.4.5.a. Tiempo de operación para autobús convencional (operación en tráfico mixto).....	390
8.3.4.5.b. Tiempo de operación para metro ligero o tranvía .....	394
8.3.4.5.c. Tiempo de operación para BHLS o BRT .....	395
8.3.4.6. Velocidad media de operación del transporte público .....	396
8.3.5. Obtención de atributos del transporte público .....	397
8.3.5.1. Tiempo medio a bordo del vehículo para los usuarios del transporte público .....	397

8.3.5.2.	Incremento del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos.....	398
8.3.5.2.a.	Fracción de pasajeros sentados con presencia de otros pasajeros de pie .....	400
8.3.5.2.b.	Fracción de pasajeros de pie .....	403
8.3.5.2.c.	Multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie.....	406
8.3.5.2.d.	Multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie.....	412
8.3.5.2.e.	Multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros .....	417
8.3.5.3.	Tiempo medio de espera en parada para el usuario del transporte público.....	419
8.3.5.4.	Fiabilidad de horarios en transporte público .....	425
8.3.5.4.a.	Consideraciones preliminares .....	425
8.3.5.4.b.	Tiempo de retraso medio en el transporte público.....	429
8.3.5.4.c.	Tiempo de retraso medio en autobús convencional (operación en tráfico mixto).....	433
8.3.5.4.d.	Tiempo de retraso medio en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica.....	438
8.3.6.	Coste (o precio) generalizado por viaje medio en el modo de transporte público .....	443
8.3.7.	Atributos y variaciones de costes en las opciones de vehículo motorizado privado .....	446
8.3.7.1.	Velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado .....	446
8.3.7.2.	Variación (a lo largo del tiempo) del coste medio generado al viajero por el tiempo de viaje consumido a bordo del vehículo motorizado privado .....	448
8.3.7.2.a.	Factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria .....	448
8.3.7.2.b.	Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste medio de viaje generado por el tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado.....	452
8.3.7.2.c.	Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje generado por el tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado .....	454
8.3.7.3.	Variación (a lo largo del tiempo) del coste medio generado al viajero por irregularidad o incertidumbre del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado.....	455
8.3.7.3.a.	Variabilidad del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado .....	455
8.3.7.3.b.	Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste medio de viaje por irregularidad o incertidumbre del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado .....	459
8.3.7.3.c.	Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje por irregularidad o incertidumbre del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado.....	461
8.3.7.4.	Consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado.....	461
8.3.7.4.a.	Consumo promedio en automóviles diésel.....	462
8.3.7.4.b.	Consumo promedio en automóviles de gasolina .....	465
8.3.7.4.c.	Consumo promedio en motos y ciclomotores de gasolina.....	467
8.3.7.5.	Variación (a lo largo del tiempo) del coste privado medio generado al viajero por consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) en vehículo motorizado particular.....	471
8.3.7.5.a.	Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste medio de viaje por consumo energético en vehículo motorizado particular.....	471
8.3.7.5.b.	Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje por consumo energético en vehículo motorizado particular .....	474
8.3.8.	Variación (a lo largo del tiempo) del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las opciones modales de transporte.....	475
8.3.8.1.	Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las distintas opciones modales de transporte .....	475

8.3.8.2.	Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las distintas opciones modales de transporte .....	477
8.3.9.	Reparto modal .....	478
8.3.9.1.	Cuota de reparto modal no cautivo para cada alternativa de transporte .....	478
8.3.9.2.	Cuota de reparto modal general para cada alternativa de transporte .....	481
8.3.9.3.	Proporción de viajes correspondientes a usuarios cautivos del transporte público sobre el total de viajes efectuados en dicha modalidad de transporte .....	482
8.3.10.	Variación (a lo largo del tiempo) del coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) en cada escenario .....	483
8.3.10.1.	Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste compuesto promediado o ponderado .....	484
8.3.10.2.	Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste compuesto promediado o ponderado .....	486
8.3.11.	Volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales .....	487
8.4.	Módulos de cálculo: Criterios para la finalización o continuación de cada bucle iterativo .....	488
8.5.	Módulos de cálculo: Desarrollo de aproximaciones iniciales para la iteración de partida en el arranque de cada bucle iterativo de tipo A .....	490
8.5.1.	Variables auxiliares o instrumentales .....	492
8.5.1.1.	Hipotéticas cuotas de reparto modal no cautivo para cada alternativa de transporte (aproximación inicial de partida) .....	492
8.5.1.2.	Hipotética variación entre años consecutivos del coste compuesto promediado o ponderado (aproximación inicial de partida) .....	495
8.5.1.3.	Hipotética variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste compuesto promediado o ponderado (aproximación inicial de partida) .....	496
8.5.2.	Aproximación inicial a las cuotas de reparto modal general .....	496
8.5.3.	Aproximación inicial al volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales .....	497
8.6.	Otros resultados complementarios .....	498
8.6.1.	Tiempos de ciclo y número de unidades de transporte necesarias .....	498
8.6.1.1.	Tiempo no ajustado de terminales (por cada ciclo completo) .....	498
8.6.1.2.	Tiempo de ciclo no ajustado .....	500
8.6.1.3.	Número de unidades de transporte en prestación de servicio (por línea y período horario) .....	500
8.6.1.4.	Tiempo de ciclo (ajustado) .....	501
8.6.1.5.	Velocidad de ciclo .....	502
8.6.1.6.	Tiempo de terminales (ajustado) .....	502
8.6.1.7.	Número de unidades de transporte público prestando servicio en cada línea en su período horario de mayor exigencia .....	503
8.6.1.8.	Número necesario de unidades de transporte, de cada tipo, para la prestación de servicio en el subconjunto de líneas estudiadas .....	504
8.6.1.9.	Número adicional de unidades de transporte, de cada tipo, en reserva y en mantenimiento o reparación .....	505
8.6.1.10.	Número de unidades de transporte, de cada tipo, necesarias en la composición de la flota o parque .....	505
8.6.2.	Otras potenciales contribuciones del modelo en relación con la explotación del servicio de transporte público .....	506
8.6.2.1.	Operaciones .....	506
8.6.2.1.a.	Distancia útil (en servicio comercial) recorrida anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte .....	507



8.6.2.1.b. Distancia total recorrida anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte .....	507
8.6.2.1.c. Tiempo de servicio acumulado anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte.....	508
8.6.2.1.d. Tasa (anual media) de acceso o captación de pasajeros por kilómetro útil recorrido .....	508
8.6.2.1.e. Tasa (anual media) de acceso o captación de pasajeros por hora en servicio .....	509
8.6.2.1.f. Velocidad (media anual) de ciclo .....	509
8.6.2.1.g. Número anual de expediciones .....	510
8.6.2.2. Personal.....	510
8.6.2.3. Material móvil.....	511
8.6.2.4. Gastos y costes .....	511
8.6.2.5. Financiación.....	512
8.6.3. Cálculo del excedente de los viajeros (excedente del consumidor) .....	512
8.6.3.1. Principios fundamentales y formulación general.....	512
8.6.3.2. Aplicación al modelo .....	517

## CAPÍTULO 9

### 9. Ejemplo práctico de aplicación numérica 519

9.1. Introducción .....	519
9.2. Especificación de los datos utilizados (valores de las variables de entrada) .....	520
9.2.1. Características básicas de la línea de transporte público.....	520
9.2.2. Características básicas de los vehículos o unidades de transporte público .....	521
9.2.3. Características básicas de la operación y explotación del servicio de transporte público.....	521
9.2.4. Parámetros relacionados con el rendimiento operativo de los modos de transporte público.....	523
9.2.5. Características básicas de la utilización (demanda) de la línea de transporte público.....	524
9.2.6. Horizontes temporales y datos para la división en fases o etapas.....	525
9.2.7. Características generales de la movilidad y del reparto modal en los itinerarios o corredores afectados .....	525
9.2.8. Características básicas de las condiciones de circulación de vehículos motorizados en tráfico mixto (datos de estudios de tráfico) .....	527
9.2.9. Características adicionales sobre los viajes realizados en vehículo motorizado privado .....	528
9.2.10. Datos sobre costes unitarios relativos al tiempo de viaje .....	529
9.2.10.1. Coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo .....	529
9.2.10.2. Valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público) .....	530
9.2.10.3. Valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje .....	530
9.2.10.4. Evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje (en unidades monetarias constantes) .....	530
9.2.11. Datos sobre costes unitarios relativos al consumo de energía .....	531
9.2.11.1. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de automóviles particulares.....	531
9.2.11.2. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de motos y ciclomotores.....	531
9.2.11.3. Consumo de energía en vehículos eléctricos y proyecciones de reducción de consumo de combustible en motores de combustión interna .....	532
9.2.11.4. Precios de los combustibles y de la energía eléctrica .....	532
9.2.12. Estimación de posibles cambios en otros costes modales .....	533

9.2.13. Datos adicionales para la obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda .....	536
9.2.14. Parámetros numéricos relativos a la ejecución del modelo .....	537
9.3. Exposición de resultados: post-procesado, representación gráfica y análisis.....	538
9.3.1. Resultados relativos a los cálculos preliminares .....	538
9.3.1.1. Distancia media de desplazamiento de los pasajeros del modo de transporte público .....	538
9.3.1.2. Longitud media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado .....	539
9.3.1.3. Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte público y para los usuarios de transporte motorizado privado, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación .....	539
9.3.1.4. Parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda.....	541
9.3.2. Resultados relacionados con el nivel de servicio en transporte público.....	543
9.3.2.1. Velocidad media de operación del transporte público.....	543
9.3.2.2. Diferencia entre la velocidad media de operación del transporte público y la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular.....	546
9.3.2.3. Intervalo de paso entre unidades de transporte público de la línea .....	548
9.3.2.4. Tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público .....	551
9.3.2.5. Velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo .....	553
9.3.2.6. Densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda .....	556
9.3.2.7. Densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea.....	558
9.3.2.8. Multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros .....	560
9.3.2.9. Tiempo de retraso medio en el modo de transporte público .....	562
9.3.3. Resultados relacionados con las condiciones de circulación en vehículo motorizado privado .....	564
9.3.3.1. Volumen de tráfico mixto expresado en automóviles ligeros equivalentes y correspondiente ratio Volumen/Capacidad.....	564
9.3.3.2. Velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado .....	566
9.3.3.2.a. Automóvil particular.....	566
9.3.3.2.b. Moto/ciclomotor .....	568
9.3.3.3. Variabilidad del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado .....	570
9.3.3.3.a. Automóvil particular.....	570
9.3.3.3.b. Moto/ciclomotor .....	572
9.3.3.4. Consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado .....	573
9.3.3.4.a. Automóviles diésel .....	573
9.3.3.4.b. Automóviles de gasolina .....	575
9.3.3.4.c. Motos y ciclomotores de gasolina.....	576
9.3.4. Resultados relacionados con los costes generalizados, los volúmenes de viajes y el reparto modal .....	578
9.3.4.1. Diferencias de coste generalizado por viaje medio entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia .....	578
9.3.4.1.a. Opción de transporte público.....	579
9.3.4.1.b. Opción de automóvil particular .....	581
9.3.4.1.c. Opción de moto o ciclomotor .....	582
9.3.4.2. Diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular.....	584
9.3.4.3. Volumen de viajes por hora en las modalidades de transporte público y de transporte motorizado privado .....	586
9.3.4.3.a. Transporte público .....	586
9.3.4.3.b. Automóvil particular.....	589

9.3.4.3.c. Moto y ciclomotor.....	591
9.3.4.4. Diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia .....	592
9.3.4.5. Volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales .....	595
9.3.4.6. Cuotas de reparto modal general y de reparto modal no cautivo para cada opción de transporte.....	598
9.3.4.6.a. Transporte público .....	598
9.3.4.6.b. Automóvil particular.....	601
9.3.4.6.c. Moto o ciclomotor.....	603
9.3.4.6.d. Bicicleta o vehículo de movilidad personal .....	605
9.3.4.6.e. Modo peatonal.....	607
9.3.5. Resultados relacionados con la explotación del transporte público.....	609
9.3.5.1. Volumen anual de viajes en la línea de transporte público.....	609
9.3.5.2. Velocidad de ciclo en la línea de transporte público .....	612
9.3.5.3. Número de unidades de transporte público necesarias en la composición de la flota o parque en cada escenario .....	614
9.3.6. Conclusiones del ejemplo de aplicación numérica .....	615
9.3.6.1. Análisis de los cambios en el excedente de los viajeros generados por los nuevos escenarios alternativos .....	616
9.3.6.2. Conclusiones orientadas a la evaluación .....	622

## CAPÍTULO 10

### **10. Conclusiones, aportaciones y futuras líneas de investigación** **629**

10.1. Introducción .....	629
10.2. Aportaciones .....	629
10.3. Conclusiones.....	633
10.3.1. Conclusiones relacionadas con el enfoque metodológico adoptado.....	633
10.3.2. Conclusiones relacionadas con la evaluación comparativa de sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia .....	637
10.3.2.1. Conclusiones relativas a los costes de implantación y de operación y mantenimiento.....	637
10.3.2.2. Conclusiones relativas al excedente de los viajeros .....	638
10.3.2.3. Conclusiones preliminares relativas a la rentabilidad socioeconómica de los proyectos.....	639
10.4. Oportunidades de mejora .....	640
10.5. Futuras líneas de investigación .....	642

### **Publicaciones del autor relacionadas con la tesis doctoral** **645**

### **Referencias** **647**



# Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Resumen de principales clasificaciones sobre las categorías de sección transversal disponible para el uso del transporte público y sobre el tipo de entorno operativo equivalente .....	36
<b>Tabla 2.2.</b> Estructura general de clasificación de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano basados en tecnologías ferroviarias y en autobuses .....	48
<b>Tabla 2.3.</b> Comparación de las principales características de los sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia de tipo <i>Bus Semirapid Transit (BST)</i> y <i>Light Rail Transit (LRT)</i> .....	50
<b>Tabla 2.4.</b> Costes iniciales totales de implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada según el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) .....	71
<b>Tabla 2.5.</b> Costes iniciales prorrateados para la implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) .....	72
<b>Tabla 2.6.</b> Costes iniciales totales de implantación de posibles variantes en sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada según el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) .....	73
<b>Tabla 2.7.</b> Costes iniciales totales de implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS) según los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013) .....	74
<b>Tabla 2.8.</b> Costes iniciales prorrateados para la implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013) .....	75
<b>Tabla 2.9.</b> Costes iniciales totales de implantación de posibles variantes en sistemas de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS) según los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013) .....	76
<b>Tabla 2.10.</b> Costes de operación y mantenimiento de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) .....	77
<b>Tabla 2.11.</b> Costes de operación y mantenimiento de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), obtenidos a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013).....	78
<b>Tabla 2.12.</b> Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de metro ligero o LRT, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).....	79
<b>Tabla 2.13.</b> Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) .....	79
<b>Tabla 2.14.</b> Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de metro ligero o LRT, calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013) .....	80
<b>Tabla 2.15.</b> Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson <i>et al.</i> (2013).....	80
<b>Tabla 3.1.</b> Segmentación del horizonte o período de evaluación en fases o etapas para cada uno de los escenarios que forman parte del modelo .....	86
<b>Tabla 3.2.</b> Resumen de opciones modales disponibles en cada escenario del modelo y en cada una de las fases o etapas del horizonte o período de evaluación.....	88

<b>Tabla 3.3.</b> Módulos de cálculo aplicables a cada escenario y a cada una de las fases del horizonte o período de evaluación en que estos se dividen.....	100
<b>Tabla 5.1.</b> Rangos aproximados de capacidad y número de asientos para autobuses o trolebuses y tranvías o vehículos de metro ligero de diferentes longitudes típicas .....	135
<b>Tabla 5.2.</b> Tiempos individuales de servicio al pasajero en movimientos de entrada y salida de viajeros en sistemas de autobuses con subida/bajada a nivel.....	149
<b>Tabla 5.3.</b> Cálculo de valores orientativos del factor de eficacia unitaria de los canales de paso según el número de canales disponibles en los vehículos o unidades de transporte .....	151
<b>Tabla 5.4.</b> Valores recomendados de los parámetros de la fórmula BPR para arterias urbanas .....	180
<b>Tabla 5.5.</b> Consumo de energía de diversos modelos de automóviles eléctricos puros en tráfico urbano y mixto o combinado .....	219
<b>Tabla 5.6.</b> Consumo de energía estimado para diversos modelos de motocicletas y ciclomotores eléctricos en circulación urbana .....	220
<b>Tabla 5.7.</b> Porcentajes previstos de reducción de consumo de combustible (por unidad de distancia recorrida) para diferentes horizontes temporales, en automóviles de gasolina y diésel.....	222
<b>Tabla 8.1.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los incrementos por congestión en el tiempo medio por movimiento de entrada o salida de pasajero ( <i>pstd</i> o <i>pstd*</i> ).....	371
<b>Tabla 8.2.</b> Demora media de reincorporación del autobús convencional en tráfico mixto para paradas 'off-line' situadas fuera del ámbito de influencia de señales semafóricas .....	374
<b>Tabla 8.3.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto ( <i>rd</i> o <i>rd*</i> ) .....	376
<b>Tabla 8.4.</b> Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del coeficiente de mayoración del tiempo teórico o ideal de recorrido de los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica ( $\omega$ ).....	383
<b>Tabla 8.5.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación de la capacidad de las paradas ( $\tau$ o $\tau^*$ ).....	389
<b>Tabla 8.6.</b> Multiplicadores del tiempo de viaje aplicables a pasajeros sentados por congestión o aglomeración de viajeros a bordo del vehículo, según Whelan y Crockett (2009) .....	408
<b>Tabla 8.7.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie ( <i>Mcns</i> o <i>Mcns*</i> ).....	412
<b>Tabla 8.8.</b> Multiplicadores del tiempo de viaje aplicables a pasajeros de pie por congestión o aglomeración de viajeros a bordo del vehículo, según Whelan y Crockett (2009) .....	413
<b>Tabla 8.9.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie ( <i>Mcss</i> o <i>Mcss*</i> ) .....	416
<b>Tabla 8.10.</b> Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de espera en parada o estación para los usuarios del transporte público ( <i>tw</i> o <i>tw*</i> ) .....	424
<b>Tabla 8.11.</b> Equivalencias propuestas entre índice de puntualidad y tiempo medio de retraso, para un adelanto máximo aceptable de 1 minuto y un máximo retraso admitido de 5 minutos .....	433
<b>Tabla 8.12.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso ( <i>mlt</i> o <i>mlt*</i> ) en autobús convencional en tráfico mixto.....	437

<b>Tabla 8.13.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso ( <i>mlt</i> o <i>mlt*</i> ) en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica.....	443
<b>Tabla 8.14.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria ( <i>ACTR</i> o <i>ACTR*</i> ) .....	452
<b>Tabla 8.15.</b> Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado ( <i>σtm</i> o <i>σtm*</i> ) .....	459
<b>Tabla 8.16.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en automóviles diésel ( <i>FCd</i> o <i>FCd*</i> ) .....	465
<b>Tabla 8.17.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en automóviles de gasolina ( <i>FCd</i> o <i>FCd*</i> ) .....	467
<b>Tabla 8.18.</b> Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en motos y ciclomotores ( <i>FCm</i> o <i>FCm*</i> )	470
<b>Tabla 9.1.</b> Valor actualizado (referido al año base) de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' durante la totalidad del horizonte o período de evaluación, para diferentes valores posibles de la tasa social de descuento .....	623





# Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Evolución del porcentaje de población urbana en España, en los países de la Unión Europea y en el mundo durante el período 1960-2017 .....	6
<b>Figura 1.2.</b> Ejemplos de las dos principales clases de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia: a) Tranvía moderno en Montpellier (Francia); b) Sistema de autobuses semirrápidos sobre plataforma reservada (BHLS o BRT) en Nantes (Francia) .....	11
<b>Figura 1.3.</b> Interdependencias entre los principales grupos de procesos del modelo y aplicabilidad de este en relación con la evaluación coste-beneficio de proyectos de transporte, como posterior utilidad final de la investigación .....	26
<b>Figura 2.1.</b> Sistema de tranvía en la ciudad francesa de Le Havre .....	38
<b>Figura 2.2.</b> Sistema BRT ( <i>Bus Rapid Transit</i> ) de alta capacidad en la ciudad brasileña de Curitiba (Linha Verde 550) .....	43
<b>Figura 2.3.</b> Sistema de BHLS (línea T1 o Tango+) en la ciudad de Nîmes (Francia) .....	44
<b>Figura 3.1.</b> Representación gráfica del esquema general de funcionamiento del modelo desarrollado en esta tesis .....	98
<b>Figura 3.2.</b> Orden de ejecución de los módulos de cálculo en cada escenario .....	100
<b>Figura 5.1.</b> Ejemplo simplificado de perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de una línea, con representación de las áreas involucradas en la deducción gráfica del coeficiente de compacidad $\delta$ .....	158
<b>Figura 5.2.</b> Ejemplo de diversas curvas de velocidad media de trayecto (como fracción de la velocidad con volumen nulo de tráfico) en función del ratio Volumen/Capacidad, según la fórmula general del BPR con diferentes combinaciones de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ .....	173
<b>Figura 6.1.</b> Diagrama de dispersión bivalente de dos variables aleatorias $A$ y $B$ (ambas con distribución triangular de mínimo 0, máximo 1 y moda $\frac{1}{2}$ ) obtenidas a partir de tres variables aleatorias independientes $(X, Y, Z)$ con distribución uniforme estándar, mediante las semisumas $A=(X+Y)/2$ y $B=(X+Z)/2$ .....	251
<b>Figura 7.1.</b> Posibles situaciones en el cálculo del tiempo teórico de recorrido de un tramo entre paradas o estaciones consecutivas: a) $\Delta s > \Delta s_{lim}$ ; b) $\Delta s < \Delta s_{lim}$ ; c) $\Delta s = \Delta s_{lim}$ .....	318
<b>Figura 7.2.</b> Variación del tiempo teórico de recorrido (en condiciones ideales) de un tramo entre paradas o estaciones con la longitud de dicho tramo, para diversos valores de máxima velocidad programada u objetivo y cuantías fijas de aceleración y deceleración .....	322
<b>Figura 7.3.</b> Variación de la velocidad media (teórica o en condiciones ideales) de recorrido de un tramo en función de la longitud del mismo, para diversos valores de máxima velocidad programada u objetivo y cuantías fijas de aceleración y deceleración .....	323
<b>Figura 8.1.</b> Cálculo de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda .....	359
<b>Figura 8.2.</b> Ejemplo de cálculo de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda en función del volumen horario de pasajeros en dicha sección y de la capacidad estática por vehículo o unidad de transporte, dado un intervalo fijo entre vehículos .....	360

<b>Figura 8.3.</b> Ejemplo de comparación entre la densidad de pasajeros de pie media a lo largo de la línea (con diferentes valores del coeficiente $\delta$ ) y en la sección de máxima demanda, en función del volumen horario de pasajeros (en la S.M.D.) y con un intervalo fijo entre vehículos .....	363
<b>Figura 8.4.</b> Ejemplo de cálculo de la densidad de pasajeros de pie media a lo largo de la línea en función del volumen horario de pasajeros en la sección de máxima demanda y del coeficiente de compacidad $\delta$ , dado un intervalo fijo entre vehículos.....	363
<b>Figura 8.5.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los incrementos en el tiempo medio por movimiento de entrada o salida de usuario del transporte público en función de la densidad media de pasajeros de pie a lo largo de la línea .....	371
<b>Figura 8.6.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto en función del ratio Volumen/Capacidad del vial de circulación .....	377
<b>Figura 8.7.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del coeficiente de mayoración del tiempo teórico o ideal de recorrido de los sistemas con plataforma reservada en función del intervalo entre vehículos o unidades de transporte público .....	384
<b>Figura 8.8.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación de la capacidad de las paradas en función del cociente $h/H_{min}$ entre el intervalo provisto o programado y el intervalo mínimo de diseño.....	389
<b>Figura 8.9.</b> Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y $\delta=0.50$ .....	405
<b>Figura 8.10.</b> Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y $\delta=0.65$ .....	405
<b>Figura 8.11.</b> Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y $\delta=0.80$ .....	406
<b>Figura 8.12.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los multiplicadores parciales del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público en función de la densidad de pasajeros de pie experimentada por los viajeros afectados .....	417
<b>Figura 8.13.</b> Ejemplo de los rangos de variación del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por congestión de pasajeros en función del volumen horario de usuarios en la sección de máxima demanda, dado un intervalo fijo entre vehículos y $\delta=0.60$ .....	418
<b>Figura 8.14.</b> Ejemplo de cálculo de la media o esperanza matemática del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por congestión de pasajeros en función del volumen horario de usuarios en la sección de máxima demanda y del coeficiente de compacidad $\delta$ , dado un intervalo fijo entre vehículos .....	419
<b>Figura 8.15.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de espera en parada o estación para los usuarios del transporte público en función del intervalo entre vehículos o unidades de transporte .....	425
<b>Figura 8.16.</b> Ejemplo ilustrativo de la función de densidad de probabilidad (definida por subdominios) de las desviaciones entre las horas observadas de partida real desde las estaciones o paradas y el respectivo horario previsto o programado .....	431
<b>Figura 8.17.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso en autobús convencional en tráfico mixto en función del índice combinado de utilización de las capacidades del vial de circulación y de la línea de transporte público .....	438
<b>Figura 8.18.</b> Moda del tiempo de retraso medio en autobús convencional en función del ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto y del cociente entre el intervalo mínimo de diseño y el intervalo de operación provisto o programado .....	438

<b>Figura 8.19.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica en función de la diferencia $h-H_{min}$ entre el intervalo provisto o programado y el intervalo mínimo de diseño.....	443
<b>Figura 8.20.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de proporcionalidad del incremento del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria, en función del ratio Volumen/Capacidad del vial de circulación .....	452
<b>Figura 8.21.</b> Ejemplo de evaluación de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado, en función de la velocidad promedio de trayecto (con una distancia recorrida de 6 km y una velocidad media en ausencia de tráfico de 40 km/h).....	459
<b>Figura 8.22.</b> Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible (en el año base) para automóviles diésel, para automóviles de gasolina y para motos y ciclomotores, en función de la velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado .....	471
<b>Figura 8.23.</b> Ejemplo genérico del cálculo del cambio o variación en el excedente de los viajeros (excedente del consumidor) para un modo de transporte.....	514
<b>Figura 9.1.</b> Representación esquematizada de la línea de transporte público objeto de análisis .....	520
<b>Figura 9.2.</b> Distancia media recorrida a bordo del vehículo de transporte público por los pasajeros que hacen uso de la línea analizada, en cada período horario y para cada sentido de viaje .....	538
<b>Figura 9.3.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la distancia media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado: a) Caso $j=1, k=1$ ; b) Caso $j=2, k=2$ .....	539
<b>Figura 9.4.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coste unitario promedio del tiempo de viaje en el vehículo para el conjunto de usuarios del transporte público y para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	540
<b>Figura 9.5.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coste unitario promedio del tiempo de viaje en el vehículo para el conjunto de usuarios del transporte público y para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	540
<b>Figura 9.6.</b> Representaciones gráficas concernientes a la distribución estadística conjunta de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1': a) Histogramas de frecuencias relativas; b) Diagrama de dispersión bivariente .....	541
<b>Figura 9.7.</b> Representaciones gráficas concernientes a la distribución estadística conjunta de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2': a) Histogramas de frecuencias relativas; b) Diagrama de dispersión bivariente .....	542
<b>Figura 9.8.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media de operación de los modos de transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	544
<b>Figura 9.9.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media de operación de los modos de transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	544
<b>Figura 9.10.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media de operación de los modos de transporte público de capacidad intermedia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R' (metro ligero / tranvía); b) Escenario 'B' (BHLS/BRT) .....	546
<b>Figura 9.11.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia entre la velocidad de operación del transporte público y la velocidad de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	547
<b>Figura 9.12.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia entre la velocidad de operación del transporte público y la velocidad de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	547

<b>Figura 9.13.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	549
<b>Figura 9.14.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	550
<b>Figura 9.15.</b> Histogramas (discretos) de frecuencias relativas del intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’ (metro ligero / tranvía); b) Escenario ‘B’ (BHLS/BRT) .....	551
<b>Figura 9.16.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	552
<b>Figura 9.17.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	552
<b>Figura 9.18.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	554
<b>Figura 9.19.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	554
<b>Figura 9.20.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’ (metro ligero / tranvía); b) Escenario ‘B’ (BHLS/BRT) .....	556
<b>Figura 9.21.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	556
<b>Figura 9.22.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	557
<b>Figura 9.23.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’ (metro ligero / tranvía); b) Escenario ‘B’ (BHLS/BRT) .....	558
<b>Figura 9.24.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	559
<b>Figura 9.25.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	559
<b>Figura 9.26.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	561
<b>Figura 9.27.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	561
<b>Figura 9.28.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo de retraso medio en los modos de transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	563

<b>Figura 9.29.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo de retraso medio en los modos de transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	563
<b>Figura 9.30.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de tráfico mixto cuantificado en automóviles ligeros equivalentes y de su correspondiente ratio Volumen/Capacidad, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	565
<b>Figura 9.31.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de tráfico mixto cuantificado en automóviles ligeros equivalentes y de su correspondiente ratio Volumen/Capacidad, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	565
<b>Figura 9.32.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	567
<b>Figura 9.33.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	567
<b>Figura 9.34.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	568
<b>Figura 9.35.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	569
<b>Figura 9.36.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	569
<b>Figura 9.37.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	570
<b>Figura 9.38.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	571
<b>Figura 9.39.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	572
<b>Figura 9.40.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	572
<b>Figura 9.41.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles diésel, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	574
<b>Figura 9.42.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles diésel, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	574
<b>Figura 9.43.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles de gasolina, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	575
<b>Figura 9.44.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles de gasolina, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	576

<b>Figura 9.45.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en motos y ciclomotores de gasolina, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’.....	577
<b>Figura 9.46.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en motos y ciclomotores de gasolina, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’.....	577
<b>Figura 9.47.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	579
<b>Figura 9.48.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	580
<b>Figura 9.49.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’; b) Escenario ‘B’ .....	581
<b>Figura 9.50.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en automóvil particular, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	581
<b>Figura 9.51.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en automóvil particular, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	582
<b>Figura 9.52.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en moto o ciclomotor, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	583
<b>Figura 9.53.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en moto o ciclomotor, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	583
<b>Figura 9.54.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’.....	585
<b>Figura 9.55.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	585
<b>Figura 9.56.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	587
<b>Figura 9.57.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’ .....	587
<b>Figura 9.58.</b> Histogramas de frecuencias relativas del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’; b) Escenario ‘B’ .....	589
<b>Figura 9.59.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en automóvil particular, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ .....	589

<b>Figura 9.60.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	590
<b>Figura 9.61.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	591
<b>Figura 9.62.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	592
<b>Figura 9.63.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	593
<b>Figura 9.64.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	594
<b>Figura 9.65.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	595
<b>Figura 9.66.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	595
<b>Figura 9.67.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	596
<b>Figura 9.68.</b> Histogramas de frecuencias relativas del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	597
<b>Figura 9.69.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de la opción de transporte público en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	599
<b>Figura 9.70.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de la opción de transporte público en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	599
<b>Figura 9.71.</b> Histogramas de frecuencias relativas de la cuota de la opción de transporte público en el reparto modal general, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	600
<b>Figura 9.72.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas del automóvil particular en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	601
<b>Figura 9.73.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas del automóvil particular en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	601
<b>Figura 9.74.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	603
<b>Figura 9.75.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	603

<b>Figura 9.76.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	605
<b>Figura 9.77.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	606
<b>Figura 9.78.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes a pie en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' .....	607
<b>Figura 9.79.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes a pie en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' .....	609
<b>Figura 9.80.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen anual de viajes (pasajeros) en la línea de transporte público .....	610
<b>Figura 9.81.</b> Histogramas de frecuencias relativas del volumen anual de viajes (pasajeros) en la línea de transporte público, en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	612
<b>Figura 9.82.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad de ciclo en la operación de la línea de transporte público, para el caso del período horario '1' .....	612
<b>Figura 9.83.</b> Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad de ciclo en la operación de la línea de transporte público, para el caso del período horario '2' .....	613
<b>Figura 9.84.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del número de vehículos o unidades de transporte, de cada tipo, necesarias en la composición de la flota o parque para la explotación de la línea de transporte público.....	615
<b>Figura 9.85.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros generado cada año por los nuevos escenarios en relación con el escenario de referencia, para el conjunto de usuarios de todas las opciones modales.....	616
<b>Figura 9.86.</b> Histogramas de frecuencias relativas del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros generado en el año '20' por los nuevos escenarios en relación con el escenario de referencia, para el conjunto de usuarios de todas las opciones modales: a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' .....	618
<b>Figura 9.87.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en transporte público, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia .....	619
<b>Figura 9.88.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en automóvil particular, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia .....	619
<b>Figura 9.89.</b> Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en moto o ciclomotor, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia .....	620
<b>Figura 9.90.</b> Parámetros estadísticos representativos del valor actualizado de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' (en comparación con el escenario de referencia) durante todo el horizonte o período de evaluación, en función de los posibles valores de la tasa social de descuento.....	623



**Figura 9.91.** Histogramas de frecuencias relativas del valor actualizado de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' (en comparación con el escenario de referencia) durante todo el horizonte o período de evaluación, para una tasa social de descuento del 3.5%: a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B' ..... 625



# 1. Introducción

## 1.1. CONTEXTUALIZACIÓN

### 1.1.1. Panorama y retos de la movilidad urbana y metropolitana en el marco del desarrollo sostenible

Uno de los retos más desafiantes a los que deben hacer frente las ciudades y áreas metropolitanas de nuestra era consiste en satisfacer las necesidades de movilidad de la población residente y de sus potenciales visitantes dentro de un triple marco de eficiencia económica, bienestar social y protección ambiental. No en vano, estos tres ámbitos (económico, social y ambiental) constituyen, de acuerdo con la ‘Estrategia Española de Movilidad Sostenible’ (MFOM y MARM, 2009), las tres facetas del concepto de sostenibilidad<sup>1</sup>. A su vez, estas tres vertientes se concretan en los siguientes objetivos básicos, tal como los define la propia ‘Estrategia Española de Movilidad Sostenible’ (MFOM y MARM, 2009: p. 18):

- *“económico: satisfacer de forma eficiente las necesidades de movilidad derivadas de las actividades económicas, promoviendo de esta forma el desarrollo y la competitividad;*
- *social: proporcionar unas adecuadas condiciones de accesibilidad de los ciudadanos a los mercados de trabajo, bienes y servicios, favoreciendo la equidad social y territorial; y los modos de transporte más saludables;*
- *ambiental: contribuir a la protección del medio ambiente y la salud de los ciudadanos, reduciendo los impactos ambientales del transporte, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y optimizando el uso de los recursos no renovables, especialmente los energéticos.”*

Estos objetivos marcados por la ‘Estrategia Española de Movilidad Sostenible’ están llamados a desarrollarse a través de varias áreas de actuación interconectadas entre sí (MFOM y MARM, 2009: pp. 18-19): planificación del transporte y sus infraestructuras en relación con el territorio, lucha contra el cambio climático y disminución de la dependencia energética, mejora de la calidad del aire y reducción del ruido, mejora de la seguridad y salud, y gestión de la demanda. Como directrices generales de actuación se apuesta por el fomento del transporte público y del no motorizado, por la intermodalidad y por el desarrollo de la movilidad mediante programas de cooperación entre las distintas administraciones públicas competentes (MFOM y MARM, 2009: p. 20).

Profundizando en la visión que de la movilidad urbana se tiene desde el marco institucional, pero ya en el extenso ámbito de la Unión Europea (UE), el Libro Verde ‘Hacia una Nueva Cultura de la Movilidad Urbana’ (European Commission, 2007) apuntaba en su momento que “la movilidad urbana debe facilitar el desarrollo económico de las ciudades, la calidad de vida de sus habitantes y la protección de su medio ambiente” (European Commission, 2007: p. 6), lo cual remite de nuevo a la triple dimensión económica, social y ambiental. Se identificaban al respecto los principales problemas existentes y, en consecuencia,

---

<sup>1</sup> De un modo más general, y de acuerdo a la clásica definición original del “Informe Brundtland” (UN-WCED, 1987), la sostenibilidad o desarrollo sostenible consiste en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para atender sus propias necesidades. Se trata por tanto de aplicar aquellas políticas y poner en práctica aquellos modos de vida que podrían ser mantenidos en el tiempo de forma continuada e indefinida.

se planteaban como retos cardinales la transición hacia ciudades con una circulación más fluida, más ecológicas o 'verdes', y con unos sistemas de transporte urbano más inteligentes, más accesibles, y más seguros y protegidos. Por su parte, el Libro Blanco *'Hoja de Ruta hacia un Espacio Único Europeo de Transporte: Por una Política de Transportes Competitiva y Sostenible'* (European Commission, 2011) manifestaba de forma general, con respecto a las potenciales inversiones en infraestructuras de transporte, que *"el cambio (proyecto de inversión) ha de ser planificado de forma que se maximice el impacto positivo en el crecimiento económico y se minimice el impacto negativo en el medio ambiente"* (European Commission, 2011: p. 4). En esta misma línea se señalaba que *"el objetivo principal de la política de transporte europea es contribuir a establecer un sistema que sustente el progreso económico europeo, mejore la competitividad y ofrezca servicios de movilidad de gran calidad, utilizando al mismo tiempo los recursos de forma más eficiente"* (European Commission, 2011: pp. 5-6).

En 2013, la Comunicación *'Together towards competitive and resource-efficient urban mobility'* (European Commission, 2013), que es parte del denominado *'Urban Mobility Package'*, destacaba entre otros aspectos el potencial de los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS/SUMP) para abordar de manera integrada y estratégica los problemas y retos afrontados por cada área urbana en relación con el transporte urbano y metropolitano, al tiempo que se indicaba que estos planes también pueden ayudar a las ciudades a hacer un uso más eficiente de los servicios e infraestructuras de transporte existentes, así como a desenvolver medidas de movilidad urbana que resulten positivas en términos de coste-efectividad. En este sentido, se alentaba a los Estados miembros a promover esmeradas evaluaciones del rendimiento presente y futuro de los sistemas de transporte urbano de sus ciudades y áreas metropolitanas (European Commission, 2013: p. 4). Además, en sus conclusiones, se remarcaba la necesidad de que la movilidad urbana continúe siendo un tema prominente en la agenda política europea (European Commission, 2013: p. 12).

Más recientemente, la Comisión Europea en su documento *'European Urban Mobility: Policy Context'* (European Commission, 2017) destaca el papel de las ciudades como 'motor' del crecimiento económico, el empleo, el conocimiento y la innovación (en torno al 85% del PIB de la UE se genera en las ciudades), a la vez que identifica las principales tendencias, problemas y retos en el campo de la movilidad urbana<sup>2</sup>. En este sentido se señala que *"las ciudades europeas afrontan el reto de cómo mejorar la movilidad, asegurar la accesibilidad, y crear sistemas de transporte de alta calidad y eficiencia al mismo tiempo que se reduzca la congestión, la polución y los accidentes"* (European Commission, 2017: p. 6). Así, se indica por ejemplo que el coste económico total de la congestión en Europa se sitúa alrededor de los 130,000 millones de euros anuales, lo que representa algo más del 1% del PIB de la UE (European Commission, 2017: p. 7). En el plano social se destaca la importancia de la accesibilidad a los bienes, servicios y actividades como condición necesaria para la participación ciudadana en los procesos económicos, sociales y políticos, así como para promover la inclusión social (European Commission, 2017: p. 8). En relación con la accidentalidad en el tráfico urbano de las ciudades europeas, cabe destacar que el 67% de los accidentes de circulación se producen en áreas urbanas, causando aproximadamente un 38% de las víctimas mortales, lo que supuso unos 9,700 fallecimientos en 2015. Además, la mitad de las víctimas mortales en accidentes urbanos corresponden a usuarios del viario público especialmente vulnerables como peatones y ciclistas (European Commission, 2017: p. 9). En materia medioambiental, se enfatiza la elevada incidencia que el sector del transporte tiene sobre la calidad del aire, sobre los niveles de ruido, sobre el consumo de energía y sobre la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En relación con la calidad del aire (European Commission, 2017: pp. 10-11), el sector del transporte en su conjunto es responsable del 46% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) totales de la Unión Europea, así como del 13% y 15% de las

---

<sup>2</sup> En la documentación de la Comisión Europea (sobre movilidad) revisada, probablemente se echan de menos menciones más explícitas a los problemas y retos relativos a la compleja compatibilización entre las diversas funciones a las que ha de servir el espacio público urbano, en la medida en que este debe ser tratado no solo como soporte físico para la circulación de diferentes tipos de vehículos, sino también como lugar para la estancia, el esparcimiento, el paseo a pie, etc.

emisiones primarias totales de PM10 (materia particulada en suspensión de diámetro inferior a 10  $\mu\text{m}$ ) y de PM2.5 (materia particulada en suspensión de diámetro inferior a 2.5  $\mu\text{m}$ ), respectivamente (datos de 2014). En este sentido, se señala al dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y a la materia particulada en suspensión, junto con el ozono a nivel del suelo, como los tres contaminantes atmosféricos que afectan de forma más significativa a la salud humana<sup>3</sup>. A pesar de que los niveles de emisiones totales de algunos de estos contaminantes han descendido en las últimas décadas, se estima que entre el 10% y el 20% de la población urbana europea está expuesta a concentraciones de materia particulada, de  $\text{NO}_2$  o de ozono a nivel del suelo que superan los valores límite o valores objetivo marcados por la Directiva 2008/50/EC. En cuanto a la contaminación acústica (European Commission, 2017: pp. 11-12), se calcula que los costes externos del ruido en la Unión Europea —asociados fundamentalmente a sus efectos negativos sobre la salud— ascienden a no menos del 0.35% de su Producto Interior Bruto (es decir, unos 40,000 millones de euros al año), estando generados principalmente por el tráfico rodado. Al respecto, se estima que más de 100 millones de personas residentes en áreas urbanas de más de 100,000 habitantes están expuestas a niveles medios de ruido por encima del valor objetivo (55 dB  $L_{\text{den}}$ <sup>4</sup>). En materia de consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono (European Commission, 2017: pp. 12-13), se relacionan directamente estos dos efectos negativos del transporte urbano con la circulación de vehículos motorizados. Por lo que respecta al consumo energético del sector transportes en su conjunto (viajeros y mercancías), se señala que este se venía incrementado constantemente en la Unión Europea en el período entre 1990 y 2007. No obstante, se apunta que a partir de 2007 el consumo energético ligado al transporte comenzó a experimentar una sensible disminución. Sin embargo, no toda esta reducción se debe a las deseables mejoras en la eficiencia energética, sino que la mengua de actividad causada por la crisis económica (caída del tráfico de mercancías y estabilización del de viajeros) es responsable de en torno al 40% de la disminución en el consumo energético del transporte. En cuanto a la producción de dióxido de carbono, a pesar de que las emisiones debidas a la circulación de automóviles han decrecido a lo largo de este siglo (principalmente gracias a la reducción de emisiones por kilómetro en los nuevos modelos de automóviles), la proporción de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  que es debida al sector transportes se ha incrementado en las últimas décadas, pasando del 32% en 1990 al 43% en 2012 (en realidad este incremento se relaciona en buena medida con el transporte de mercancías y con la aviación comercial). Así pues, aunque se puedan reconocer algunos avances en esta materia, es evidente que la ambiciosa meta de haber reducido en 2050 las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al sector del transporte en un 60% con respecto a los niveles de 1990 (European Commission, 2011: pp. 3-4; European Commission, 2016: p. 2) exige intensificar la aplicación de medidas al respecto en todos los posibles ámbitos de actuación vinculados al transporte<sup>5</sup>, incluida por supuesto la movilidad urbana y metropolitana, ya que las áreas urbanas son responsables de casi una cuarta parte de las emisiones de  $\text{CO}_2$  originadas por el transporte (European Commission, 2011: p. 9; European Commission, 2013: p. 1). En último término, esta meta referida al sector del transporte forma parte de un objetivo general más amplio de la Unión Europea consistente en que la reducción de emisiones totales de gases de efecto invernadero a mitad de este siglo se sitúe entre el 80% y el 95% con respecto a las cifras de 1990<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> La lista de sustancias contaminantes emitidas por el tráfico rodado de vehículos motorizados convencionales es extensa, destacando (EMEP/EEA, 2016: p. 3): precursores de ozono ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , compuestos orgánicos volátiles distintos del metano), gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), sustancias acidificantes ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ), materia particulada (PM) incluyendo carbono negro (BC) y carbono orgánico (OC), sustancias carcinogénicas (hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos orgánicos persistentes), sustancias tóxicas (dioxinas y furanos), y metales pesados.

<sup>4</sup>  $L_{\text{den}}$  significa 'day-evening-night noise level', y constituye, en síntesis, un estándar europeo para expresar de forma ponderada el nivel promedio de ruido a lo largo de un día, teniendo en cuenta las potenciales molestias ocasionadas en diferentes períodos horarios (día, atardecer y noche).

<sup>5</sup> En las décadas de 1990s y 2000s se produjo sin embargo un importante incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte, de forma que el objetivo intermedio establecido para 2030 de reducir estas emisiones cerca de un 20% por debajo de su nivel de 2008 supondría todavía que estas se mantendrían un 8% por encima de las cifras de 1990 (European Commission, 2011: pp. 3-4).

<sup>6</sup> En relación con la hipotética factibilidad de este tipo de objetivos, puede citarse que un reciente informe realizado en el Reino Unido (UK's Committee on Climate Change, 2019) estima que para este Estado sería técnicamente viable alcanzar

Ya a nivel global, se debe destacar que los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con horizonte en el año 2030, hacen mención explícita, dentro de su Objetivo 11 (*'Ciudades y comunidades sostenibles'*)<sup>7</sup>, a la problemática del transporte y la movilidad, especialmente en los ámbitos urbano y metropolitano. En particular, la meta 11.2 hace un llamamiento a *"proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos"*, remarcando la necesaria disponibilidad de servicios de transporte público (literalmente se promueve su expansión o ampliación).

Más allá de todo este amplio marco institucional, las propias opiniones de la ciudadanía confirman la trascendencia que la problemática de la movilidad urbana y metropolitana tiene para la sociedad. Así, el Eurobarómetro Especial 406 sobre las actitudes de los europeos hacia la movilidad urbana (DG COMM, 2013) pone de manifiesto que una gran mayoría de los consultados cree que la polución del aire (81%), la congestión viaria (76%), los costes de desplazamiento (74%), los accidentes (73%) y la contaminación acústica (72%) son problemas importantes para las ciudades. Además, se señala que casi cuatro de cada diez europeos manifiestan sufrir problemas cuando viajan por el interior de las ciudades. En este sentido, el 56% de los europeos afirma que un mejor transporte público, junto con un menor precio del mismo, serían las maneras más apropiadas de mejorar los viajes urbanos<sup>8</sup>. Además, los europeos no parecen ser —o al menos no lo eran en 2013— muy optimistas con respecto a la futura evolución del tráfico urbano: solo un 24% opina que mejorará en el futuro, mientras que un 35% piensa que permanecerá más o menos igual y un 37% cree que empeorará. En cualquier caso, estas encuestas también mostraron diferencias muy notables entre los diversos países de la Unión Europea.

En síntesis, puede concluirse que las últimas décadas han servido para introducir, extender y consolidar el concepto de movilidad sostenible tanto entre las instituciones —ya sean locales, nacionales o internacionales— como entre la opinión pública, de forma que todas las administraciones involucradas, así como la mayoría de agentes económicos y colectivos sociales, vienen incorporando desde hace tiempo en su agenda y en su discurso la necesidad de afrontar el conjunto de problemas asociados a la movilidad desde una perspectiva de sostenibilidad económica, social y ambiental. Si bien este creciente interés social e institucional por la sostenibilidad en el transporte constituye un avance enormemente positivo, sería ingenuo ignorar que la transición efectiva hacia un modelo de movilidad sostenible —o al menos más sostenible que el actual— es en la práctica un proceso profundamente complejo y a menudo lento, que se enfrenta además a considerables dificultades, fuertes resistencias y potentes inercias. Pero todavía de mayor calado es el hecho de que las 'fuerzas motrices' y factores condicionantes que, como elementos causales primigenios, determinan o configuran la estructura fundamental de los actuales patrones de movilidad se hallan más allá del ámbito de influencia de las actuaciones que aisladamente puedan ser llevadas a cabo desde el campo de la ingeniería del transporte, desde los planes y políticas de gestión de la movilidad, o incluso —aunque probablemente en menor medida— desde el urbanismo y la ordenación territorial. En resumen, como muy certeramente se advierte en el documento *'La Estrategia Española de Movilidad Sostenible y los Gobiernos Locales'* (FEMP et al., 2010: p.16):

*"La movilidad es una actividad generada o derivada por el modo de vida, por las necesidades humanas, materiales o no, establecidas en un determinado tiempo y espacio. No es posible, por tanto, cambiar significativamente la movilidad sin repensar los factores que la generan."*

Por consiguiente, es fundamental identificar las potencialidades que las actuaciones en materia de movilidad pueden realmente ofrecer, pero también reconocer sus limitaciones y, por descontado, evitar depositar la confianza en supuestas 'soluciones mágicas de movilidad' (los problemas ligados a la

---

en 2050 una meta de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero si se reforzasen, extendiesen y acelerasen significativamente las múltiples políticas necesarias para ello, con un coste previsto anual de entre el 1% y el 2% del Producto Interior Bruto.

<sup>7</sup> <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/> [Último acceso: 22/01/2020]

<sup>8</sup> Sin embargo, solo un 16% de los consultados manifestaba usar el transporte público al menos una vez al día, mientras que un 19% adicional lo utilizaba unas pocas veces a la semana.

movilidad son multifacéticos, y por tanto las posibles soluciones también lo han de ser). En este sentido, y en relación con las oportunidades y limitaciones de las actuaciones de movilidad, el documento anteriormente citado también señala (FEMP *et al.*, 2010: p.16):

*“No siempre existen opciones de movilidad sostenible para satisfacer determinadas demandas que se corresponden con un estilo de vida apoyado en los medios de transporte más insostenibles; ni garantías de encontrar alternativas de movilidad sostenibles en determinados contextos territoriales y urbanísticos fraguados a espaldas de criterios como el de la accesibilidad o la proximidad.*

*En definitiva, no hay soluciones mágicas de movilidad, sino oportunidades para avanzar hacia la movilidad sostenible. Es decir, oportunidades para dar una respuesta sensata a las principales necesidades de desplazamiento de personas y mercancías derivadas del modelo social, territorial y económico vigente.”*

Así pues, los contenidos de esta tesis aspiran en último término a ser una herramienta de ayuda en la identificación y selección de ese tipo de ‘respuesta sensata’ en el ámbito de la movilidad urbana y metropolitana, de modo que se contribuya, cuando menos, a una movilidad racional.

### **1.1.2. El aumento de la población urbana y la expansión metropolitana**

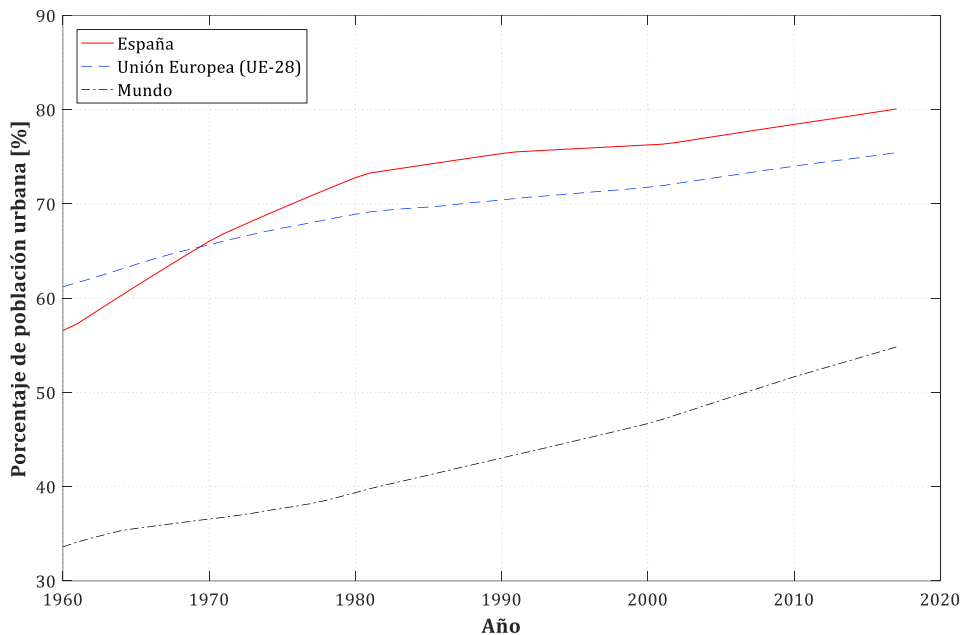
Desde el punto de vista de la geografía humana, los procesos de concentración de población en las ciudades que se vienen desarrollando ya desde tiempos de la Revolución Industrial no hacen más que acrecentar la importancia que las condiciones de movilidad en los ámbitos urbano y metropolitano presentan para el desarrollo de la vida cotidiana de cada vez un mayor número de personas, al mismo tiempo que la expansión acelerada de las aglomeraciones metropolitanas plantea en ocasiones nuevas dificultades añadidas para poder dar cumplimiento a las necesidades de desplazamiento de una manera eficiente (crecimiento urbanístico desordenado o carente de una adecuada consideración de las necesidades de transporte, dispersión y fragmentación urbana o ‘urban sprawl’<sup>9</sup>, dependencia casi exclusiva del automóvil, mayor congestión en el núcleo central de las ciudades, etc.). En referencia a la magnitud de esta tendencia a la aglomeración de población en ciudades y áreas metropolitanas merece la pena apuntar que, según datos de Naciones Unidas recogidos por el Banco Mundial<sup>10</sup>, la proporción de población urbana en el mundo sobre la población total era en 2017 del 54.8%, mientras que en 1960 apenas llegaba a un tercio (33.6%) y en 1990 al 43.0%. Aunque actualmente este fenómeno de concentración urbana se está produciendo con mayor intensidad en los países en desarrollo y las llamadas ‘economías emergentes’, ni el conjunto de países de la Unión Europea ni en particular España han sido en absoluto ajenas a dicha tendencia a lo largo de las últimas décadas. Así, en el caso general de la Unión Europea<sup>11</sup> se ha pasado de un 61.2% de población urbana en 1960 a un 75.4% en 2017, mientras que en el caso particular de España<sup>12</sup> este proceso de concentración en áreas urbanas ha sido todavía más acusado, pasándose de un 56.6% de población urbana en 1960 a un 72.8% en 1980 (período 1960-80 de crecimiento especialmente intenso) y a nada menos que un 80.1% en 2017. Así pues, esta continua y generalizada tendencia a la concentración en áreas urbanas (reflejada gráficamente en la Figura 1.1), así como las consecuencias de dicho fenómeno sobre la vida de las ciudades, instan una vez más a poner el foco sobre la problemática de la movilidad urbana y metropolitana.

<sup>9</sup> Nótese que algunos de estos fenómenos territoriales (como puede ser el caso típicamente del ‘urban sprawl’) en realidad no se deben principalmente al incremento cuantitativo de la población en áreas urbanas y metropolitanas, sino más bien a un proceso de ‘centrifugación’ de las ciudades hacia las nuevas periferias.

<sup>10</sup> <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2017&start=1960&view=chart> [Último acceso: 22/01/2020]

<sup>11</sup> <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2017&locations=EU&start=1960&view=chart> [Último acceso: 22/01/2020]

<sup>12</sup> <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2017&locations=ES&start=1960&view=chart> [Último acceso: 22/01/2020]



**Figura 1.1.** Evolución del porcentaje de población urbana en España, en los países de la Unión Europea y en el mundo durante el período 1960-2017.

Datos: Banco Mundial (a partir de Naciones Unidas, Perspectivas de la urbanización mundial).

### 1.1.3. La movilidad urbana en un escenario dinámico y cambiante

El escenario de la movilidad —y especialmente en lo relativo a la movilidad urbana— se ha revelado en los últimos años como un entorno caracterizado por su gran dinamismo, en la medida en que los cambios y nuevas tendencias en dicho ámbito surgen y se desarrollan con extraordinaria rapidez. Así, en este entorno cambiante se está asistiendo durante esta última década a fenómenos variados y, a la vez, frecuentemente interrelacionados entre sí, tales como:

- el creciente papel del uso de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en el ámbito de la movilidad, no solo en lo concerniente a los prestadores de los servicios (a través de Sistemas Inteligentes de Transporte o ITS), sino también —y probablemente más trascendente— desde el punto de vista de los viajeros y usuarios;
- en relación con el ítem anterior, mayor disponibilidad de datos relativos a las características y necesidades de movilidad de los viajeros, así como una mayor capacidad de tratamiento y análisis de dichos datos (tendencia a la explotación de *'big-data'*);
- también en conexión con los dos puntos anteriores, tendencia a la gestión de la movilidad en tiempo real, lo cual entronca, en este campo, con conceptos como el de *'smart cities'*<sup>13</sup>;
- desarrollo de plataformas de *carpooling* (viaje compartido en automóvil privado) y de *carsharing* (uso temporal, para un viaje particular, de vehículos cuya propiedad no corresponde al usuario, pudiendo pertenecer a una empresa privada o pública o a una asociación colectiva de usuarios), así como de plataformas de contratación de vehículos de transporte concertado con conductor (VTC) en contraposición a los servicios de taxi tradicional;

<sup>13</sup> En contraposición al concepto de *'smart cities'* (acusado en ocasiones de estar excesivamente orientado a la mera aplicación de desarrollos tecnológicos) ha surgido en los últimos años un nuevo tipo de paradigma, bajo la denominación de *'wise cities'*, que propugna ciudades más centradas en la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, incluyendo su bienestar subjetivo y dando más relevancia a criterios tales como los de sostenibilidad, resiliencia, participación e inclusividad.



- tendencia al desarrollo del concepto de movilidad como servicio (MaaS, o *'Mobility as a Service'*), con una mayor orientación hacia las necesidades particulares de cada viajero, combinando distintas opciones de movilidad (tanto de transporte público como de movilidad compartida o personal) e integrando las funciones de planificación, reserva, emisión de billetes y forma de pago, de manera que se proporcione al viajero un servicio puerta a puerta y sin interrupciones (a pesar de que sea llevado a cabo por diferentes proveedores);
- irrupción en el espacio público urbano de pequeños nuevos vehículos de movilidad personal o *'micromovilidad'* (tales como el patinete eléctrico como caso más representativo) en adición a otros más habituales como la bicicleta, cuya utilización como medio de transporte se trata de fomentar, surgiendo potenciales fricciones tanto con el tráfico de automóviles como con el tránsito peatonal;
- tendencia a la electrificación de los vehículos motorizados (aunque todavía incipiente en el caso de los automóviles particulares);
- surgimiento de nuevos retos y oportunidades en previsión del emergente desarrollo de los vehículos con conducción autónoma (relación con las aplicaciones de la inteligencia artificial);
- relativa disminución del interés de las generaciones más jóvenes —al menos en las grandes ciudades— por la posesión de automóvil particular y por la disponibilidad de permiso de conducción.

Aunque la lista anterior no pretende ser plenamente exhaustiva, pone de manifiesto que la movilidad actual se desarrolla en un entorno vivo, afectado por toda una serie de transformaciones tecnológicas, cambios sociales y demográficos, modificaciones de los patrones de consumo y de los tipos de relaciones laborales, etc. Este contexto tan dinámico y propenso al cambio contribuye a esbozar, de cara a la previsión y planificación de cómo se desarrollará la movilidad en un futuro, un panorama marcado por múltiples e importantes incertidumbres, añadidas a las propias de cualquier proceso de naturaleza predictiva.

#### **1.1.4. La indispensabilidad del transporte público colectivo en ciudades y áreas metropolitanas**

A pesar de las transformaciones e incertezas apuntadas en el epígrafe 1.1.3, no hay duda de que el sistema de transporte público colectivo va a seguir estando llamado a desempeñar un papel primordial en el reto de dar respuesta a las necesidades de movilidad de las ciudades y áreas metropolitanas, siendo su contribución necesaria y decisiva para poder avanzar hacia los objetivos de movilidad sostenible en sus dimensiones económica, social y ambiental. Así se destacaba por ejemplo por parte de la Comisión Europea en su Comunicación *'Action Plan on Urban Mobility'* (European Commission, 2009), donde se señalaba que *"un transporte público de alta calidad y asequible es la columna vertebral de un sistema de transporte urbano sostenible. Fiabilidad, información, seguridad y facilidad de acceso son vitales para que los servicios de autobús, metro, tranvía y trolebús, ferrocarril y navegación (ferries) resulten atractivos"* (European Commission, 2009: p. 5).

El transporte público colectivo constituye, en la mayoría de los casos, la alternativa más realista al uso masivo del automóvil particular, siendo fundamental para contrarrestar la situación de primacía de este último que se vive en ciudades y áreas metropolitanas. En este sentido, el transporte público representa generalmente la opción más eficaz y polivalente para atraer y captar a los actuales usuarios de automóviles particulares, ya que se suele aducir que otros modos alternativos (modos activos o no motorizados, pequeños vehículos eléctricos de movilidad personal, etc.) son habitualmente más proclives a trasvasar usuarios entre sí, o bien a captar viajeros del propio transporte público. Además, este tipo de modos, aunque ideales en cuanto a sus muy bajos costes externos, tienen por norma general un campo de acción relativamente limitado, considerándose apropiados para desplazamientos en distancias cortas o, como mucho, medio-bajas. En cambio, su uso como modo principal del viaje pierde

atractivo a medida que se incrementa la distancia de desplazamiento<sup>14</sup>. Sin embargo, un sistema de transporte público urbano y metropolitano eficaz y correctamente diseñado y gestionado puede ser altamente competitivo para un muy amplio rango de distancias de viaje. Por otra parte, el uso de esta clase de modos alternativos puede resultar problemático —cuando no inviable— para personas de edad avanzada o con problemas físicos, personas con movilidad reducida, etc., mientras que el transporte público ha de responder hoy en día a la inexcusable exigencia de ser totalmente inclusivo.

Evidentemente toda esta serie de diferenciaciones en relación con la mayor polivalencia del sistema de transporte público para dar respuesta válida a las necesidades de movilidad de espectros más amplios de la población no supone que ambas clases de modos (transporte público colectivo y modos alternativos de movilidad personal, incluyendo el viaje a pie) sean opciones contrapuestas o antagonistas, sino que simplemente cada uno tiene su campo de acción más adecuado. De hecho, la complementariedad entre ambas clases de modos es generalmente imprescindible para que el transporte público permita completar viajes puerta a puerta según las necesidades particulares de los usuarios. Así pues, la utilización del transporte público también fomenta indirectamente el uso de modos activos o no motorizados como el desplazamiento a pie, la bicicleta, etc. (etapas de acceso al transporte público y de dispersión hacia el destino final del viaje).

Por otra parte, en comparación con el uso del vehículo motorizado privado (en especial con el automóvil particular), es bien conocido que, a nivel general, el sistema de transporte público colectivo genera por viajero transportado una mucho menor contaminación atmosférica local y una reducida emisión de gases de efecto invernadero inductores del cambio climático, así como un menor consumo de recursos energéticos (al menos siempre que se mantengan unas tasas de ocupación mínimamente razonables). En relación con estas cuestiones, cabe destacar adicionalmente que la implantación de vehículos movidos mediante fuentes secundarias de energía alternativas a los combustibles convencionales (tales como energía eléctrica en exclusiva o en hibridación, combustibles ‘semilimpios’ o de bajas emisiones, etc.) está mucho más extendida entre los sistemas de transporte público (especialmente en los de tipo ferroviario urbano, totalmente electrificados) que entre el actual parque de automóviles particulares.

Pero además de estos aspectos que son habitualmente los más interiorizados por el común de la población, no debe pasarse por alto que el transporte público realiza una ocupación muchísimo más eficiente que el automóvil particular tanto del espacio viario existente (menor congestión) como del espacio público urbano en general (mayor espacio disponible para usos ciudadanos relacionados con el esparcimiento, la estancia, el paseo a pie o en bicicleta, etc.)<sup>15</sup>, redundando —junto con la mejora de la calidad del aire y la disminución de los niveles de ruido— en una mejora integral del ambiente urbano. Además, las tasas de accidentalidad por viajero-kilómetro son mucho menores en los sistemas de transporte público que en el tráfico de automóviles particulares<sup>16</sup>, con la consiguiente reducción de los costes personales y económicos asociados a los accidentes de circulación.

No menos trascendentes son los aspectos sociales ligados a la disponibilidad del sistema de transporte público como garantía de accesibilidad de todos los segmentos de población a bienes y servicios, a centros de empleo, de formación educativa y de sanidad, a actividades de ocio, etc., favoreciendo de esta forma la autonomía personal de todos los individuos, la equidad a través de la igualdad de oportunidades y, en último término, la cohesión social.

---

<sup>14</sup> También condiciones meteorológicas adversas pueden restar atractivo y afectar negativamente al uso de este grupo de modos alternativos (modos no motorizados o activos, pequeños vehículos eléctricos de movilidad personal, etc.).

<sup>15</sup> Recuérdese en todo caso que el desarrollo e hipotética generalización del automóvil eléctrico, por sí sola, no solventa en absoluto ni los problemas de congestión ni el conjunto de inconvenientes asociados a la alta ocupación de espacio público de los automóviles particulares.

<sup>16</sup> Según datos de la Unión Europea, a comienzos del siglo XXI el número de fallecidos en accidentes de transporte por cada 100 millones de viajeros-km era de 13.8 para motos y ciclomotores, de 0.7 para automóviles, de 0.07 para autobuses y autocares, y de 0.035 para el transporte ferroviario (ETSC, 2003: p. 12).

En conclusión, por una parte el sistema de transporte público colectivo desempeña un papel sistémico en el normal funcionamiento de nuestras ciudades y áreas metropolitanas, hasta el punto que cualquier hipotética degradación o interrupción de este servicio conllevaría prácticamente el colapso funcional de aquellas. Por otra parte, los servicios de transporte público urbano colectivo son una necesidad básica esencial, y un elemento más —y no de menor importancia— del denominado ‘Estado del bienestar’.

## 1.2. MOTIVACIÓN

### 1.2.1. Los modos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia: metro ligero o tranvía moderno y sistemas de autobuses semirrápidos o de alto nivel de servicio

En relación con la provisión de servicios de transporte público colectivo para poder dar respuesta a las necesidades de movilidad de ciudades y áreas metropolitanas bajo criterios de eficiencia y sostenibilidad, no es infrecuente encontrarse con corredores, ejes o itinerarios que, atendiendo a las relaciones origen-destino que se desarrollan en su área de influencia, aglutinen volúmenes intermedios de demanda de viajes. En este sentido, se deben entender como volúmenes intermedios de demanda de transporte público aquellos para los que los servicios convencionales de autobús en tráfico mixto (sin plataforma reservada ni carril-bus) comenzarían a evidenciarse como incapaces de atender de manera adecuada (es decir, manteniendo unas prestaciones y nivel de servicio que permitan al transporte público resultar suficientemente atractivo y competitivo) el volumen de pasajeros que potencialmente podría alcanzarse, al mismo tiempo que dichos volúmenes resultan manifiestamente insuficientes para justificar la implantación de sistemas de transporte urbano/metropolitano de gran capacidad y con infraestructuras específicas completamente independientes, tales como el metro o el ferrocarril de cercanías, dados los muy altos costes de implantación de estos últimos. A grandes rasgos, puede asumirse que estos corredores, ejes o itinerarios de demanda intermedia de transporte público son más proclives a presentarse en ciudades de tamaño medio (por ejemplo entre 200,000 y 800,000 habitantes), correspondiendo generalmente al principal eje troncal o estructurante de las mismas (en el caso del rango de población medio-bajo) o a un reducido número de ejes troncales (por ejemplo entre dos y cuatro en el caso del rango medio-alto). Sin embargo, también es posible encontrar estos corredores o itinerarios de demanda intermedia de transporte público en relaciones de viaje relativamente importantes (aunque no troncales) de las grandes ciudades y áreas metropolitanas. En cambio, difícilmente se presentarán estos volúmenes de demanda en ciudades de pequeño tamaño (al menos en el ámbito de las ciudades españolas).

Así pues, a la hora de estudiar la implantación de un nuevo modo de transporte público urbano y/o metropolitano sobre estos corredores, ejes o itinerarios de demanda intermedia (generalmente partiendo de una situación previa en la que esos servicios son operados mediante autobús convencional) se presentan ante el planificador un conjunto de opciones o alternativas que, por su adecuación a dichos volúmenes de demanda, pueden agruparse genéricamente bajo el concepto de ‘sistemas de transporte urbano/metropolitano de capacidad intermedia’ (CICCP, 2008: p. 21; Novales *et al.*, 2012; Novales *et al.*, 2014). Aunque es bastante comprometido establecer unas cifras a la que pueda otorgarse una relativa validez general, el campo de acción más razonable para los sistemas de transporte público de capacidad intermedia se movería en la práctica, de manera aproximada, en volúmenes de pasajeros en hora punta que irían desde los 1,200–1,500 viajeros por hora y sentido (prs/h-dir) hasta un límite superior en torno a 5,000–10,000 prs/h-dir (la particularización y concreción de estos límites debe hacerse depender en realidad de muchas otras variables, tal como se pondrá de manifiesto a lo largo del desarrollo del modelo propuesto en esta tesis).

Sin embargo, es preciso señalar que en ocasiones la implantación de alguno de los modos incluidos bajo la denominación de sistemas de capacidad intermedia se plantea no tanto por motivo de la capacidad de transporte de pasajeros requerida, sino más bien como recurso para mejorar la competitividad del

transporte público frente al automóvil particular, ya que, al margen de las cuestiones estrictamente relacionadas con su capacidad, se entiende que estos nuevos modos de transporte público urbano o metropolitano suponen un salto cualitativo muy notable en el nivel de servicio ofrecido a los usuarios del transporte público. Adicionalmente, los planes de implantación de este tipo de modos, dada la magnitud de las obras requeridas, suelen ser aprovechados para incorporar operaciones de regeneración urbana en el viario público afectado, de forma que se unifiquen ambos tipos de actuaciones. Si bien estas operaciones de regeneración urbana pueden tener por sí mismas un impacto muy positivo sobre el ambiente urbano, desde el punto de vista de la evaluación de inversiones posiblemente convendría disociar las dos clases de actuaciones, de modo que se analicen separadamente los costes y beneficios de cada una de ellas en la medida en que resulten factibles como proyectos separables.

Las principales opciones o alternativas que suelen contemplarse cuando se plantea la implantación de un nuevo modo de transporte urbano/metropolitano de capacidad intermedia pueden agruparse en dos grandes clases de sistemas: sistemas basados en ferrocarril ligero urbano y sistemas basados en autobuses semirrápidos, de altas prestaciones o de alto nivel de servicio. Entre los sistemas ferroviarios ligeros se incluyen fundamentalmente el metro ligero y el tranvía moderno (o simplemente 'tranvía'), entendiendo este último en su concepción contemporánea (en contraposición al tranvía 'clásico', que tradicionalmente circulaba en tráfico mixto). Estas dos denominaciones (metro ligero y tranvía), aunque originariamente y en sentido estricto designaban a modos ferroviarios urbanos de características bien diferenciadas, se utilizan hoy en día en España de forma prácticamente intercambiable, especialmente a nivel comercial (CICCP, 2008: p. 28). Por su parte, entre los modos de capacidad intermedia basados en vehículos de tipo autobús se incluiría a los sistemas que, según el ámbito geográfico y las características específicas de cada uno, pueden recibir denominaciones tales como Autobús de Alto Nivel de Servicio (BHLS, *Bus with High Level of Service*) o Autobús de Tránsito Rápido (BRT, *Bus Rapid Transit*)<sup>17</sup>. Genéricamente estos tipos de modos de capacidad intermedia basados en autobuses podrían ser agrupados bajo designaciones tales como 'sistemas de autobuses de altas prestaciones' o 'sistemas de autobuses semirrápidos sobre plataforma reservada', siendo probablemente esta última denominación la que —de forma genérica— mejor definiría a la clase de sistema de autobús de capacidad intermedia que va a ser objeto de análisis en la presente tesis. En relación con estas dos principales clases de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, la Figura 1.2 presenta gráficamente un ejemplo ilustrativo de un modo ferroviario ligero urbano (metro ligero o tranvía moderno) y de un sistema de autobuses semirrápidos sobre plataforma reservada (BHLS o BRT).

Nótese, no obstante, que en el abanico de posibilidades de los sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia existen también algunos modos intermedios o 'híbridos' entre los dos grandes grupos de sistemas (tales como tranvías o metros ligeros sobre neumáticos<sup>18</sup>, autobuses con autoguiado mecánico<sup>19</sup>, etc.), pero debido a su escasa implantación y en ocasiones problemática operación no van a quedar específicamente incluidos dentro del campo de estudio de esta tesis.

---

<sup>17</sup> Al igual que con los modos ferroviarios ligeros, la denominación comúnmente empleada a menudo varía por áreas geográficas e, incluso dentro de un mismo continente o país, no siempre es homogénea, pudiendo diferir la denominación comercial de una posible designación de carácter más técnico. Así, el sistema BRT (*Bus Rapid Transit*), tal como es concebido en gran parte del mundo (principalmente fuera de Europa), corresponde más bien a un modo de alta capacidad, con un elevado nivel de segregación de infraestructuras (sin intersecciones a nivel) y orientado fundamentalmente a desplazar grandes volúmenes de pasajeros. Por su parte, la denominación de BHLS (*Bus with High Level of Service*) debe entenderse en esta tesis como correspondiente a la categoría de 'full BHLS', según la jerarquización empleada por COST Action TU0603 (2011).

<sup>18</sup> Ejemplos de tranvías o metros ligeros sobre neumáticos son el TVR de Bombardier (en operación en Nancy y abandonado en Caen para ser sustituido por un sistema ferroviario urbano convencional) y el Translohr (Rodríguez, 2012), con implantaciones en ciudades como Clermont-Ferrand, Padua, Tianjin, Shanghai, Venecia-Mestre y Medellín, y en la región metropolitana de París.

<sup>19</sup> Algunos ejemplos de sistemas de autobuses con autoguiado serían el Cambridgeshire Guided Busway, una parte del Leigh-Salford-Manchester Bus Rapid Transit (ambos en Inglaterra) y el sistema O-Bahn (Essen y Adelaida).



**Figura 1.2.** Ejemplos de las dos principales clases de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia: a) Tranvía moderno en Montpellier (Francia); b) Sistema de autobuses semirrápidos sobre plataforma reservada (BHL o BRT) en Nantes (Francia).

Fuentes: a) Margarita Novales; b) COST Action TU-0603, Buses with High Level of Service.

Aunque se va a incidir con más detalle sobre los modos incluidos en estos dos principales grupos y sus características en el Capítulo 2, y al margen de ciertas imprecisiones que puedan derivarse de la falta de homogeneidad en las nomenclaturas comúnmente empleadas, conviene anticipar que las características comunes esenciales que van a definir a los modos de transporte público de capacidad intermedia objeto de análisis en esta tesis, ya sean de tipo ferroviario ligero o basados en autobuses semirrápidos o de altas prestaciones, son las siguientes: (i) se trata de modos fundamentalmente en superficie, por tanto con intersecciones a nivel con el tráfico rodado y con otros posibles usuarios de las vías públicas (aunque en algunos casos concretos puedan existir pasos inferiores o elevados, estos han de constituir una excepción); (ii) circulación en plataforma reservada<sup>20</sup> al menos en la gran mayoría de su recorrido, lo cual corresponde a un tipo de sección transversal para el transporte público de categoría B según la clasificación definida por Vuchic (2005: p. 5) o a un entorno operativo de tipo ‘exclusivo’ según la clasificación planteada por el *‘Transit Capacity and Quality of Service Manual’* (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35)<sup>21</sup>; (iii) dotación, en las intersecciones a nivel con el tráfico general, de sistemas de priorización semafórica en favor de la continuidad de circulación del transporte público<sup>22</sup>.

En relación con las posibles alternativas que deberían contemplarse cuando se estudia para un determinado corredor, eje o itinerario la implantación de un nuevo modo de transporte urbano o metropolitano de capacidad intermedia, se ha observado que a lo largo de las últimas décadas (en concreto desde mediados de los años 80s, con la reintroducción del tranvía moderno o metro ligero<sup>23</sup>) se extendió una propensión bastante generalizada (sobre todo en Europa y, en particular, en España) a elegir casi automáticamente —sin considerar apenas otras posibles opciones válidas— modos de tipo

<sup>20</sup> La conveniencia de implantar plataformas reservadas para el transporte público colectivo ya se apuntaba someramente en la *‘Estrategia Española de Movilidad Sostenible’* (MFOM y MARM, 2009: pp. 25-26) y en el *‘Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) 2012-2024’* (MFOM, 2015: p. II-169), si bien en ambos documentos se identificaba este concepto más bien con los carriles-bus y BUS-VAO.

<sup>21</sup> Las clasificaciones por categoría de separación de la sección transversal utilizada por el transporte público en una infraestructura longitudinal de circulación según Vuchic (2005: p. 5) y por clase de entorno operativo de acuerdo al *‘Transit Capacity and Quality of Service Manual’* (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35) se describen posteriormente dentro del epígrafe 2.2.2.2, por lo que, en caso necesario, se remite al lector a dicho epígrafe.

<sup>22</sup> Esta característica también está en línea con una de las medidas de actuación mencionadas en la *‘Estrategia Española de Movilidad Sostenible’* para priorizar el transporte público: “Mejorar la calidad del servicio fomentando la implantación de SIT (Sistemas Inteligentes de Transporte) y otras herramientas de gestión como la regulación semafórica favorable al transporte público” (MFOM y MARM, 2009: pp. 27-28).

<sup>23</sup> La primera ciudad europea que reintrodujo el tranvía moderno o metro ligero tras haber abandonado décadas antes la explotación de tranvías tradicionales fue Nantes (Francia) en 1985. En España, la primera reimplantación de un sistema de metro ligero o tranvía moderno tuvo lugar en Valencia en 1994.

ferroviario urbano (es decir, metro ligero o tranvía moderno). Este sesgo o predisposición hacia la implantación de modos ferroviarios ligeros ha carecido en muchos casos de una adecuada justificación técnica y socioeconómica —en todas las dimensiones de la misma— que demuestre una mayor contribución de dicha opción al bienestar general de la población con respecto a otras posibles alternativas (tales como los sistemas basados en autobuses semirrápidos, de altas prestaciones o de alto nivel de servicio), hasta el punto de que en ocasiones se percibe que la implantación en una determinada ciudad de un modo tranviario o de metro ligero llega a ser concebida por las autoridades locales y por la opinión pública más como un fin en sí mismo que como un medio para dar respuesta, de la forma más eficiente y sostenible posible, a las necesidades de movilidad de la población.

Así pues, la existencia en el ámbito de los sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia de alternativas menos costosas que los modos ferroviarios ligeros, así como la creciente difusión de los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada entre técnicos y otras partes concernidas<sup>24</sup>, han contribuido a que pueda haberse puesto en cuestión la idoneidad de algunas de las implantaciones de metro ligero y tranvía llevadas a cabo en diferentes países durante las últimas décadas. Este hecho afecta de manera especialmente significativa al caso de España, donde se ha observado en demasiadas ocasiones cómo la concurrencia de diversos factores (decisiones de implantar modos ferroviarios ligeros en corredores, ejes o itinerarios con insuficiente potencial de demanda de transporte público, escaladas de costes durante la implementación de los proyectos, retrasos excesivos sobre los plazos de ejecución, carencia de consenso político, casos de falta de colaboración sólida y leal entre distintas administraciones públicas implicadas, etc.) ha conducido a que ciertas implantaciones de líneas de metro ligero y tranvía hayan resultado poco exitosas, dando lugar en bastantes casos a muy serias dudas sobre la rentabilidad socioeconómica de tales inversiones (obsérvense, por ejemplo, las severas críticas efectuadas por Carmona (2015)). Aunque este recurso abusivo y poco justificado a los modos ferroviarios ligeros vivió probablemente su cenit en España durante la década 2000-2010 y el sesgo hacia los modos ferroviarios en detrimento de los sistemas basados en autobuses semirrápidos o en plataforma reservada parece que se está moderando algo en los últimos años (tal vez a raíz de la crisis económica iniciada en 2008 y sus subsiguientes restricciones inversoras), todavía hoy en día sigue siendo imprescindible mejorar notablemente los procedimientos de evaluación y selección de alternativas en materia de sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia, a fin de maximizar el valor real obtenido de la inversión pública (*'value for money'* social).

Evidentemente, la necesaria revisión y cuestionamiento de ciertas decisiones y de sus resultados no significa en absoluto que los modos ferroviarios ligeros no sean una muy buena opción para un amplio rango de situaciones y contextos —como demuestran de hecho las numerosas implantaciones exitosas de metros ligeros y tranvías llevadas a cabo durante décadas en Europa (incluyendo varias en España) y en el resto del mundo—, pero se precisa impedir la utilización infundada o injustificada de dichos sistemas, sustituyéndola por una evaluación y selección mucho más racionalizadas.

A nivel general, no existe un amplio consenso entre la literatura técnica sobre cuál de las dos grandes clases de sistemas (modos ferroviarios ligeros o sistemas basados en autobuses semirrápidos, de altas prestaciones o de alto nivel de servicio) resulta habitualmente una mejor opción (u opción 'dominante') en términos del balance total entre los resultados o beneficios producidos y los costes incurridos, ya que la mayoría de estudios existentes abordan la comparación entre sistemas solo desde ciertos enfoques o facetas no integrales (en muchos casos centrándose mayoritariamente en los costes soportados por los productores del transporte público, como costes de inversión y de operación y mantenimiento). A muy grandes rasgos, suelen aducirse en favor de los sistemas basados en autobuses semirrápidos o en plataforma reservada sus costes de implantación notablemente menores, además de otras ventajas habitualmente menos preponderantes como su mayor aptitud para afrontar trazados con fuertes

---

<sup>24</sup> Por ejemplo, ya en 2007 la Comisión Europea, en su Libro Verde *'Hacia una Nueva Cultura de la Movilidad Urbana'*, se proponía fomentar los sistemas de "autobús rápido" (*bus rapid transit* en la versión en inglés) como alternativa menos costosa que los sistemas de tranvía y metro (European Commission, 2007: p. 15).

rampas y pendientes (gracias al muy superior coeficiente de rozamiento entre neumático y pavimento), sus plazos de construcción y puesta en servicio algo más reducidos, y la mayor escalabilidad y flexibilidad operativa propia de los sistemas basados en autobuses. Por su parte, en favor de los modos ferroviarios ligeros suelen argumentarse —entre otras— las siguientes ventajas: una mayor facilidad intrínseca para atraer a nuevos usuarios al transporte público (en virtud de un hipotético mayor atractivo inherente de los modos ferroviarios para captar a los usuarios habituales de automóvil particular a consecuencia de la mejor imagen de la que tranvías y metros ligeros gozan entre la opinión pública en comparación con los sistemas de autobuses); una mayor capacidad de transporte de viajeros (lo cual no siempre es necesario ni conveniente); un nivel de servicio superior al de los sistemas basados en autobuses semirrápidos o en plataforma reservada (aunque esta cuestión es bastante matizable) y, en consecuencia, un mayor beneficio o satisfacción para los usuarios (como ‘consumidores’ de dicho servicio); una mayor sensación de permanencia del sistema a largo plazo (junto con una mayor vida útil); y un mayor impacto sobre los usos del suelo, materializado en una superior capacidad para promover la transformación o regeneración del ambiente urbano (complementada por la percepción de menores impactos medioambientales negativos durante la operación del sistema)<sup>25</sup>. En este sentido, cabe apuntar que buena parte de las ventajas comúnmente argumentadas como favorables a los modos ferroviarios ligeros han de ser tomadas con ciertas cautelas, puesto que o bien están basadas en percepciones subjetivas que se asumen habitualmente como generalizadas o bien se derivan de características que pueden ser técnicamente trasferibles a los sistemas de autobuses en plataforma reservada.

De todos modos, más allá de las ventajas y desventajas que puedan atribuirse genéricamente a cada una de las dos clases de sistemas, debe tenerse en cuenta ante todo que la apropiada selección de uno u otro tipo de modo para un determinado caso de estudio ha de ser necesariamente tratada como un problema sumamente contextual. Es decir, no es una cuestión que admita una respuesta única y ‘universal’ (de aplicabilidad general), sino que depende en cada caso de factores locales y características particulares o específicas. Así, a la hora de evaluar la mayor conveniencia de uno u otro tipo de opción para una determinada situación en términos de su previsible rendimiento socioeconómico futuro va a ser necesario partir de todo un conjunto de variables particulares relacionadas con aspectos tales como la demanda de transporte (volumen total de viajes, reparto modal, proporción de usuarios cautivos, distancia media de viaje, etc.), las características generales de la línea de transporte público (longitud, número de paradas, etc.), el nivel de congestión de la circulación de automóviles particulares en itinerarios análogos a los de la línea (intensidad, ratios volumen/capacidad, etc.), las características socioeconómicas de los viajeros (valor atribuido al tiempo de viaje, etc.), los criterios aplicables para la configuración de las operaciones del transporte público (frecuencias resultantes, velocidad de operación obtenida, etc.), las posibles características concretas de los vehículos de transporte público de cada tipo de modo (capacidad por unidad, etc.), sin olvidar además las interdependencias que se producen entre los distintos tipos de variables.

Así pues, la presente tesis surge inicialmente de la pretensión de aportar una contribución a la mejora de las técnicas de selección de alternativas en relación con las principales opciones disponibles en el campo de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia (modos ferroviarios ligeros y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada), teniendo en cuenta para ello factores locales, características particulares y condiciones específicas.

---

<sup>25</sup> Una descripción mucho más pormenorizada de las ventajas y desventajas atribuidas a las dos grandes clases de modos de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia puede encontrarse en *español* en Novales *et al.* (2012) y en *inglés* en Novales *et al.* (2014).

### 1.2.2. La necesidad de una evaluación rigurosa de los planes e infraestructuras de transporte

Todo proyecto de inversión —ya sea en materia de transportes o en cualquier otra área— conlleva, en mayor o menor medida, un cambio en el bienestar o prosperidad de la sociedad. Sin embargo, este cambio no siempre resulta necesariamente positivo, incluso aunque el proyecto pueda satisfacer razonablemente bien las necesidades para las que fue concebido. Esta potencial contrariedad se debe a que la implementación de cualquier proyecto de inversión requiere la utilización, consumo o degradación de un determinado conjunto de recursos (capital, recursos naturales, recursos humanos en forma de trabajo, etc.), a lo que hay que añadir que los recursos de los que dispone cualquier sociedad son limitados y sus usos son normalmente excluyentes. Por tanto, la utilización de dichos recursos en un determinado proyecto de inversión implica que esos recursos dejen de estar disponibles para otros posibles usos alternativos (no necesariamente de la misma clase), en los cuales podrían ser capaces de generar un beneficio para la sociedad mayor que en el proyecto de inversión analizado. Surge así el concepto de coste de oportunidad de la inversión, referido al valor potencialmente aportado por los recursos consumidos si estos hubiesen sido empleados en su uso óptimo o mejor uso alternativo (es decir, aquel que proporcionaría un mayor beneficio social).

Lógicamente, para que un proyecto de inversión sea socialmente deseable el cambio en el bienestar o prosperidad que este induce en la sociedad ha de ser de signo positivo, es decir, la valoración que la sociedad asigna a los beneficios producidos por el proyecto debe ser mayor que el coste de los recursos empleados, valorados estos últimos a su coste de oportunidad. Además, para dar respuesta a los objetivos que motivan el planteamiento de una determinada inversión suelen ser posibles diferentes alternativas o planes de actuación, de modo que aquellas alternativas que presenten un mejor balance neto entre beneficios generados y recursos empleados serán en principio preferibles a las demás. En conclusión, se aspira en general a la máxima eficiencia en la asignación de los recursos disponibles (asignación óptima).

Para facilitar esta aspiración general a maximizar el bienestar o prosperidad de la sociedad mediante la eficiencia en la asignación de recursos se hace necesaria la evaluación de proyectos, y, más en particular, la evaluación de naturaleza económica (también llamada alternativamente evaluación socioeconómica o evaluación social, en contraposición a la evaluación financiera<sup>26</sup>), de forma que dicha evaluación constituya una herramienta fundamental de apoyo a la toma de decisiones de inversión pública con respecto a la adecuada selección entre diversos proyectos alternativos. Evidentemente, el ámbito de los planes y proyectos de transporte no es ajeno a esta necesidad. Bien al contrario, las características que generalmente presentan dichos proyectos (requerir a menudo la construcción de infraestructuras muy especializadas con grandes costes de inversión y diseñadas para vidas útiles de muy largo plazo, la imposibilidad o gran dificultad de emplear dichas infraestructuras para algún otro fin distinto de aquellos para los que fueron concebidas dando lugar a elevados ‘costes hundidos’, la habitual existencia de rigideces en la oferta de capacidad de las infraestructuras debido a indivisibilidades y a la necesidad de actuar en grandes bloques, la gran dependencia de los niveles de demanda para alcanzar la rentabilidad de la inversión, la generación de importantes impactos medioambientales tanto durante la construcción como durante el uso de dichas infraestructuras, etc.) hacen que la evaluación de las inversiones en este campo sea especialmente necesaria.

Así pues, a la hora de plantear cualquier actuación destinada a abordar unos objetivos determinados relativos al transporte y/o la movilidad se hace imprescindible la toma en consideración de las diferentes alternativas posibles, junto con la evaluación preliminar de las mismas como herramienta de ayuda a la toma de decisiones (análisis de la conveniencia socioeconómica de la inversión y, de ser el caso, selección de la alternativa con una mayor contribución a la prosperidad o bienestar social). En este mismo sentido, el *‘Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) 2012-2024’* (MFOM, 2015)

---

<sup>26</sup> Sobre esta distinción de enfoques se incidirá con más detalle un poco más adelante dentro de este mismo epígrafe.



señala, con respecto a las características básicas del marco de planificación, la necesidad de reforzar los mecanismos de evaluación rigurosa como instrumento para optimizar la generación de valor a partir de los recursos públicos. Asimismo, se explicita la pertinencia de *“realizar un análisis prospectivo, riguroso e independiente de la utilidad de los diferentes modos de transporte para atender necesidades concretas, para corredores y para segmentos de demanda específicos, así como de las actuaciones inversoras, abarcando todos los modos y todas las categorías de transporte”*<sup>27</sup> (MFOM, 2015: p. IV-2).

Además, debe procurarse que todo proceso evaluador esté guiado por los principios fundamentales de objetividad, neutralidad y transparencia, de forma que con ello se dificulte al máximo la posible introducción de sesgos estratégicos en la subsiguiente toma de decisiones. Para adecuarse a estos principios, resulta conveniente que el proceso evaluador se acomode a un marco común de referencia (sin menoscabo de la necesaria flexibilidad para adaptarse a las características particulares de cada proyecto o inversión), a través de la utilización de técnicas de evaluación que permitan la revisión y reproducibilidad de los procedimientos seguidos y que se basen en criterios, en la medida de lo posible, cuantificables (sin que ello signifique excluir de la toma de decisiones otros criterios no cuantificables).

De entre las diferentes técnicas de evaluación de alternativas existentes, el análisis coste-beneficio es generalmente el método que mejor se ajusta a los principios o directrices indicadas en el párrafo anterior, destacando como la herramienta de evaluación con unos fundamentos teóricos más robustos. En particular, el análisis coste-beneficio encuentra en el ámbito del transporte un campo de aplicación especialmente propicio, puesto que asignar valores monetarios a los beneficios y costes de un proyecto de transporte resulta habitualmente más sencillo y menos controvertido que con otros tipos de políticas o proyectos (de Rus *et al.*, 2010: p. 3). Así pues, una primera definición del análisis coste-beneficio como marco de evaluación puede formularse del siguiente modo (de Rus *et al.*, 2010: p. 3):

*“El análisis coste-beneficio es una técnica de análisis que permite realizar la evaluación económica de proyectos expresando sus beneficios y costes en una unidad común, que incorpora la intensidad de las preferencias de los individuos en la sociedad con respecto a los bienes y servicios en un sentido amplio.”*

Estas preferencias a las que se alude en la definición anterior pueden ser expresadas en unidades monetarias (como ‘unidad común’ de la definición) a través de técnicas que han sido desarrolladas en el campo de la economía para cuantificar dichas preferencias en forma de equivalencias monetarias.

Probablemente debido a la apariencia que le proporciona el hecho de cuantificar los diversos efectos de un proyecto o actuación a través de equivalencias monetarias, el análisis coste-beneficio ha sido considerado en ocasiones como una técnica poco ‘sensible’ a los impactos ambientales y a otros efectos externos. Sin embargo, un análisis coste-beneficio completo, exhaustivo y correctamente aplicado ha de integrar la medición y valoración de este tipo de impactos, a pesar de la dificultad que se deriva de que para la mayoría de estos efectos no existan precios de mercado que actúen como señal de su valor. La necesaria inclusión de todos estos aspectos se recoge por ejemplo de la siguiente forma en el *‘Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) 2012-2024’*, al tiempo que se describen las funciones u objetivos de este tipo de análisis y se enuncian someramente los elementos de coste a incorporar en el mismo (MFOM, 2015: p. II-147)<sup>28</sup>:

*“Los análisis coste/beneficio ayudan a determinar cuál es la alternativa de inversión más eficiente, maximizando el beneficio social de una determinada asignación de recursos, incluyendo costes*

<sup>27</sup> En concreto, el PITVI 2012-2024 (MFOM, 2015) expresa este cometido como una de las funciones del Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE), cuya creación se recoge en dicho documento. En cualquier caso, la necesidad de considerar este tipo de análisis es extensible a cualquier entidad, organismo o administración implicados en la planificación y desarrollo de actuaciones, planes o proyectos en materia de transporte y movilidad.

<sup>28</sup> El texto citado se refiere en el PITVI 2012-2024 (MFOM, 2015) a actuaciones inversoras en transporte por carretera, pero evidentemente la descripción dada para el análisis coste-beneficio es válida en general para cualquier otra clase de plan o proyecto de transporte.

*de capital, de operación y de conservación así como costes externos de contaminación ambiental, congestión, accidentalidad, desarrollo urbano, etc.”*

Con respecto al análisis coste-beneficio, conviene apuntar que este es susceptible de ser abordado tanto desde la perspectiva de la evaluación económica como desde el punto de vista del análisis financiero, siendo preciso distinguir claramente ambos enfoques. En el primer caso (evaluación económica o, si se prefiere, socioeconómica) se contemplan, tal como se ha estado considerando hasta el momento, los beneficios disfrutados y los costes soportados por el conjunto de todas las partes afectadas de una manera u otra por el proyecto o actuación, valorados generalmente según la disposición a pagar (*'willingness to pay'*) de la sociedad por los beneficios y según su coste de oportunidad (recursos) o coste social (externalidades negativas) en el caso de los costes. Este es por tanto el enfoque que permite dilucidar la utilidad o rentabilidad social de una inversión y la contribución de diferentes alternativas al bienestar o prosperidad del conjunto de la sociedad, siendo por tanto de especial interés desde el punto de vista del sector público. Por su parte, la evaluación financiera contemplaría únicamente los flujos contables de ingresos y gastos generados para los inversores o promotores por la realización del proyecto a lo largo de la vida útil de este, de forma que resulta de especial interés para el sector privado (aunque no solo para dicho sector, sino que también es fundamental para evaluar la viabilidad de proyectos de colaboración público-privada y, en proyectos del sector público, para anticipar las posibles implicaciones del proyecto sobre la situación financiera de las administraciones participantes). De todos modos, las evaluaciones económica y financiera no deben entenderse necesariamente como compartimentos estancos, sino que ambas suelen estar relacionadas por medio de las políticas de tarificación aplicadas (al menos en el caso de todos aquellos proyectos en los que se deba pagar por la utilización de una infraestructura, por el uso de un servicio de transporte público, etc.).

Desde el punto de vista de la perspectiva temporal, los procesos de evaluación —incluyendo el análisis coste-beneficio— pueden ser desarrollados *ex-ante*, *ex-post*, o de manera intermedia (también llamada *in media res*). La evaluación *ex-ante* es aquella que se realiza con anterioridad a la ejecución del proyecto o inversión (es decir, con anterioridad también a la toma de decisiones sobre el mismo), efectuada con fines prospectivos, basada en previsiones o pronósticos (debidamente fundamentados) sobre la evolución futura de las variables intervinientes, y utilizada en definitiva como herramienta de apoyo a la toma de decisiones sobre la realización del proyecto y la selección entre alternativas (es por tanto el tipo de evaluación al que principalmente se refiere esta tesis). La evaluación *ex-post* sería aquella que se efectuase con posterioridad a la finalización del proyecto (es decir, tras su fase de operación o vida útil) al objeto de analizar, ya con todos los datos reales e información disponible, si dicho proyecto ha alcanzado los objetivos propuestos o previstos (ya sea en forma de rentabilidad social, rentabilidad financiera, niveles de demanda, etc.). La utilidad de la evaluación *ex-post* consiste por tanto en extraer enseñanzas sobre los aciertos y errores cometidos en las decisiones tomadas con respecto a proyectos del pasado (de cara a mejorar la planificación de futuros proyectos), al mismo tiempo que la comparación entre las respectivas evaluaciones *ex-post* y *ex-ante* debe servir para afinar los procesos de evaluación *ex-ante* que se hayan de acometer en el futuro. Por su parte, la evaluación intermedia o *in media res* sería aquella realizada durante algún punto de la explotación o vida útil del proyecto, a fin de analizar la marcha del mismo en comparación con los objetivos propuestos o previstos y, si fuese necesario, introducir posibles medidas correctoras que ayuden al cumplimiento de dichos objetivos.

Por otra parte, nótese que hasta el momento se ha estado remarcando la aspiración a la máxima eficiencia en la asignación de recursos como objetivo fundamental de la evaluación económica (y en particular del análisis coste-beneficio). Aunque esto es así a nivel agregado (es decir, considerando el conjunto de proyectos desarrollados en una determinada sociedad), no debe perderse de vista que cada proyecto concreto puede tener efectos significativamente distintos sobre la equidad distributiva o interpersonal. Generalmente la realización de un determinado proyecto influirá de manera diferente sobre los distintos agentes afectados, sobre distintos grupos sociales, etc., beneficiando más a algunos e incluso perjudicando a otros (de lo contrario, en caso de beneficiar a todos los agentes o grupos sin perjudicar a ningún otro, se estaría hablando de que el proyecto en cuestión constituye una mejora de

Pareto, aunque esta situación no es la más frecuente). Así pues, desde el punto de vista de los decisores ('*decision takers*'), podría entenderse que a veces es necesario llegar a soluciones de compromiso o '*trade-offs*' entre el objetivo general de eficiencia y objetivos particulares que tengan en cuenta la equidad distributiva. Sin embargo, ambas aspiraciones (eficiencia y equidad) no son necesariamente objetivos contrapuestos (al menos desde un punto de vista hipotético o 'ideal'). Cuando un proyecto genere, sobre el conjunto agregado de todos los agentes o grupos afectados, suficientes beneficios netos será posible articular (generalmente por medio de las instituciones o administraciones competentes) mecanismos de compensación que redistribuyan dichos beneficios desde los agentes o grupos favorecidos hacia las partes perjudicadas, de forma que el resultado final sea que con la realización del proyecto todos los grupos o agentes terminen incrementando —o al menos manteniendo— su bienestar o prosperidad<sup>29</sup>. Típicamente estos mecanismos de compensación se materializarían en la práctica a través de medidas de corte fiscal o tarifario, ya que estas permiten efectuar las pertinentes transferencias de renta entre distintos grupos o agentes (compensaciones) con un coste muy bajo, de forma que no se perjudica el objetivo general de eficiencia. Bajo estas premisas, la aceptabilidad de este tipo de proyectos en relación con los criterios de equidad dependerá en gran medida de la capacidad efectiva del sistema institucional en el que se enmarca el proyecto para redistribuir a posteriori —normalmente en forma de renta— los beneficios generados desde los agentes o grupos más favorecidos hacia aquellos otros que hubiesen resultado inicialmente perjudicados. Otro argumento a veces esgrimido para justificar la realización de proyectos con una contribución total positiva pero que aisladamente pudieran ser cuestionables desde el punto de vista de la equidad se basa en el gran volumen de proyectos o actuaciones realizadas y la teórica aleatoriedad de sus efectos sobre los distintos grupos o agentes. Es decir, cada grupo o tipo de agente se verá aleatoriamente beneficiado por un gran número de proyectos al mismo tiempo que perjudicado por otros muchos, pero si se garantiza que cada uno de esos proyectos ofrece una contribución total positiva el resultado final de todos ellos —a modo de esperanza matemática— será beneficioso para cada uno de los grupos o agentes. La validez de este argumento dependería en la práctica de que efectivamente los efectos positivos y negativos del conjunto de proyectos o actuaciones se distribuyesen aleatoriamente sobre los distintos agentes económicos o grupos sociales, para lo que es necesario presuponer la inexistencia de sesgos prevalentes —inducidos estratégicamente o no— en el planteamiento, selección y desarrollo de proyectos de inversión.

Desde el punto de vista metodológico, en ocasiones se ha procurado introducir criterios de equidad distributiva en la evaluación económica de proyectos a través de la utilización en el análisis coste-beneficio de distintos pesos de ponderación en la agregación de los beneficios y costes asumidos por cada uno de los grupos sociales o tipos de agentes afectados (generalmente concediendo mayor peso relativo a los grupos con menor renta disponible y menor peso a aquellos con mayor renta o patrimonio). Aunque esta propuesta puede parecer en principio atractiva, no es sin embargo la más habitual en la práctica (Eugenio, 2010: pp. 5-6; de Rus *et al.*, 2010: pp. 52-53). El análisis coste-beneficio tradicional o estándar opta por otorgar el mismo peso a todos los beneficios y costes independientemente del tipo de agente o grupo social al que estén afectando más directamente, manteniendo el evaluador en este sentido una posición de neutralidad que descansaría implícitamente sobre la aplicabilidad del principio de compensación potencial de Kaldor-Hicks (además, en ciertos tipos de proyectos puede ser muy complejo determinar quiénes serán los receptores últimos de los beneficios y costes generados, lo que añade una dificultad práctica a la utilización de distintos pesos de ponderación). Esto no significa sin embargo que los posibles criterios de equidad distributiva deban ser ignorados en la toma de decisiones, sino más bien que se delimitan o independizan las funciones al respecto de evaluadores y decisores. Así, la elección del grado de compromiso entre eficiencia y equidad responde en último término a las preferencias u objetivos de los decisores. No obstante, dicha toma de decisiones debe estar en todo caso correctamente informada, para lo que resulta muy conveniente que el análisis coste-beneficio incorpore explícitamente —al menos siempre que sea factible la identificación— indicaciones desagregadas sobre el balance de beneficios y costes asumidos por cada tipo de agente o cada grupo social (para lo cual suele

---

<sup>29</sup> Esta premisa se basa en el principio conocido como 'criterio de compensación potencial o de Kaldor-Hicks'.

ser más apropiado el método de cálculo basado en los cambios en los excedentes de los agentes que el enfoque de variaciones en los recursos<sup>30</sup>), orientando con ello a los decisores sobre los previsibles efectos del proyecto en materia de equidad distributiva.

Otra cuestión clave en la evaluación a través del análisis coste-beneficio es la de la comparación o agregación intertemporal, ya que los costes y beneficios producidos por un proyecto se van generando a lo largo de distintos períodos en el tiempo, siendo frecuente en los proyectos de transporte que transcurran al menos varias décadas desde el comienzo de la inversión inicial hasta el final de la vida útil u operativa del proyecto. Pero sin embargo el valor de estos beneficios y costes recibidos o incurridos en horizontes temporales tan dispares necesita ser agregado u homogeneizado a una única cuantía que esté referenciada a un punto temporal específico establecido por el evaluador (normalmente coincidente con el hipotético inicio del proyecto). En la práctica esta cuestión se solventa mediante la utilización de una tasa de descuento que reduce el valor real de los costes y beneficios futuros en relación con los actuales, dando menor valor relativo a dichos costes y beneficios cuanto más alejados en el tiempo estén del inicio del proyecto. Así pues, la aplicación de los respectivos factores de descuento sobre el flujo temporal de beneficios menos costes generados por el proyecto a lo largo del horizonte o período de evaluación da lugar, una vez agregados los resultados correspondientes a cada año o período de tiempo, al concepto de valor actual neto (VAN). Además, la tasa de descuento puede ser de tipo financiero (aplicable a la evaluación financiera) o de tipo social (aplicable a la evaluación económica). En el caso de la tasa de descuento financiero, esta se relaciona ‘simplemente’ con el tipo de interés aplicado en los mercados de capitales. Por su parte, la tasa de descuento social responde en cierto modo a una determinada preferencia de la sociedad —o de los individuos que la componen— por el bienestar presente (o cercano en el tiempo) frente al hipotético bienestar futuro. Así, la elección de la tasa de descuento social más apropiada no es un tema en absoluto trivial (véanse algunas reflexiones en Arrow *et al.* (1996); Portney y Weyant (1999); de Rus *et al.* (2006): pp. 61-63; Small y Verhoef (2007): pp. 185-187; EC-DGRP (2008): pp. 208-210; de Rus *et al.* (2010): p. 29), pudiendo afectar sensiblemente a los resultados de un análisis coste-beneficio y sin que exista un consenso general sobre cuáles deberían ser los valores más adecuados o equitativos (a pesar de que generalmente se apliquen por defecto valores pragmáticos propuestos por las administraciones competentes a través de guías o recomendaciones). Pero además las implicaciones subyacentes a la elección de la tasa social de descuento cobran especial relevancia cuando se toman en consideración posibles efectos sobre la equidad intergeneracional, ya que los beneficios y costes generados a largo plazo por un proyecto de este tipo (cuyos valores actualizados pueden llegar a quedar reducidos a magnitudes prácticamente irrelevantes, incluso con tasas de descuento relativamente bajas) serían potencialmente disfrutados o soportados por individuos de generaciones distintas a las actuales.

Otro factor que es preciso considerar en la evaluación *ex-ante* de proyectos es el concerniente a la incertidumbre y el riesgo asociado (Savvides, 1994; de Rus *et al.*, 2006: pp. 44-53; EC-DGRP, 2008: pp. 60-66, 236-241; de Rus *et al.*, 2010: pp. 22-24, 30-35). Cualquier decisión que pueda tomarse con respecto a un proyecto de transporte (o en su caso de cualquier otro tipo) ha de ser afrontada siempre, en mayor o menor medida, bajo condiciones de incertidumbre sobre sus posibles resultados. La incertidumbre que afecta a los resultados esperados de un proyecto de transporte puede estar ligada al propio desarrollo efectivo —ejecución y explotación— del proyecto (por ejemplo a través de contingencias no previsibles tales como defectos en la ejecución del proyecto, aparición de dificultades críticas no contempladas en el proyecto constructivo, retrasos importantes en el desarrollo del proyecto, posibles

---

<sup>30</sup> Los enfoques de medición de los cambios en los excedentes de los agentes y de las variaciones en los recursos son dos métodos de cálculo utilizados en el análisis coste-beneficio para la cuantificación de los cambios en el bienestar social producidos por un proyecto. El primero de los enfoques consiste en calcular las variaciones en los excedentes de los diferentes agentes al pasar de la situación de equilibrio sin proyecto al equilibrio con proyecto (es decir, en calcular la diferencia entre lo que gana y lo que pierde cada agente a raíz de la realización del proyecto). El segundo enfoque mide los cambios netos en la utilización de los recursos productivos aportados por la sociedad y en la disposición a pagar de los usuarios producidos a consecuencia de la realización del proyecto, ignorando las posibles transferencias entre los agentes participantes (de Rus *et al.*, 2010: p. 39).

accidentes, problemas técnicos persistentes durante la operación, etc.) o bien puede estar entroncada con el propio proceso de evaluación. En este último caso la incertidumbre de evaluación —que es la más interesante desde el punto de vista de la modelización formal— resulta de una combinación entre los efectos de las limitaciones metodológicas (por ejemplo, capacidad limitada de los modelos de transporte para pronosticar con total fidelidad las demandas futuras) y de las limitaciones en la información disponible (por ejemplo, incertidumbre sobre el coste de los factores, sobre el valor de los tiempos de viaje, sobre la valoración de los impactos ambientales, etc.). Además, las fuentes de incertidumbre pueden ser de origen interno (por ejemplo, a causa de rendimientos o prestaciones técnicas de operación inferiores a las previsibles, por dificultades en la estimación de las externalidades negativas evitadas con el proyecto, por necesidades de mantenimiento muy superiores a las previstas, etc.) o de origen externo (por ejemplo, debido a la posible evolución de los costes de energía, laborales o de otros costes de operación de una forma notablemente distinta a la prevista, por catástrofes naturales que afecten al proyecto, por el posible surgimiento de tecnologías disruptivas que puedan actuar como sustitutivas del proyecto realizado y menoscaben su utilidad, etc.). En cualquier caso, la incertidumbre que inevitablemente afecta a gran parte de las variables de las que depende el procedimiento de evaluación debe ser incorporada cuantitativamente a dicho análisis, de forma que esta multiplicidad de factores de incertidumbre pueda ser traducida finalmente a una estimación de los niveles de riesgo sobre la rentabilidad esperada del proyecto, ya sea socioeconómica o financiera. De otro modo, omitir o ignorar la existencia de incertidumbre podría incrementar seriamente la probabilidad de adoptar una decisión incorrecta.

Metodológicamente, existirían varias formas a través de las cuales la incertidumbre relativa a las variables determinantes del proceso de evaluación puede ser introducida en el análisis coste-beneficio, con diferentes niveles de sofisticación y de acercamiento a la complejidad del funcionamiento real del problema. El nivel más simple y elemental consistiría en el clásico ‘análisis de sensibilidad’, en el que se analizan los posibles valores de un pequeño grupo de variables presumiblemente críticas, variando el valor de una de ellas mientras se mantienen constantes todas las demás al objeto de estudiar los efectos de dicha variación sobre los resultados finales. El siguiente nivel se basaría en la elaboración de un reducido número de escenarios discretos (típicamente escenarios ‘normal’, ‘optimista’ y ‘pesimista’) en los cuales se combinan respectivamente los valores previsiblemente más habituales, más favorables y más desfavorables de un pequeño conjunto de variables, estudiando los resultados finales a los que conducirían dichas posibles combinaciones. Evidentemente estos dos niveles elementales de análisis, por su simplicidad y sus carencias en cuanto al tratamiento estadístico de las variables y sus probabilidades de ocurrencia, aportan poca información adicional y en general no muy valiosa sobre los niveles de riesgo en la rentabilidad final del proyecto.

El nivel más elevado en cuanto al análisis del riesgo que globalmente afecta al proceso de evaluación coste-beneficio consiste en tratar estadísticamente desde un principio las variables sujetas a un cierto grado de incertidumbre —o al menos aquellas que además presenten una mayor influencia sobre los resultados finales— como variables aleatorias caracterizadas por unas determinadas probabilidades de ocurrencia de sus posibles valores. Así, una vez planteada la modelización formal del problema (ya sea el análisis coste-beneficio propiamente dicho o, en el caso de esta tesis, los modelos de cálculo de los ‘inputs’ necesarios para dicha evaluación) se procedería a la selección de las variables en las que residen las fuentes primigenias de incertidumbre, definiéndose a continuación, en función de la información disponible, las distribuciones de probabilidad más adecuadas para sus posibles valores. Estas variables en las que se introduce la aleatoriedad del problema deben seleccionarse entre aquellas que actúen como variables independientes (desde el punto de vista de cada modelo particular), descartando aquellas otras que se obtengan mediante dependencias deterministas (la aleatoriedad en este último tipo de variables es propagada desde las variables independientes que las determinan). Además, en todo este proceso es preciso tener en cuenta la posible existencia de correlaciones estadísticas, en mayor o menor grado, entre algunas de las variables iniciales del modelo de cálculo a las que se incorpora la aleatoriedad del sistema (por ejemplo, distintas variables que estuviesen relacionadas con la renta o nivel socioeconómico de los viajeros), introduciendo, de ser el caso, dicho grado de correlación en la

modelización estadística del problema. Esto asegura la consistencia interna de cada una de las simulaciones que se realizarán a continuación. En efecto, el paso definitivo de este procedimiento consiste en ejecutar repetidamente simulaciones aleatorias del modelo de cálculo, es decir, efectuar múltiples realizaciones del mismo en cada una de las cuales se utiliza una combinación diferente de valores de las variables aleatorias iniciales. Para ello es necesario que en cada una de esas simulaciones se extraigan previamente valores aleatorios de dichas variables, generados con una probabilidad de extracción acorde a las distribuciones de probabilidad anteriormente definidas. La repetición de este proceso en un número suficientemente elevado de veces conducirá a disponer de una amplia muestra estadística de los posibles resultados aleatorios del proyecto, a partir de la cual se podría configurar una distribución de probabilidad de dichos resultados o estudiar parámetros estadísticos de la misma que resulten de particular interés (media, desviación estándar, percentiles, probabilidad de valores negativos, etc.)<sup>31</sup>. En conclusión (de Rus *et al.*, 2010: p. 24):

*“La evaluación económica bajo incertidumbre requiere modelizar el comportamiento de las variables (aleatorias) que determinan los resultados del proyecto, y en lugar de obtener un valor determinista del VAN (Valor Actual Neto) del proyecto, se obtiene una distribución de probabilidad del mismo (un rango de valores posibles y las probabilidades de que dichos valores ocurran).”*

Lógicamente la información adicional proporcionada por este nivel de análisis permite tomar decisiones más fundamentadas, en las que se pueda tener en cuenta el grado de aversión al riesgo de los decisores. En este sentido, es habitual considerar que el sector público tiende a poder mantener una posición de neutralidad ante el riesgo, debido, por una parte, al gran número de proyectos llevados a cabo (diversificación del riesgo) y, sobre todo, a que el posible riesgo se reparte entre una cantidad extraordinariamente elevada de personas (contribuyentes y resto de la sociedad)<sup>32</sup>. En la práctica, esto se traduciría en que un proyecto pudiese ser evaluado fundamentalmente en base al valor medio o esperanza matemática de su rentabilidad social. No obstante, en ciertos casos —no necesariamente infrecuentes— el decisor público sí puede estar afectado por un considerable nivel de aversión al riesgo (un ejemplo especialmente significativo sería un proyecto de importante magnitud acometido por una administración local o regional). Además, en último término el coste social del riesgo dependería de las preferencias al respecto de los individuos destinados a disfrutar los beneficios y/o soportar los costes, así como de la importancia relativa de esos beneficios y costes sobre el bienestar o la renta de dichos individuos (de Rus *et al.*, 2003: p. 335). Por su parte, los inversores privados siempre van a estar interesados en los niveles de riesgo asociados a la rentabilidad financiera de cualquier proyecto.

Obsérvese, echando la vista atrás, que hasta el momento se ha incidido a lo largo de este epígrafe principalmente en el análisis coste-beneficio como método fundamental de evaluación, al tratarse del más utilizado en el campo de la economía para respaldar las decisiones sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión pública, particularmente en el ámbito de los proyectos de transporte (de Rus *et al.*, 2003: pp. 298-299). No obstante, no debe dejarse de lado la existencia de otras técnicas o enfoques alternativos para la evaluación de proyectos de inversión, entre los cuales merece la pena destacar el análisis coste-eficacia, el análisis multicriterio y el análisis de impactos económicos (EC-DGRP, 2008: pp. 66-69). Cada uno de estos enfoques puede tener su particular campo de utilidad, según las características de la actuación evaluada. Así, el análisis coste-eficacia se aplica básicamente a la comparación de actuaciones alternativas en las que su resultado se pueda cuantificar a través de una única medida de rendimiento (es decir, el proyecto solo tiene —o solo considera— un tipo de efecto). De este modo, se persigue o bien maximizar el resultado producido (medido en términos de eficacia) dada una cierta limitación presupuestaria, o bien minimizar el coste incurrido dado un determinado nivel de resultados

---

<sup>31</sup> El procedimiento descrito en este párrafo constituye, a grandes rasgos, una aplicación de las técnicas de análisis estadístico-numérico conocidas como método de Montecarlo.

<sup>32</sup> Esta neutralidad del sector público ante el riesgo se relaciona con el denominado ‘principio de Arrow-Lind’ (Arrow y Lind, 1970).

que ha de ser necesariamente alcanzado. Por su parte, el análisis multicriterio<sup>33</sup> está constituido por una familia de métodos que permiten integrar en la evaluación de un proyecto o actuación toda una serie de objetivos o criterios dispares, entre los cuales algunos de ellos pueden hacer referencia a efectos difícilmente cuantificables o, en muchos casos, no traducibles de ningún modo a equivalencias monetarias. El análisis multicriterio trata de agregar los resultados de cada alternativa en relación con los diversos objetivos o criterios —a veces contrapuestos entre sí— mediante un único valor numérico, utilizando al respecto pesos de ponderación cuya asignación puede corresponder a las preferencias o prioridades de los formuladores de las políticas públicas (*'policy makers'*) o bien de los decisores, lo cual puede en todo caso conllevar niveles variables de subjetividad. Por último, el análisis de impactos económicos encuentra su campo de aplicación en la evaluación de proyectos de gran envergadura y trascendencia, capaces de generar efectos macroeconómicos que afecten a toda una región o país o a todo un sector de la economía, complementando de ese modo al propio análisis coste-beneficio (el cual se basa en cambio en un enfoque microeconómico).

En cualquier caso, ha de prevalecer la visión de que estos métodos o enfoques alternativos de evaluación de proyectos o actuaciones no son necesariamente excluyentes en relación con el análisis coste-beneficio, sino que unos y otros pueden desempeñar un papel complementario (por ejemplo, el valor actual neto de un proyecto o alternativa en un análisis coste-beneficio puede a su vez incorporarse como un criterio de gran peso dentro de un análisis multicriterio). De hecho, todos los métodos de evaluación comparten la misión de contribuir a facilitar la toma de decisiones debidamente informadas (ninguno de ellos pretende establecer 'verdades absolutas' en la selección de proyectos o alternativas), y por tanto la información aportada por cada uno de ellos puede ser de notable interés para dicha toma de decisiones, dependiendo fundamentalmente de las características de la actuación concreta que se pretenda evaluar. En este mismo sentido, y en relación particularmente con la visión del análisis coste-beneficio como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, podría afirmarse (Small y Verhoef, 2007: p. 190):

*"Las decisiones de inversión pública están fuertemente influenciadas por consideraciones políticas. El objetivo del análisis coste-beneficio no es crear rígidos criterios que deban ser seguidos hasta la exclusión de todos los demás, sino más bien informar a los decisores sobre cómo resulta un proyecto cuando es juzgado mediante un conjunto de criterios concebidos de modo que sean consistentes con los principios económicos ampliamente aceptados."*

En síntesis, la presente tesis configura sus objetivos en base a la especial conveniencia de que la contribución pretendida a la mejora de los procesos de selección de alternativas en el ámbito de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia (véase epígrafe 1.2.1) se desarrolle con la vista puesta en el marco de la evaluación *ex-ante* de proyectos (particularmente en relación con el análisis coste-beneficio, aunque sin exclusión de su posible utilidad también para otros métodos o enfoques). Este marco metodológico orientado principalmente al análisis coste-beneficio, al estar fundamentado en principios teóricos de mayor robustez científico-técnica, se ha revelado como el más apropiado para que la contribución aportada por la tesis a la selección de alternativas entre este tipo de sistemas de transporte público se rija por criterios de objetividad, neutralidad y transparencia. Además, es el más adecuado para poder tratar de forma analítica y comprensiva la incertidumbre a la que inevitablemente están sujetos los resultados parciales y finales de cualquier proyecto o alternativa. En conclusión, a través de las posibles aportaciones de esta tesis a la mejora de los procesos de selección de sistemas alternativos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia se pretende en último término que la toma de decisiones en este ámbito pueda ser realizada en base a prognosis más precisas —o al menos mejor fundamentadas dentro de los marcos teóricos generalmente aceptados— sobre los futuros efectos de cada uno de estos sistemas alternativos sobre las condiciones

<sup>33</sup> Algunos ejemplos metodológicos en los que se ha desarrollado o aplicado el análisis multicriterio para la evaluación de proyectos de transporte urbano son el *'Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades'* (MFOM, 1996) y las tesis doctorales *'Metodología de evaluación de efectos económicos, sociales y ambientales de proyectos de transporte guiado en ciudades'* (Cascajo, 2004) y *'Le choix d'un système de transport durable: analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface'* (An, 2011).

de movilidad de un determinado eje, corredor o itinerario, dadas las características particulares del mismo. Con todo ello se contribuiría, mediante una toma de decisiones mejor informada, a la selección de la opción que en cada caso aporte globalmente un mayor bienestar o prosperidad al conjunto de la sociedad, con una asignación más eficiente de los recursos que se inviertan en materia de transporte urbano y metropolitano.

### 1.3. EXPOSICIÓN DE OBJETIVOS

Cualquiera que sea el método propuesto de evaluación de proyectos o actuaciones relacionadas con el transporte de viajeros, el necesario punto de partida de dicha evaluación ha de situarse en el análisis de la movilidad, tanto actual como, sobre todo, futura. Es decir, es imprescindible efectuar un pronóstico fundado sobre cómo afectaría la hipotética ejecución y explotación del proyecto (o, más exactamente, de cada una de sus posibles alternativas) a las condiciones de movilidad del área de actuación. Esos efectos previstos sobre la movilidad se concretarían a través de aspectos tales como los cambios producidos por el proyecto en la demanda de viajes y el reparto modal, en las características o atributos de la oferta de transporte, en los costes de viaje, etc. Para poder llevar a cabo este ejercicio de pronosis de manera racional, robusta y con coherencia entre las distintas alternativas estudiadas es necesario recurrir a la modelización formal (típicamente analítica) del sistema de interés que sea objeto de análisis (véase *'Models and their Role'* en Ortúzar y Willumsen (2011): pp. 2-3).

En particular, la fiabilidad de los resultados de la evaluación coste-beneficio *ex-ante* (es decir, con fines prospectivos) que pudiese realizarse sobre la posible implantación de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia en un determinado corredor, eje o itinerario va a depender en gran medida de la validez de la prognosis realizada sobre un conjunto de variables que deben entrar a formar parte de dicha evaluación como *'inputs'* o variables de entrada. A grandes rasgos, estas variables de entrada hacen referencia fundamentalmente a aspectos del tipo de los señalados en el párrafo anterior (cambios originados en la demanda de viajes y en el reparto modal, variaciones introducidas en las características o atributos de la oferta de transporte para las distintas opciones modales disponibles así como en los parámetros de operación y explotación del transporte público, cambios producidos en los costes de viaje —entendidos en un sentido amplio como conjunto de factores que generan desutilidad a los viajeros— para cada opción modal potencialmente afectada, etc.). En consecuencia, los valores de dichas variables deben ser el resultado de la aplicación de un modelo de transporte especialmente enfocado al análisis detallado de los efectos producidos por la hipotética realización de los proyectos alternativos que serían objeto de evaluación (en este caso, implantación o bien de modos ferroviarios ligeros o bien de sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada), de tal forma que la disponibilidad de un modelo de transporte particularmente adaptado a las características de los sistemas bajo estudio y a los correspondientes escenarios resultantes de su posible implantación se revela como una condición previa necesaria para un correcto análisis coste-beneficio de las alternativas estudiadas.

Por consiguiente, la presente tesis se plantea como objetivo principal el diseño, desarrollo, implementación y ejecución de un modelo de transporte específicamente concebido para el análisis de los efectos sobre las variables de movilidad generados por la hipotética implantación —en un corredor, eje o itinerario de unas características dadas— de cada uno de los dos tipos de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia que son objeto de estudio: modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) frente a sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT). Este conjunto de variables de movilidad objeto de modelización están conformadas en base a los requerimientos de una potencial aplicación posterior —ya fuera del alcance de la tesis— como *'inputs'* o variables de entrada en una evaluación coste-beneficio de cada una de las respectivas alternativas.



Una vez definido brevemente el objetivo principal, a continuación se describen con más detalle las características y objetivos específicos a los que ha de adaptarse el diseño general del modelo a desarrollar.

En primer lugar, a la hora de definir el conjunto de escenarios alternativos incluidos en la modelización, es preciso tener en cuenta el carácter comparativo o incremental del análisis coste-beneficio. Esto significa que dicha técnica de evaluación se fundamenta en la comparación de uno o varios escenarios en los que se desarrollarían proyectos alternativos de inversión (situaciones o escenarios ‘con proyecto/alternativa’) frente a otro escenario —que actúa como escenario base o de referencia— en el que ninguno de dichos proyectos se llevase a cabo (situación o escenario ‘sin proyecto’). De este modo, la evaluación de costes y beneficios de los proyectos se plantea siempre en términos de diferencias (por ejemplo, ahorros o aumentos de costes) entre cada uno de los escenarios ‘con proyecto/alternativa’ y el escenario ‘sin proyecto’. En general, el escenario base o de referencia suele plantearse como una evolución en el tiempo de la situación actual, con un plan de actuación marcadamente continuista (por lo que se le define también como escenario ‘*business as usual*’ o, abreviadamente, BAU). Esto significa que en este escenario no se acometerían nuevas inversiones importantes en capital (mayormente nuevas infraestructuras), aunque lógicamente sí deberán continuar produciéndose todos aquellos costes necesarios para mantener en la medida de lo posible la razonable operatividad de dicho escenario a lo largo del tiempo (costes de operación, de mantenimiento, de pequeñas reposiciones), así como los posibles costes externos. En consecuencia, a efectos de plantear los objetivos de la modelización, es necesario tener presente que el modelo a desarrollar deberá incluir no solamente los dos escenarios alternativos en los que se implantarían cada uno de los dos tipos de modos de transporte público de capacidad intermedia (metro ligero o tranvía moderno y BHLS/BRT), sino también la previsible evolución en el tiempo de un escenario base o de referencia de tipo ‘*business as usual*’. Dado que se pretende analizar, para un determinado corredor, eje o itinerario, la posible implantación de un nuevo modo de transporte público de capacidad intermedia, la opción más realista y equilibrada para definir el escenario base de comparación consiste en plantear una situación actual en la que ya exista en dicho corredor, eje o itinerario una línea de transporte público con similar cobertura zonal, pero operada mediante un modo de menor capacidad e inferiores atributos de servicio. De acuerdo a la situación más habitual en el contexto actual, dicho modo de transporte público de referencia ha de corresponder indudablemente a autobús convencional en tráfico mixto, de forma que el escenario base consistiría en mantener la operación de dicha línea de autobús convencional a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación. Así pues, se parte de la premisa de que en cada caso se pretendería evaluar la potencial sustitución de la línea de autobús convencional en tráfico mixto existente por una línea de trazado equivalente o bien de metro ligero o tranvía o bien de BHLS o BRT<sup>34</sup>. En conclusión, el modelo a desarrollar deberá estar convenientemente adaptado a cada uno de los tres escenarios planteados, en los cuales la opción de transporte público existente será en cada caso un modo ferroviario ligero (metro ligero o tranvía moderno), un sistema de autobús semirrápido en plataforma reservada (BHLS o BRT) o un servicio de autobús convencional en tráfico mixto, considerándose diferenciadamente las distintas características de operación y de nivel de servicio de cada uno de ellos.

Particularmente, el modelo planteado deberá estar diseñado para el pronóstico, en cada uno de los tres escenarios, de los futuros valores de la serie de variables que caracterizan el estado o comportamiento del sistema de transporte en referencia a cada una de las principales opciones modales de viaje (con especial énfasis en este caso en los modos de transporte público, aunque incluyendo también el resto de alternativas modales mayoritarias), en uno o varios corredores, ejes o itinerarios (cada uno de aquellos en los que se proyecte analizar la posible implantación de un nuevo modo de transporte público de

---

<sup>34</sup> Dependiendo de diversos factores tales como —entre otros muchos— el volumen actual de demanda de transporte público y el nivel de congestión en la circulación de automóviles particulares, el escenario base (situación sin proyecto, con autobús convencional) podrá resultar en ocasiones el más rentable socioeconómicamente, con lo que en ese caso debería prescindirse de la implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia (o, al menos, posponer su posible implantación hasta el medio o largo plazo).

capacidad intermedia), y en cada año a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación (que en estos casos suele ser no inferior a 30 años). Además, se pretende que el modelo a desarrollar sea capaz de analizar por separado —para, posteriormente, agregar los resultados cuando proceda— las muy diferentes condiciones de demanda, oferta, costes de viaje, etc. que tienen lugar en distintos períodos horarios (horas punta, horas valle, situaciones intermedias, etc.), ya que considerar únicamente las condiciones propias de hora punta y tratar de extender o extrapolar los resultados de este período a la totalidad del horario de servicio del transporte público podría conducir a una evaluación notablemente distorsionada de los beneficios totales del proyecto. Asimismo, es imprescindible también que el modelo propuesto diferencie, en cada corredor, eje o itinerario y para cada uno de los períodos horarios, las condiciones propias de cada posible sentido de viaje (al menos en el caso más general de líneas de transporte público de doble sentido).

Otro objetivo particular de la modelización planteada se refiere a la necesidad de diferenciar explícitamente en cada escenario, a lo largo del horizonte o período de evaluación, varias fases o etapas relativas a la implantación y posterior explotación de los sistemas de transporte público (segmentación temporal del horizonte o período de evaluación). Así, para los dos escenarios que representan a los nuevos sistemas de capacidad intermedia se debería distinguir una fase de implantación del modo (correspondiente a los períodos de proyecto, construcción, pruebas en blanco, etc.) durante la que el servicio de transporte público tiene que ser prestado todavía por el modo preexistente (autobús convencional), una fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (primeros años tras la puesta en marcha, caracterizados por una progresiva readaptación de la demanda a los nuevos atributos de nivel de servicio ofertados por el modo introducido), y una fase de madurez (con unos patrones de comportamiento de la demanda más consolidados). En el caso del escenario base (mantenimiento de la línea de autobús convencional en tráfico mixto), la totalidad del horizonte o período de evaluación se encuadraría ya desde un principio en su etapa de madurez.

En cuanto al conjunto de opciones modales que se plantea incluir en la modelización, es imprescindible tener en cuenta que los cambios en la oferta y en la demanda de transporte público ocasionados por la introducción y servicio de los nuevos modos de capacidad intermedia afectan de forma cruzada a las condiciones en las que se desarrollan los viajes en otras alternativas modales, de forma que los usuarios de estas otras opciones también pueden ver alterados sus propios costes de viaje, así como dar lugar a sensibles variaciones en el total de los costes externos generados (por ejemplo, a través de cambios en el volumen de viajes en automóvil particular). Por lo tanto se hace necesario un enfoque relativamente multimodal del problema, que vaya más allá en todo caso del propio modo de transporte público. En consecuencia, se pretende que el conjunto de opciones modales a considerar en la modelización de cada escenario durante cada una de sus fases o etapas incorpore, además del propio servicio de transporte público, modos de transporte motorizado privado (automóvil particular y moto/ciclomotor) y las principales modalidades de desplazamiento no motorizado y de ‘micromovilidad’ (estas últimas al menos como opciones contempladas dentro de la formulación del reparto modal). Por su parte, la opción de transporte público se deberá singularizar por medio de diferentes modos (metro ligero o tranvía, BHLS o BRT, y autobús convencional) dependiendo del escenario analizado y de sus sucesivas fases o etapas.

A nivel funcional, en cada uno de los posibles escenarios y fases el núcleo principal del modelo deberá tener como objetivo sistematizar las interdependencias mutuas entre los siguientes grupos de procesos (tal como puede verse en la parte superior de la Figura 1.3):

- Cuantificación de la demanda: caracterizada a través de los volúmenes de viajes (viajes/hora) en cada una de las opciones modales, así como por la suma o volumen total correspondiente al conjunto de opciones.
- Caracterización dinámica de la oferta: consiste en la determinación de valores para las variables de operación del servicio de transporte público, así como para las variables representativas de los atributos o características que las distintas opciones modales presenten para los potenciales viajeros.

Los valores de estas variables van a estar sensiblemente influenciados por el volumen de viajes en cada modo, de forma que esta influencia debe ser recogida por el modelo (oferta dinámica).

- Valoración del conjunto de opciones o alternativas: en función de los atributos presentados por las opciones modales (oferta) y de la apreciación relativa que los viajeros harían de cada uno de esos atributos deberá ser posible realizar una valoración integral de cada alternativa modal (por medio del concepto de coste generalizado<sup>35</sup>), así como una valoración global del conjunto total de opciones modales disponibles (a través del coste compuesto de viaje<sup>36</sup>).
- Representación de las elecciones agregadas de los viajeros: la valoración efectuada de cada opción modal (a través del coste generalizado de viaje en cada una de ellas) deberá servir de base para establecer el reparto modal (con consideración de la probable existencia de viajeros cautivos del transporte público), mientras que el coste compuesto de viaje del conjunto de alternativas influiría, a través del proceso de distribución de viajes, en el volumen total de desplazamientos efectuados sobre el corredor, eje o itinerario que es objeto de análisis.

Otro objetivo fundamental de la modelización a desarrollar consistirá en abordar el tratamiento metodológico de la incertidumbre que afectaría a gran parte de las variables del modelo desde la raíz misma del problema, comenzando por la aleatorización estadística (de acuerdo a distribuciones de probabilidad) de los valores de aquellos datos de entrada, parámetros iniciales y otras variables independientes potencialmente sujetos a incertidumbre, y propagando la aleatoriedad resultante a las variables dependientes calculadas en el resto del modelo. Para este objetivo se plantea por tanto la utilización de múltiples simulaciones aleatorias según el método de Montecarlo, en consonancia con los requisitos exigidos por el nivel metodológico más elevado de análisis de riesgo en la evaluación (presentado dentro del epígrafe 1.2.2). Asimismo, se deberá tener en cuenta la posible existencia de ciertas correlaciones entre algunas de las variables iniciales del modelo.

Como objetivo complementario, se proyecta que una vez diseñada y desarrollada la formulación del modelo se proceda a su implementación como código en algún entorno o herramienta de cálculo computacional, conduciendo así a la validación práctica de su funcionamiento. En este sentido, se plantea su ejecución aplicada a un ejemplo de cálculo formado en base a un conjunto de datos que, aunque artificiales (no correspondientes a ningún caso real en concreto), puedan resultar representativos de situaciones habituales en corredores, ejes o itinerarios con volúmenes intermedios de demanda de transporte público, de forma que en dicho ejemplo tendría sentido plantear —y posteriormente evaluar— la posible implantación de un modo de capacidad intermedia en sustitución de la línea análoga de autobús convencional. Tras la ejecución del modelo aplicado al ejemplo propuesto, se deberá proceder al tratamiento y análisis de los correspondientes resultados con vistas a la posible extracción de conclusiones particulares.

En último término, el objetivo final de la investigación en cuanto a su posterior utilidad (véase también la parte inferior de la Figura 1.3) es el de proporcionar una herramienta que sirva de base para la adecuada estimación de gran parte de los componentes principales de una evaluación coste-beneficio (*ex-ante*) referida a la posible implantación de un modo de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, comparando al respecto las dos principales clases de alternativas existentes:

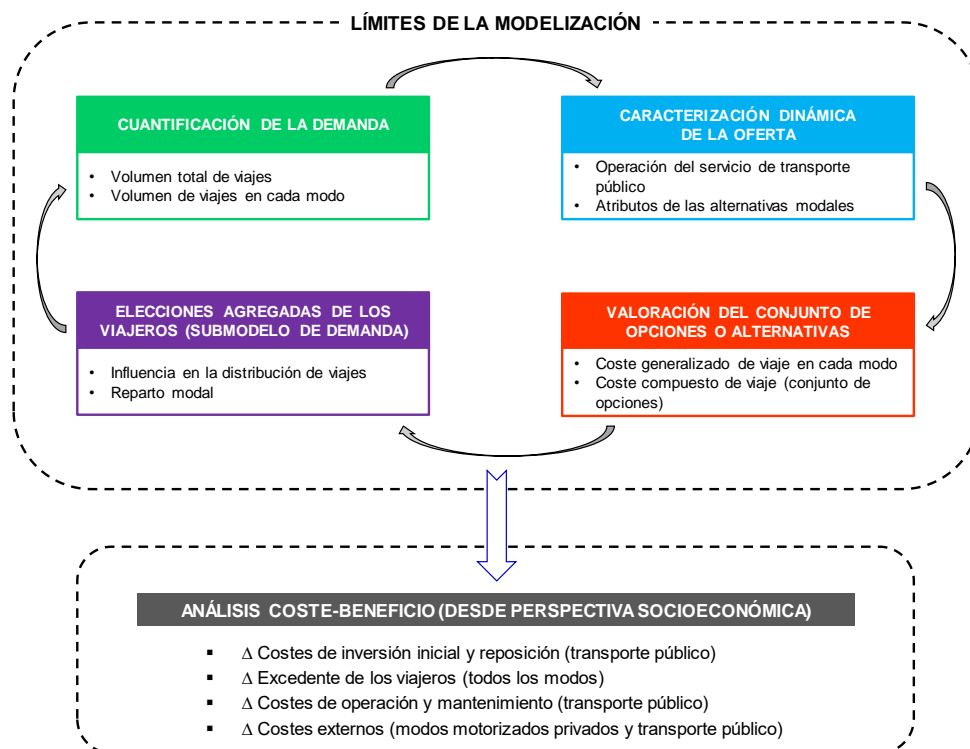
---

<sup>35</sup> El coste o precio generalizado de viaje puede definirse brevemente como una variable cuantitativa en la que se combinan aditivamente los principales atributos asociados a la desutilidad de un viaje (conjunto de desincentivos a los que se enfrenta un individuo para la realización de dicho viaje) en una determinada opción modal, convirtiendo los distintos valores de esta serie de atributos (tiempos empleados, dinero gastado, posibles incomodidades, etc.) a una magnitud común que suele expresarse en unidades monetarias equivalentes (véase con más detalle el Capítulo 4).

<sup>36</sup> Para un viaje dado entre dos zonas o puntos determinados, su coste compuesto representaría una medida de la desutilidad —cuantificada en términos monetarios si así lo están también los costes generalizados— asociada a todo el conjunto disponible de opciones o alternativas modales (cada una de ellas, a su vez, con su propia desutilidad o coste generalizado). En este caso el coste compuesto permitiría comparar cuán favorable o desfavorable resultaría para el potencial viajero un conjunto de alternativas disponibles con respecto a otros conjuntos —o al mismo conjunto pero con distintos atributos de las opciones— (véase también el Capítulo 4 para mayor información sobre este concepto).

modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT). Así, al margen de las diferencias en los costes de inversión inicial de estos sistemas de transporte público (que no obstante serán también estudiados en el epígrafe 2.3.2.1), los resultados proporcionados por el modelo sirven de datos fundamentales para el cálculo de elementos clave del análisis coste-beneficio como:

- el excedente de los viajeros<sup>37</sup> de las diferentes opciones modales (a través de las diferencias de coste generalizado y de volumen de demanda entre los distintos escenarios para cada una de las opciones modales de viaje);
- los costes de operación y mantenimiento para los productores del servicio de transporte público (en función, por ejemplo, de la cantidad total de vehículos-km y de horas de servicio acumulados por el conjunto de vehículos en operación de cada uno de los modos de transporte público);
- los costes externos soportados por el conjunto de la sociedad (en función, entre otros factores, del número total de vehículos-km realizado en cada escenario mediante automóviles particulares y mediante motos o ciclomotores, que repercute proporcionalmente en los volúmenes de emisiones de gases y micropartículas nocivos para la salud y el medio ambiente, en las emisiones de gases de efecto invernadero, en los niveles de ruido generado, en el número esperable de accidentes de circulación y atropellos, etc.).



**Figura 1.3.** Interdependencias entre los principales grupos de procesos del modelo y aplicabilidad de este en relación con la evaluación coste-beneficio de proyectos de transporte, como posterior utilidad final de la investigación.

<sup>37</sup> En terminología económica genérica se hablaría de ‘excedente del consumidor’. Dado que en el caso del transporte de viajeros —ya sea producido por cuenta ajena o por cuenta propia— el servicio ‘consumido’ es el propio viaje, se ha particularizado el término como ‘excedente del viajero’, que se definiría cuantitativamente como la diferencia entre la máxima disposición a pagar del individuo por ver satisfecha la necesidad de desplazarse a su destino (como actividad intermedia para dar cumplimiento al motivo de su viaje) y el total de ‘costes’ particulares (i.e., el coste generalizado) efectivamente incurridos para la realización de dicho desplazamiento. El excedente del viajero pretende cuantificar por tanto el beneficio personal neto —a modo de aumento de satisfacción— obtenido por el individuo con la realización del viaje.

## 1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Tras este primer capítulo de Introducción, el resto del documento de tesis se estructura a través de la serie de capítulos que se describen brevemente a continuación.

El **Capítulo 2** profundiza, con mayor detalle, en el tema de los modos o sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, describiendo las características generales de esta gama de sistemas y las características específicas tanto de los modos basados en ferrocarril ligero urbano (metro ligero o tranvía moderno) como de los sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio (bajo denominaciones como BHLS o BRT). También se revisa el estado del conocimiento en cuanto a estudios comparativos entre sistemas de transporte ferroviario urbano o metropolitano y sistemas basados en autobuses, completándose dicha revisión con un análisis más detallado de los costes de implantación y de operación y mantenimiento de cada una de las dos clases de sistemas.

El **Capítulo 3** representa una introducción general al modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado de viaje que será desarrollado en detalle en los capítulos siguientes de la tesis. Los contenidos de este capítulo suponen una primera aproximación orientativa hacia el modelo y deben contribuir a facilitar la posterior comprensión de su estructura y funcionamiento. En particular, se presenta el esquema básico o general de funcionamiento del modelo en relación a sus secciones o partes principales, las funciones desempeñadas por las mismas y su apropiado orden de ejecución. Se introduce asimismo la división del núcleo central del modelo en distintos módulos de cálculo, así como la diferenciación entre tipos de bucles iterativos que será incorporada en el diseño de cada uno de estos módulos de cálculo.

Complementando en cierto sentido al Capítulo 3, el **Capítulo 4** presenta las bases teóricas y principios fundamentales adoptados en la tesis para el desarrollo de las partes de la modelización orientadas a la previsión de la futura demanda de transporte (volúmenes totales de viaje y repartos modales), incluyendo las simplificaciones particulares que se han considerado necesarias. En este capítulo se define el marco teórico de referencia del modelo agregado sintético de distribución y de reparto modal adoptado como base, se desarrollan formulaciones incrementales de este tipo de modelo, se analiza la obtención de valores estimativos para sus parámetros, y finalmente se examinan algunos aspectos relacionados con la especificación del coste generalizado de viaje, planteando al respecto ciertos paralelismos o analogías funcionales con el concepto de utilidad representativa o sistemática de los modelos de elección discreta.

A continuación comenzará un grupo de capítulos (5, 6, 7 y 8) en los que se desarrolla detalladamente el modelo objeto de la tesis.

Así, el **Capítulo 5** presenta, de forma estructurada, el conjunto de datos o variables de entrada que son requeridos por el modelo como '*inputs*' necesarios para su ejecución. En relación con el tratamiento metodológico de la incertidumbre, este amplio conjunto de variables de entrada incluirá dos tipos de datos: aquellos para los que se puede proponer la definición de un único valor o valor fijo (al entenderse que generalmente serían conocidos con un nivel adecuado de precisión y certidumbre) y aquellos otros para los que se considera que podrían estar sometidos en la práctica a un notable nivel de incertidumbre o falta de precisión, y que por tanto deben ser tratados desde un principio como una variable aleatoria en las simulaciones del modelo. Para esta última clase de datos será necesario especificar los parámetros estadísticos de sus distribuciones de probabilidad.

En el **Capítulo 6** se preparan y configuran los procesos destinados a la aleatorización estadística de las simulaciones del modelo, constituyendo por tanto la fase inicial en la ejecución del método de Montecarlo como procedimiento de tratamiento de la incertidumbre. Tras la presentación de algunos desarrollos teóricos útiles para el modelo en relación con las variables aleatorias de distribución triangular, se procederá a continuación en este capítulo, por una parte, a la aleatorización directa de aquellos datos o variables de entrada sujetos a incertidumbre y, por otro lado, a la aleatorización

primigenia o inicial de aquellas funciones o variables de cálculo del modelo que posteriormente se considerarán sometidas a un grado notable de incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización. Además se introducirán e incorporarán a la modelización las previsible correlaciones entre variables.

En el **Capítulo 7** se presentan una serie de cálculos iniciales o preparatorios que, al no depender en su formulación de la evolución a lo largo del horizonte de evaluación de factores tales como la demanda de viajes, el reparto modal, los atributos de la oferta de transporte, etc., pueden ser obtenidos de forma directa (es decir, sin necesidad de recurrir a procedimientos iterativos, como sí sucede en general en los módulos de cálculo que forman parte del núcleo principal del modelo). Esta serie de cálculos preliminares proporcionarán como resultado variables intermedias (elaboradas a partir de datos de entrada) que son necesarias para su posterior utilización —a lo largo del siguiente capítulo— por el núcleo principal del modelo.

El **Capítulo 8** constituye el núcleo principal del modelo. En él se modelizan las interdependencias existentes entre los conjuntos de variables de cálculo relacionadas con la cuantificación de la demanda (volumen total de viajes, volumen de viajes en cada modo, etc.), con la caracterización de la oferta de transporte (dimensionamiento y operación de los servicios de transporte público, atributos de las diversas alternativas modales, etc.), con la valoración del conjunto de opciones o alternativas (coste generalizado de viaje en cada modo, coste compuesto de viaje del conjunto de opciones disponibles, etc.), y con las elecciones agregadas de los viajeros (reparto modal resultante, volumen total de viajes de acuerdo a las variaciones de coste compuesto, etc.). Los cálculos relativos a todos estos grupos de variables se realizan, de forma incremental, tanto para el año base (que admite cálculos directos) como para los años posteriores del horizonte de evaluación (es decir, para las previsiones futuras). Para dichas previsiones será necesario recurrir a procedimientos iterativos, que, según el escenario y la fase o etapa del horizonte de evaluación, se plasman en diferentes módulos de cálculo. En la parte final del capítulo se señalan también los procedimientos o pautas para la obtención, a partir de los resultados proporcionados por el modelo, de algunos resultados complementarios de interés. Entre estos se incluyen cuestiones relacionadas con el tiempo y la velocidad de ciclo en la explotación del transporte público, así como con el número de unidades de transporte necesarias en la composición de cada flota. También se indica la obtención de variables, índices, parámetros, etc. representativos de la eficiencia operativa en la explotación del transporte público y de sus correspondientes resultados económicos. Finalmente, se analizan —tanto de forma general como específicamente para el modelo— las formulaciones de cálculo de los incrementos en el excedente de los viajeros previsiblemente generados por la implementación de proyectos alternativos al escenario base (en este caso, por los sistemas de capacidad intermedia).

Una vez concluida la completa definición del modelo propuesto en la tesis, en el **Capítulo 9** se desarrolla un ejemplo de aplicación numérica en el que se llevará a la práctica dicho modelo, aplicándolo sobre una hipotética línea de transporte público. Este ejemplo de aplicación numérica se planteará en base a un conjunto de datos diseñados artificialmente, aunque procurando, a la hora de seleccionar sus valores, que estos puedan resultar representativos de situaciones en las que tenga sentido plantear, de manera justificada, la posible implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia como sustitución de una línea análoga de autobús convencional. Por tanto, el capítulo comenzará con la especificación detallada de los valores dados en el ejemplo de aplicación a todas las variables de entrada utilizadas como datos del modelo. Tras la ejecución computacional del mismo, se presentará la fase de exposición y análisis de resultados, donde estos son tratados estadísticamente, representados gráficamente, e interpretados en relación con las características del caso propuesto. Por último, se procederá al estudio de las principales conclusiones que puedan ser extraídas en base a este ejemplo de aplicación numérica.

Para finalizar, en el **Capítulo 10** se revisan las principales aportaciones de la tesis (mayoritariamente en referencia a las características y utilidades del modelo desarrollado), se recapitulan las conclusiones fundamentales (tanto concernientes al enfoque metodológico adoptado como relativas a la evaluación

comparativa de sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia), se identifican potenciales oportunidades de mejora con respecto al modelo desarrollado, y, ya por último, se plantean otras posibles líneas de investigación futura que podrían ser acometidas a partir de la presente tesis.

Adicionalmente, se incluye al final del documento una pequeña lista de las publicaciones del autor relacionadas con la temática de esta tesis, así como el listado completo de las referencias bibliográficas citadas a lo largo de la misma.





## **2. Sistemas de capacidad intermedia y estudios comparativos (Estado del conocimiento)**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se profundiza, con más detenimiento, en el tema de los modos o sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, el cual ya se había presentado previamente —con mayor brevedad— en el epígrafe 1.2.1, dentro del capítulo de Introducción. Cabe recordar, en este sentido, que estos modos pueden ser agrupados en dos principales tipos de sistemas: sistemas basados en ferrocarril ligero urbano (metro ligero o tranvía moderno) y sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio (incluyendo denominaciones tales como BHLS o BRT). Se excluyen sin embargo del campo de estudio de la tesis los modos intermedios o ‘híbridos’ entre uno y otro tipo de sistemas (tales como tranvías o metros ligeros sobre neumáticos), puesto que su implantación real es bastante limitada.

En primer lugar, se presenta una definición general de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, incidiendo en las características comunes esenciales que permiten clasificarlos como tales, independientemente de que sean de tipo ferroviario o estén basados en el uso de autobuses. A continuación se describen con más detalle las características particulares de cada una de las dos clases principales de modos de capacidad intermedia, es decir, de los sistemas basados en ferrocarril ligero urbano (metro ligero o tranvía moderno) y de los sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio (denominados habitualmente BHLS o BRT). Como síntesis, se ofrece además una pequeña contextualización del lugar que ocupan los diferentes modos de capacidad intermedia dentro del espectro de sistemas de transporte público urbano y metropolitano.

Con posterioridad se revisa el estado del conocimiento en cuanto a estudios comparativos entre sistemas de transporte ferroviario urbano o metropolitano y sistemas basados en autobuses, agrupando los variados enfoques de análisis en estudios de carácter generalista o cualitativo, estudios relacionados con la demanda potencial y el atractivo para el viajero, estudios centrados en la valoración de costes y en la evaluación de inversiones, y estudios de otros tipos. Finalmente, se procede a analizar, con mayor detenimiento, el tema de los costes de implantación y de operación y mantenimiento de cada una de las dos clases de sistemas, basándose para ello en la revisión particular de aquellos estudios que han tratado esta cuestión con mayor nivel de detalle.

### **2.2. SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO Y METROPOLITANO DE CAPACIDAD INTERMEDIA**

#### **2.2.1. Definición general**

Genéricamente, en esta tesis se consideran sistemas de capacidad intermedia aquellos modos de transporte público colectivo de ámbito urbano y/o metropolitano concebidos —entre otros posibles objetivos— para satisfacer o atender volúmenes de demanda de transporte público que se sitúen dentro

de un intervalo de capacidades de transporte de viajeros definido aproximadamente por los siguientes extremos:

- en su extremo inferior, estaría limitado por la máxima capacidad funcional —es decir, manteniendo unas prestaciones y nivel de servicio que permitan al transporte público resultar suficientemente atractivo y competitivo— propia de los servicios convencionales de autobús en tráfico mixto (sin plataforma reservada ni carril-bus);
- en su extremo superior, este intervalo estaría delimitado por el volumen mínimo de demanda que comenzaría a hacer socioeconómicamente planteable —de una forma racionalmente justificada— la implantación de sistemas de transporte urbano/metropolitano de gran capacidad y con infraestructuras específicas completamente independientes, tales como pueden ser el metro o el ferrocarril de cercanías<sup>38</sup>. Otra posible forma de definir el extremo superior de este intervalo sería a través del límite máximo de capacidad funcional (sin acercarse excesivamente a las condiciones de saturación) de los propios sistemas de capacidad intermedia, si bien es cierto que en la gran mayoría de las explotaciones existentes en España resulta poco frecuente que dicha capacidad máxima llegue a ser utilizada plenamente.

Desde un punto de vista práctico, el principal problema asociado a la definición anterior consiste en que no es posible establecer con una aplicabilidad general unos valores cuantitativos fijos para los límites del intervalo de capacidades en el que se situarían los sistemas de transporte público de este tipo, ya que la particularización y concreción de dichos límites depende en realidad de un amplio conjunto de variables pertenecientes a diversos ámbitos de análisis, tal como se pone de manifiesto precisamente en el modelo desarrollado en esta tesis. No obstante, sí resultaría conveniente indicar unos valores orientativos que puedan tomarse como primera referencia aproximada. Así pues, el campo de acción más habitual para los sistemas de transporte público de capacidad intermedia se situaría en la práctica —siempre de forma aproximada— en unos volúmenes de pasajeros en hora punta que se moverían entre un límite inferior de 1,200–1,500 viajeros por hora y sentido (prs/h-dir) y un margen superior en torno a 5,000–10,000 prs/h-dir (donde el primer valor correspondería más bien al límite superior habitual en los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada como el BHLS y el segundo al de los modos ferroviarios ligeros como el tranvía moderno y el metro ligero, si bien es cierto que para este último se han llegado a indicar capacidades máximas en torno a 20,000 prs/h-dir<sup>39</sup>).

De acuerdo a las capacidades características de estos modos, las líneas de transporte público con implantaciones de sistemas de capacidad intermedia son más propensas a presentarse en los principales corredores o ejes troncales o estructurantes de ciudades de tamaño medio<sup>40</sup> (entendiendo como tales aquellas con una población que podría situarse a grandes rasgos entre 200,000 y 800,000 habitantes), pudiendo corresponder a un único eje o corredor (más habitualmente en el caso del rango de población medio-bajo) o a un pequeño número de ellos (por ejemplo entre dos y cuatro en el caso del rango medio-alto). No obstante, es posible encontrar también líneas de transporte público con sistemas de capacidad intermedia en grandes ciudades y áreas metropolitanas<sup>41</sup>, aunque en este caso su implantación no se corresponde tanto con los mayores ejes o corredores troncales (en los que normalmente se disponen sistemas de gran capacidad como metro o ferrocarril de cercanías), sino más bien con

<sup>38</sup> Téngase presente que estos modos de gran capacidad con infraestructura independiente conllevan costes muy elevados de implantación, además de altos costes de operación, lo que los hace económicamente inviables sin una concentración de demanda de transporte público suficientemente alta.

<sup>39</sup> Por ejemplo en Zamorano *et al.* (2006) —también recogido en CICCIP (2008)— se indicaban capacidades máximas para los sistemas de tranvía moderno y de metro ligero de 21,000 prs/h-dir (con un intervalo mínimo de 60 segundos).

<sup>40</sup> En el ámbito español, pueden citarse como sistemas de capacidad intermedia en ciudades de tamaño medio, entre otros, los metros ligeros y tranvías modernos de Tenerife (2 líneas), Vitoria (2 líneas con un tronco común), Murcia, Zaragoza, o Granada.

<sup>41</sup> En el contexto español, se pueden citar como sistemas de capacidad intermedia dentro de grandes ciudades y áreas metropolitanas a los metros ligeros y tranvías modernos de Madrid y su región metropolitana (línea ML-1, líneas ML-2 y ML-3 de Metro Ligero Oeste, y tranvía de Parla o ML-4), y de Barcelona (redes de Trambaix y Trambesòs, con un total de 6 líneas).

relaciones de viaje relativamente importantes que desempeñan funciones de alimentación/distribución con respecto a dichos ejes o corredores principales. En grandes áreas metropolitanas también es factible encontrar a veces líneas con modos de capacidad intermedia uniendo la ciudad central con algún núcleo periférico importante. Por el contrario, difícilmente van a presentarse volúmenes de demanda apropiados para estos sistemas en ciudades de pequeño tamaño (por ejemplo por debajo de 200,000 habitantes), al menos en lo que a las ciudades españolas se refiere.

A pesar de que la definición general dada anteriormente se centra fundamentalmente en los aspectos relacionados con la capacidad de transporte de pasajeros (no en vano la propia designación genérica utilizada para estos sistemas hace referencia directa a dicha capacidad), es necesario tener presente que en ocasiones los motivos para la implantación de alguno de los modos incluidos bajo la etiqueta de sistemas de capacidad intermedia se basan no tanto en la capacidad de transporte de pasajeros requerida para un caso concreto, sino más bien en la necesidad de aumentar la competitividad del transporte público frente a los modos motorizados privados como el automóvil particular. En este sentido, las características operativas de los sistemas de transporte público urbano o metropolitano de capacidad intermedia suelen implicar un salto cualitativo muy notable en el nivel de servicio que puede ser ofrecido a los potenciales usuarios del transporte público en comparación con otros modos sin reserva de plataforma como el autobús convencional en tráfico mixto, especialmente en condiciones de alta congestión del viario utilizado.

Por otra parte, aunque no forme parte del objeto de estudio de la presente tesis, no debe olvidarse que las actuaciones de inserción en el viario urbano de estos nuevos modos de transporte público de capacidad intermedia suelen ser aprovechadas como una oportunidad para la regeneración urbanística del entorno (CICCP, 2008: pp. 48-49). Aunque ambos tipos de operaciones (implantación del nuevo modo de transporte público y operaciones de regeneración urbana en el viario afectado) suelen realizarse en la práctica de forma conjunta, no debería pasarse por alto que desde el punto de vista de la evaluación de actuaciones resultaría conveniente poder analizar por separado los costes y beneficios de cada una de ellas.

### **2.2.2. Características comunes esenciales**

En la forma en que son objeto de análisis dentro de la presente tesis, se considera que los modos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, independientemente de que sean de tipo ferroviario ligero o estén basados en autobuses semirrápidos o de altas prestaciones, están definidos infraestructuralmente por un conjunto mínimo de características comunes esenciales, que constituirían el núcleo básico —o ‘mínimo común denominador’— de dichos sistemas. Estas características comunes se resumirían en el hecho de tratarse de modos fundamentalmente en superficie (lo que implica la presencia de intersecciones a nivel), en la disponibilidad de circulación en plataforma reservada en la gran mayoría de su recorrido, y —al menos cuando las condiciones lo permiten— en la dotación de sistemas de priorización semafórica del transporte público en las intersecciones a nivel con el tráfico general. Por supuesto esto no significa que estas tres características sean suficientes para describir completamente a los sistemas de transporte público de capacidad intermedia, pero sí van a establecer un marco común de referencia para definir, dentro del modelo desarrollado en la tesis, el entorno operativo en el que se desenvuelvan tanto los modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) como los sistemas de autobuses semirrápidos, de altas prestaciones o de alto nivel de servicio.

En consecuencia, a continuación se describen con mayor detalle cada una de estas tres características comunes.

### 2.2.2.1. Modos en superficie

Esta característica se refiere simplemente a que el perfil longitudinal del trazado de la línea de transporte público transcurre —al menos en su gran mayoría— al nivel de la superficie del terreno, en contraposición a los modos típicamente subterráneos (como el metro en muchas ocasiones), a los modos con estructuras elevadas (como podría ser típicamente el monorraíl), y a los modos de transporte aéreo suspendido por cable (como teleféricos, telecabinas, etc.). Esta característica conlleva la existencia, a lo largo del trazado, de intersecciones a nivel con cualesquiera otros modos de transporte que también discurran en superficie (fundamentalmente con el tráfico rodado de vehículos), así como con otros posibles usuarios de las vías públicas (tales como peatones, etc.). No obstante, pueden existir en algunos puntos o secciones concretas, que se prevean especialmente conflictivas, pasos inferiores o elevados (ya sea en la propia línea de transporte público o en el vial intersecado), aunque ha de entenderse que estos casos constituyen más bien una excepción dentro del trazado total de la línea.

### 2.2.2.2. Circulación en plataforma reservada

De acuerdo al CICCP (2008: p. 7), una plataforma reservada puede entenderse como una parte de la sección transversal de una vía de circulación que, a través de la disposición de los instrumentos técnicos y normativos apropiados, queda reservada —ya sea de forma permanente o a veces temporal— para la utilización exclusiva de determinados tipos de vehículos autorizados a circular por ella (normalmente modos de transporte público y, en ciertas ocasiones y según el caso, algunos vehículos adicionales como pueden ser taxis, vehículos de alta ocupación, bicicletas, vehículos de emergencias, etc.). Es esta, no obstante, una definición de carácter bastante amplio. Así pues, en lo que respecta al tipo de plataforma reservada al que se va a referir particularmente la presente tesis —así como de cara al desarrollo del modelo posterior— va a ser añadida como característica definitoria la existencia, a lo largo de aquella, de algún tipo de separación física longitudinal (bordillos, pequeñas barreras, bandas ajardinadas, etc.) que impida eficazmente la intrusión de usuarios y vehículos no autorizados (principalmente automóviles particulares en circulación o incorrectamente detenidos o estacionados). En este sentido, se va a imponer como restricción adicional, en lo que concierne al desarrollo posterior de la tesis, que la plataforma reservada esté dedicada exclusivamente a la circulación del modo de transporte público en cuestión (con la excepción ocasional de vehículos de emergencias que precisen hacer uso de dicha plataforma). Además, en el desarrollo del modelo que es objeto principal de la tesis, se va a considerar que la plataforma reservada a la que se hace referencia es de tipo permanente, no estando autorizado el uso de la misma a otros vehículos o usuarios distintos del transporte público durante ningún período horario. Por lo que respecta al grado de desarrollo longitudinal de la plataforma reservada a lo largo del trazado de la línea de transporte público, se considerará como condición propia para la aplicabilidad del modelo planteado que dicho tipo de plataforma vaya a estar implantada en la práctica totalidad del recorrido.

En cualquier caso, para una mejor comprensión de las características definitorias de una plataforma reservada, resulta muy conveniente contextualizar esta dentro de alguna de las clasificaciones existentes sobre las categorías de sección transversal disponible para el uso del transporte público (*transit right-of-way*) en una infraestructura longitudinal de circulación y, análogamente, sobre el 'entorno operativo' (*operating environment*) en el que dicha circulación se desarrolla. Ambas clasificaciones, que presentan un notable paralelismo, se basan fundamentalmente en el nivel o grado de separación existente entre la sección transversal por la que transita el transporte público y el resto de tráfico (tanto de vehículos como, de ser el caso, de peatones) que hacen uso de las vías públicas. En este sentido, las clasificaciones más extendidas sobre esta cuestión aparecen planteadas respectivamente por Vuchic (2005: p. 5) y por el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35).

En primer lugar, la clasificación de Vuchic (2005: p. 5) agrupa los tipos de sección transversal disponible para el transporte público en una infraestructura longitudinal de circulación según el grado de

separación con otros usuarios del viario público, distinguiendo al respecto tres categorías (C, B y A, de menor a mayor grado de separación). Estas tres categorías se describen del siguiente modo:

- En la categoría C los vehículos de transporte público han de compartir el espacio viario o carriles de circulación con otros vehículos (automóviles, motocicletas, bicicletas, etc.), así como con los demás eventuales usuarios del espacio público, como los peatones. Se trata por tanto de unas condiciones de tráfico mixto, que se desarrollan directamente en la superficie de las calles o vías públicas. En algunas ocasiones se puede incluir un tratamiento preferencial hacia el transporte público a través de mecanismos visuales (marcado del pavimento, señalización vertical, etc.), pero sin separación física con respecto a otros tráficos. En esta categoría se incluirían por tanto los autobuses convencionales (en tráfico mixto) y el tranvía clásico o tradicional (es decir, sin plataforma reservada).
- La categoría B incluye aquellas clases de secciones transversales que, integradas dentro de las vías públicas de circulación, están reservadas o dedicadas para su uso exclusivo (o al menos ‘semiexclusivo’) por los vehículos de transporte público, debiendo existir una separación física longitudinal (bordillos, pequeñas barreras, bandas ajardinadas, etc.) con respecto a los carriles de circulación empleados por el resto de tráficos. Al estar normalmente al mismo nivel que el resto del viario público (es decir, en superficie) se mantiene la existencia de intersecciones a nivel con otras calles y vías transversales, pudiendo existir –o no– un tratamiento preferencial hacia el transporte público en la regulación de dichas intersecciones. Los modos de transporte público que hacen uso de una plataforma de categoría B pueden ser agrupados bajo la denominación genérica de ‘sistemas de transporte público semirrápido’. Entre ellos se encontraría el metro ligero (LRT) o tranvía moderno, pero también los sistemas de autobuses de alto nivel de servicio (BHLS) con plataforma reservada (*‘full BHLS’*), que, no obstante, a veces también son incluidos dentro de la denominación de *Bus Rapid Transit* o BRT (se trataría en todo caso de sistemas BRT con plataforma de categoría B, a diferencia del concepto de BRT ‘original’ de alta capacidad).
- La categoría A incluye aquellas infraestructuras de circulación que están concebidas exclusivamente para su uso por un determinado sistema de transporte público, sin intersecciones a nivel con el resto del viario y con un acceso totalmente restringido para otros tráficos o peatones. Por ello también reciben el nombre de vías exclusivas o a distinto nivel, pudiendo estar construidas de forma subterránea (en túnel o en trinchera), sobre una estructura elevada, o incluso en superficie, pero con pasos inferiores o pasos elevados en las secciones de cruce con otros tipos de vías. La categoría A es el elemento infraestructural que define a los modos de transporte público que se agrupan bajo la designación genérica de ‘sistemas de transporte público rápido’, entre los que se pueden destacar el metro, los sistemas RRT (*Rail Rapid Transit*), y los sistemas BRT (*Bus Rapid Transit*) ‘originales’ o de alta capacidad. También se incluirían en esta categoría los sistemas guiados automatizados (AGT, *Automated Guided Transit*).

Por su parte, de una forma bastante similar pero utilizando una diferente terminología de clasificación, el *‘Transit Capacity and Quality of Service Manual’* (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35) define cuatro clases de entornos operativos para los sistemas de transporte público, que se resumen del siguiente modo:

- Tráfico mixto: la operación de los vehículos de transporte público tiene lugar en carriles generales de circulación compartidos con el resto de tráficos (automóviles, motocicletas, camiones, bicicletas, etc.).
- Infraestructura semi-exclusiva: se trata de aquellos casos en los que el modo de transporte público utiliza un carril parcialmente reservado para él, pero que también está disponible para otros tráficos u otros usuarios durante ciertos períodos horarios o en ciertos tramos o secciones.
- Infraestructura exclusiva: se trata de una porción de la sección transversal de una calzada o vía de circulación que está reservada en todo momento para el uso del transporte público, pero todavía sometida a algunas interferencias de tráficos externos (por ejemplo, en intersecciones a nivel).

- Infraestructura a distinto nivel (*grade separated*): se trata de una infraestructura (subterránea, elevada o en superficie) exclusivamente concebida para su uso por parte del sistema de transporte público y además carente de intersecciones a nivel, de forma que cualesquiera otros modos de transporte (automóviles, peatones, etc.) cruzan dicha infraestructura por debajo o por encima de la misma.

Adicionalmente, en la Tabla 2.1 se resumen las equivalencias aproximadas entre ambas clasificaciones, con una breve descripción de cada clase o categoría.

**Tabla 2.1.** Resumen de principales clasificaciones sobre las categorías de sección transversal disponible para el uso del transporte público y sobre el tipo de entorno operativo equivalente.

Clasificación Vuchic (2005: p. 5)	Clasificación TCQSM (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35)	Breve descripción
Categoría A	Infraestr. a distinto nivel	Infraestructura totalmente concebida para el transporte público, sin intersecciones a nivel
Categoría B	Infraestr. exclusiva	Porción de sección transversal reservada siempre al uso del transporte público (preferentemente con separación física), con intersecciones a nivel
Categoría C	Infraestr. semi-exclusiva	Carril reservado al uso del transporte público según períodos horarios o según tramos
	Tráfico mixto	Carriles generales de circulación compartidos con otros tráfico

En conclusión, el tipo de plataforma reservada al que se hace referencia en esta tesis corresponde a una clase de sección transversal para el transporte público de categoría B según la clasificación establecida por Vuchic (2005: p. 5) o a un entorno operativo de tipo ‘exclusivo’ de acuerdo a la clasificación planteada por el ‘*Transit Capacity and Quality of Service Manual*’ (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35).

### 2.2.2.3. Dotación de sistemas de priorización semafórica para el transporte público

La tercera característica básica común a los modos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia considerados como objeto de análisis en esta tesis es la dotación de algún tipo de sistema de preferencia o priorización semafórica en las intersecciones a nivel con el tráfico general, que actúe en favor de la continuidad de paso del transporte público.

Los sistemas de priorización semafórica (TSP, *Transit Signal Priority*) del transporte público actúan alterando el ciclo normal de la regulación semafórica de las intersecciones de tal forma que se conceda algún tipo de prioridad o ventaja adicional al paso de los vehículos de transporte público, al tiempo que se procura mantener la coordinación de la regulación semafórica a lo largo de la línea y la longitud total de ciclo en cada intersección individual (TCRP, 2013: p. 6.40).

Las medidas de priorización semafórica suelen ser divididas en sistemas pasivos, activos y en tiempo real.

Las estrategias pasivas son las más simples y consisten en implementar en el sistema de regulación semafórica modificaciones preestablecidas que se aplican independientemente de que el vehículo de transporte público esté presente o no en la intersección para poder hacer uso de dicha ventaja. Estas estrategias pasivas se basan en información recogida previamente sobre la operación del transporte público (tales como los tiempos habituales de recorrido en los tramos entre intersecciones) para definir los planes de coordinación de la regulación semafórica.

Las estrategias activas son aquellas que aplican la modificación del ciclo normal de regulación semafórica solo cuando un vehículo de transporte público es detectado aproximándose a la intersección.

A su vez, este tipo de sistemas pueden dividirse entre aquellos que aplican estrategias incondicionales y aquellos otros que emplean estrategias condicionales. Las estrategias incondicionales otorgan prioridad al transporte público siempre que uno de sus vehículos se aproxima a la intersección, mientras que en las estrategias condicionales cada vez se decide automáticamente si se concede o no dicha prioridad en función de información tomada de sistemas tales como los de localización automática del vehículo o AVL (por ejemplo, si el vehículo lleva o no retraso con respecto a los horarios previstos), de los sistemas de conteo automático de pasajeros (por ejemplo, el número de viajeros a bordo) y del propio sistema de regulación y coordinación semafórica (por ejemplo, considerando el tiempo o número de ciclos semafóricos transcurridos desde la última vez que efectivamente se concedió prioridad a un vehículo de transporte público).

Por su parte, las estrategias en tiempo real son las más complejas, contemplándose en ellas no solo las llegadas a una intersección o conjunto de intersecciones de los vehículos de transporte público, sino también las condiciones en cada momento del tráfico general de automóviles y otros vehículos (volumen o intensidad de tráfico, ocupación media, etc.). Normalmente las estrategias en tiempo real suelen estar asociadas a algún tipo de criterio de optimización, tal como por ejemplo la minimización del tiempo total de retraso experimentado por el conjunto de todos los viajeros de los diferentes modos de transporte que se aproximan a las intersecciones (pasajeros del transporte público, usuarios de vehículos particulares, etc.). Evidentemente este tipo de estrategias requieren la implementación de un alto nivel de equipamiento tecnológico en el campo de los ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte).

La modificación del ciclo semafórico puede consistir normalmente en una prolongación de la fase verde (*green extension*) cuando la señal a la que se aproxima el vehículo de transporte público se encuentra ya en verde, o bien en un acortamiento de la fase roja (*red truncation*) si dicha señal, en el momento de aproximación del vehículo de transporte público, se encontraba en rojo. Dependiendo del tipo de modo de transporte público, a veces se deben introducir no obstante fases especiales destinadas exclusivamente a dicho transporte público.

Debido a las limitaciones impuestas a las prolongaciones de la fase verde y/o a los acortamientos de la fase roja, a la simultaneidad de ambas dentro del mismo ciclo, así como a la complejidad de ciertas intersecciones, en algunos casos no resulta posible aplicar la prioridad semafórica, especialmente si el intervalo de paso es muy corto. En cualquier caso, en el modelo desarrollado en esta tesis la priorización del transporte público será tratada considerando los efectos de estos condicionantes de funcionamiento.

En el caso de los sistemas de metro ligero o tranvía moderno, es preciso tener en cuenta también que sus vehículos o unidades de transporte suelen tener una longitud notablemente mayor que la de los vehículos de autobús, lo que puede condicionar ligeramente el rendimiento de los sistemas de regulación y coordinación semafórica.

En general, los beneficios derivados de la dotación de sistemas de priorización semafórica del transporte público consisten en una reducción de los tiempos de viaje, en una mejora de la fiabilidad y —a consecuencia de estos dos factores— en un potencial ahorro en los costes de operación del modo de transporte público. Asimismo, resulta conveniente apuntar que cuando una parada se localiza en las proximidades de una intersección dotada de un sistema de priorización es preferible que aquella se sitúe en el lado ‘aguas abajo’ de la intersección, ya que de esta forma se maximizan los beneficios para el transporte público.

### **2.2.3. Sistemas basados en ferrocarril ligero urbano**

Actualmente el modo ferroviario ligero por excelencia es, en el ámbito de los sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia, el denominado metro ligero (véase ejemplo gráfico en la Figura 2.1). Así pues, el metro ligero es un tipo de sistema de transporte de capacidad intermedia, tanto urbano como metropolitano, cuya definición puede perfilarse a partir de las siguientes características (CICCP, 2009: p. 9):

- Utilización de tecnología de tipo ferroviario, al fundamentarse en un sistema de rodadura y guiado basado en el contacto entre las ruedas de acero de los vehículos y los carriles, también de acero. Además, la tracción es casi siempre de alimentación exclusivamente eléctrica<sup>42</sup>.
- Discurre en superficie en la gran mayor parte de su trazado, aunque puede incluir también algunos tramos soterrados o en estructura elevada.
- Está dotado generalmente, a lo largo de la mayor parte de su recorrido, de circulación en plataforma reservada (categoría B o entorno operativo con infraestructura exclusiva, según se vio en el epígrafe 2.2.2.2). Por tanto, discurre sobre una parte de la sección transversal de una calzada o vía de circulación dedicada únicamente a su uso por este modo de transporte público, la cual normalmente está separada de la zona de tráfico general mediante algún tipo de elemento físico de borde, como bolaridos, bordillos, setos, bandas ajardinadas, etc. Además, este tipo de plataforma, junto con la característica de tratarse de un modo en superficie, da lugar a que existan intersecciones a nivel con el resto de usuarios del viario público, a fin de dotar de permeabilidad a las calles o vías que intersecan con el trazado de la línea. No obstante, también pueden presentarse algunos pequeños tramos con plataforma compartida (categoría C o tráfico mixto) si no condicionan sensiblemente la explotación del sistema, y, por el contrario, es posible también encontrar algún tramo (generalmente minoritario) donde haya sido necesario recurrir a plataforma independiente (categoría A o infraestructura a distinto nivel).
- El material móvil utilizado es de tipo 'ligero', es decir, con cargas por eje notablemente inferiores a las del metro convencional y a las del ferrocarril de cercanías. Además, la longitud de las unidades (o, en su caso, de las composiciones de unidades) está limitada por la necesidad de integración del trazado en el viario urbano. Estas dos características del material móvil influyen en que se trate de un sistema de capacidad intermedia.



**Figura 2.1.** Sistema de tranvía en la ciudad francesa de Le Havre.

Fuente: Margarita Novales.

<sup>42</sup> Normalmente el sistema de electrificación es de tipo aéreo, mediante catenaria e hilo de contacto, aunque cada vez se hace más frecuente la utilización en algunos tramos, para evitar problemas de intrusión visual o paisajística en centros históricos, de sistemas que toman la corriente eléctrica de dispositivos insertados en la superficie de la plataforma (por ejemplo, el sistema APS) o que utilizan baterías recargadas en las paradas (acumuladores de carga rápida, o ACR) para recorrer este tipo de tramos (véase Novales, 2011).



Tal como se viene exponiendo a lo largo de la presente tesis, habitualmente se considera al metro ligero como un sistema cuya capacidad de transporte, costes (de implantación, de explotación, etc.), y nivel y calidad de servicio se sitúan en el amplio rango intermedio existente entre el autobús convencional (o, en su caso, los tranvías tradicionales) y el metro subterráneo. De hecho, se suele considerar que el concepto de metro ligero en Europa surge en Alemania en la década de los años 1970s (CICCP, 2008: p. 28) con la pretensión de superar los problemas de eficacia que presentaban las líneas de tranvía tradicional, que al circular en tráfico mixto se veían seriamente afectadas por los crecientes problemas de congestión urbana, presentando además una capacidad de transporte de pasajeros notablemente inferior a la de los nuevos sistemas de metro ligero. Durante las décadas posteriores, muchas ciudades que habían abandonado sus antiguas redes de tranvía por ineficaces (sustituyéndolas mayoritariamente por líneas de autobús) recuperan la presencia de modos ferroviarios ligeros urbanos y metropolitanos mediante la implantación de nuevas líneas de metro ligero adaptadas a las necesidades contemporáneas.

Aunque originariamente y en sentido estricto los términos tranvía y metro ligero correspondían a modos ferroviarios ligeros urbanos de características notablemente diferenciadas (plataforma de categoría C en el primer caso y mayoritariamente B en el segundo, con unidades de transporte de mayor tamaño y capacidad), actualmente se emplean —al menos a nivel español— de un modo prácticamente intercambiable, dependiendo el uso de uno u otro término de la denominación dada a cada proyecto por la autoridad responsable. Dicha designación suele responder en la práctica más a razones comerciales o de marketing que a motivos técnicos o de porcentaje de plataforma reservada (CICCP, 2008: p. 28). Así pues, a lo largo de esta tesis el término ‘tranvía’ se va a utilizar generalmente con el significado de ‘tranvía moderno’ (es decir, prácticamente como sinónimo de metro ligero), salvo que se indique específicamente que se refiere al tranvía clásico o tradicional (aquel con plataforma de categoría C, en tráfico mixto).

No obstante, con respecto a la nomenclatura utilizada para las distintas clases de sistemas ferroviarios ligeros urbanos y metropolitanos, también se aprecian notables diferencias entre distintas áreas geográficas del mundo, dependiendo principalmente de la tradición y de las características urbanísticas de sus ciudades y áreas metropolitanas. Así, por ejemplo, en el inglés de Estados Unidos se emplea usualmente el término genérico ‘*Light Rail Transit*’ (LRT) para referirse a este tipo de sistemas, sobre todo a los de ámbito metropolitano y capacidad media y media-alta, mientras que el tranvía clásico o tradicional de ámbito urbano suele ser referido mediante el término ‘*streetcar*’. En el inglés empleado en Europa es en cambio frecuente la utilización de las palabras ‘*tram*’ o ‘*tramway*’ (literalmente tranvía) para hacer alusión tanto a sistemas equivalentes al metro ligero español (por ejemplo en numerosas ciudades francesas) como para referirse a tranvías tradicionales.

Por otra parte, los sistemas de tipo metro ligero o tranvía moderno suelen diseñarse, por término medio, con una separación entre paradas algo mayor a la de las líneas de autobús convencional (y también mayor que las típicas del tranvía clásico o tradicional), lo cual favorece el mantenimiento de una mayor velocidad de operación. Así, la distancia media típica entre paradas en los sistemas de metro ligero o tranvía moderno puede situarse aproximadamente entre 400 y 600 metros, aunque estas cifras presentan lógicamente notables variaciones: tienden a acortarse en los centros urbanos y a ser sensiblemente mayores en los tramos metropolitanos. Físicamente, las paradas suelen tener una fuerte visibilidad, que remarque la presencia del sistema, con marquesinas relativamente grandes (en comparación con las redes de autobús convencional) y disposición de equipamientos que redunden en el confort del viajero durante su espera. Especialmente importante es, en las paradas, la dotación de sistemas de información al viajero, que actualmente suelen proporcionar en la mayoría de los casos información en tiempo real. Otra cuestión de notable importancia con respecto a las paradas y el acceso a los vehículos es el sistema de pago y validación de los títulos de viaje. En este sentido, se procura favorecer los sistemas que anticipen la adquisición del billete o título de viaje (por ejemplo con máquinas de autoventa en las paradas) con anterioridad al acceso al vehículo, así como la validación de dichos títulos por el propio usuario en dispositivos instalados en el interior de los vehículos. Se trata con

todo ello de minimizar la intervención del conductor en relación con la venta y validación de billetes, lo cual agiliza los procesos de entrada de pasajeros en los vehículos y contribuye a alcanzar una mayor velocidad de operación.

Por otra parte, al igual que con otros sistemas de transporte metropolitano de capacidades medias o altas, puede ser muy recomendable que ciertas paradas especialmente relevantes o con una ubicación estratégica (situadas sobre todo en la periferia de los núcleos urbanos) estén complementadas con aparcamientos disuasorios (*park-and-ride*), facilitando que el automóvil particular sea utilizado, en caso de ser necesario, solamente como alimentador/distribuidor de la línea de transporte público, evitando su incursión en los normalmente congestionados centros urbanos.

Otra medida complementaria relacionada con las paradas y su entorno es la facilitación de la intermodalidad con otros modos de movilidad alternativa o no motorizada, como podría ser típicamente la bicicleta. En este sentido, se suele procurar la integración de aparcamientos de bicicletas en las paradas o estaciones.

En cuanto al trazado e inserción urbana de las líneas, cabe destacar que para las alineaciones en planta los sistemas de metro ligero pueden admitir sin problemas radios de curvatura del orden de 25 a 30 m (Novales, 2004: p. 71), si bien es posible recurrir a radios menores (de hasta 15 m aproximadamente) cuando sea estrictamente necesario (Novales *et al.*, 2012; Novales *et al.*, 2014). No obstante, siempre que sea posible es preferible mantener los radios por encima de estos valores para evitar problemas de explotación y no comprometer el mantenimiento de una adecuada velocidad de operación. Así, por ejemplo, en el trazado de nuevas líneas de metro ligero o tranvía moderno se suele optar por atravesar centralmente las rotondas o gloriets dispuestas para la regulación del tráfico rodado. Por lo que respecta al trazado en alzado o perfil longitudinal, las rampas y pendientes máximas que se suelen considerar habitualmente se situarían entre el 60‰ y el 80‰ (Novales, 2004: p. 71), aunque en casos excepcionales es posible alcanzar valores superiores, como puede ser el caso del tranvía de Tenerife con una rampa máxima del 85‰ (Novales *et al.*, 2012; Novales *et al.*, 2014) o el Sheffield Supertram (Reino Unido) con valores máximos en torno al 100‰ (Atkins Ltd., 2017). Un análisis más detallado sobre el trazado geométrico en sistemas de metro ligero (LRT) puede consultarse en Novales *et al.* (2010).

Los vehículos o unidades de transporte de metro ligero o tranvía moderno (que pueden designarse genéricamente como LRVs, *Light Rail Vehicles*) suelen presentar actualmente longitudes comprendidas entre un rango mínimo de 22–24 m y un nivel máximo en torno a 45 m, estando segmentados en un número variable de módulos articulados (generalmente entre 3 y 7) en función de su longitud. Según las necesidades de explotación, existe la posibilidad de acoplar más de una unidad en una única composición, si bien esta forma de operación requiere normalmente adaptaciones en la línea —como por ejemplo paradas de longitud especial (longitud de los andenes)—, además de estar sometida a limitaciones legales de longitud máxima según el país. En cuanto a la anchura de los vehículos, esta suele estar comprendida entre 2.40 y 2.65 m. El ancho de vía más habitual actualmente es el estándar (1,435 mm). No obstante, a veces también pueden encontrarse redes de ancho métrico (1,000 mm) e incluso casos especiales como el sistema de tranvitrén de la Bahía de Cádiz (Novales y Conles, 2014), que ha sido proyectado en ancho ibérico (1,668 mm). La capacidad estática por vehículo, para una densidad media de pasajeros de pie en torno a 4 prs/m<sup>2</sup> (condición relacionada con el confort de los viajeros), se situaría generalmente, de forma aproximada, entre un mínimo absoluto de 120 prs/veh (para los tranvías compactos de 22–24 m) y valores máximos en torno a 320 prs/veh (para unidades de unos 45 m de longitud)<sup>43</sup>. Otra característica importante en los vehículos de metro ligero o tranvía moderno es, en relación con el acceso y bajada de los pasajeros, la dotación de un elevado número de puertas, de notable amplitud, a uno o ambos lados de los vehículos, con la finalidad de reducir en lo posible los tiempos de permanencia en parada. También está generalizada la utilización de vehículos de piso bajo (habitualmente al 100% en la actualidad) que, combinada con la altura adaptada del andén en las

<sup>43</sup> Pueden consultarse datos más detallados sobre la capacidad estática de los vehículos de metro ligero o tranvía moderno en el epígrafe 5.3.1 de esta tesis.

paradas, permite que la entrada y salida de pasajeros en los vehículos se realice sin diferencia de nivel entre andén y piso del vehículo y prácticamente sin brecha horizontal.

En general, las características de los sistemas de metro ligero y tranvía moderno hacen que estos modos de transporte público permitan ofrecer una velocidad de operación competitiva (con valores orientativos, muy a grandes rasgos, en torno a 20 km/h en los centros urbanos y en torno a 25 km/h en zonas periféricas), una notable fiabilidad y regularidad del servicio en cuanto a horarios y frecuencias, y un elevado confort de marcha (al tratarse de sistemas guiados), que debe ir acompañado por la facilidad y comodidad de uso del sistema a lo largo de todas las etapas del viaje. En este sentido, la integración a nivel de red en sistemas de información al viajero y la incorporación a sistemas de integración tarifaria contribuyen a facilitar el empleo de este tipo de modos, y por tanto a aumentar su potencial atractivo para la captación de nuevos usuarios. Por otra parte, suele resaltarse que la implantación de sistemas de metro ligero o tranvía moderno puede conllevar un notable impacto en los usos del suelo, propiciado no solo por las mejoras de accesibilidad urbana o metropolitana, sino también por la sensación de permanencia a largo plazo que le confiere el hecho de haber supuesto una elevada inversión, que es percibida por tanto como menos reversible que otro tipo de actuaciones. Asimismo, tal como se había comentado ya de forma más general en el epígrafe 2.2.1, los proyectos de implantación de nuevas líneas de metro ligero o tranvía moderno suelen incluir importantes actuaciones de renovación urbana o de regeneración del entorno, las cuales pueden llegar a representar una parte muy elevada de los costes de construcción del proyecto.

Según datos de la Asociación Internacional de Transporte Público (UITP, 2015) recogidos entre 2014 y 2015, los sistemas de metro ligero (LRT) y tranvía están presentes en 388 ciudades en el mundo, de las cuales 206 se encuentran en Europa. La infraestructura correspondiente totaliza 15,618 km de longitud de vía a nivel mundial, con 32,245 paradas o estaciones. En cuanto a su utilización, se contabilizan en este tipo de sistemas 13,600 millones de pasajeros al año, lo que representa el 3% del número mundial de usuarios del transporte público. Estos datos ponen de relevancia el protagonismo de los modos basados en ferrocarril ligero como sistemas de transporte público urbano y metropolitano.

#### **2.2.4. Sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio**

Para introducir el tema de los modos de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia basados en autobuses (sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada, autobús de alto nivel de servicio, etc.) resulta conveniente remontarse a los orígenes del concepto de *Bus Rapid Transit* (BRT). En este sentido, se considera que el primer sistema moderno de BRT fue inaugurado en 1974 en la ciudad brasileña de Curitiba, siendo concebido como un sistema de transporte público masivo (*mass-transit*), orientado por tanto hacia una alta capacidad de transporte de viajeros y hacia una elevada velocidad de operación. La Administración Federal de Transporte Público de EE.UU. (FTA, *Federal Transit Administration*)<sup>44</sup> y el Instituto para la Política de Transporte y Desarrollo (ITDP, *Institute for Transport and Development Policy*)<sup>45</sup> definen el concepto de *Bus Rapid Transit* (BRT) como un sistema de transporte público de alta calidad y basado en autobuses capaz de proporcionar servicios rápidos, confortables y eficientes en costes. Este tipo de sistema se presenta dotado de unas características situadas a un nivel similar al de los sistemas de metro ligero (*light rail*) de mayores prestaciones y capacidad, e incluso parejo al de sistemas de metro convencional. Por su parte, la Asociación Americana de Transporte Público (APTA, *American Public Transportation Association*) define el BRT como una serie de elementos que crean una experiencia de transporte público rápido de alta calidad mediante el uso de vehículos con neumáticos. Esta experiencia incluye a menudo un alto grado de rendimiento del sistema (especialmente en cuanto a velocidad y fiabilidad), facilidad de uso, cuidada atención a los aspectos

<sup>44</sup> <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/bus-rapid-transit> [Último acceso: 22/01/2020]

<sup>45</sup> <https://www.itdp.org/library/standards-and-guides/the-bus-rapid-transit-standard/what-is-brt/> [Último acceso: 22/01/2020]

estéticos, y un planeamiento completo que incluye los usos asociados del suelo (APTA BRT Working Group, 2010).

Para obtener todas estas características, el ITDP identifica cinco elementos básicos para aquellos sistemas de *Bus Rapid Transit* que podrían ser calificados como *'full-BRT'*:

- Disponibilidad de una infraestructura o porción de sección transversal dedicada al sistema de BRT, ya sea con categoría B o A, pero evitando en todo caso la circulación en tráfico mixto, en la que los autobuses se verían afectados por los niveles de congestión existentes.
- Preferencia por corredores o plataformas de inserción central que mantengan a los autobuses alejados de los carriles laterales más próximos a los bordillos o aceras, donde los vehículos particulares suelen realizar movimientos más conflictivos (maniobras de aparcamiento, detenciones, giros, etc.).
- Tratamiento preferencial en intersecciones, no solo por medio de prioridad semafórica, sino también mediante la prohibición de giros de vehículos particulares que atraviesen los carriles utilizados por los autobuses.
- Sistema de pago de tarifas situado fuera de los autobuses (es decir, en las estaciones o paradas), reduciendo con ello los retrasos generados en el acceso de pasajeros a los autobuses que se producirían cuando el pago se realiza a bordo.
- Acceso a nivel entre los vehículos y los andenes, con lo que se facilita y agiliza la entrada y salida de viajeros y se permite la plena accesibilidad de pasajeros con dificultades de movilidad, sillas de ruedas, carritos para niños, etc.

Otras características frecuentes en los sistemas de BRT de mayor capacidad son la agrupación de varias líneas de autobús a lo largo de un único corredor (dando lugar a frecuencias muy elevadas de circulación de autobuses), la sustitución del concepto de paradas por el de estaciones (a veces incluso con control de entrada a la propia estación y con puertas corredizas para el acceso desde el andén a los vehículos), la disposición de carriles adicionales de rebase a la altura de las estaciones, y la utilización de autobuses con características especiales, como un mayor número de puertas y/o una mayor anchura de las mismas (véase ejemplo gráfico de algunas de estas características, junto con varias de las anteriores, en la Figura 2.2).

La implementación conjunta de toda esta serie de características ha dado lugar a ejemplos paradigmáticos de grandes sistemas de transporte público masivo de tipo BRT, como puede ser el caso del TransMilenio de Bogotá (puesto en servicio a finales del año 2000) como ejemplo más conocido. Así, los sistemas de tipo BRT han experimentado una notable expansión principalmente en América Latina, pero también en otros continentes o áreas geográficas del mundo como Asia, América del Norte, o Australia.

Sin embargo, es evidente que las características urbanísticas de diferentes ciudades y sus necesidades de transporte y movilidad son muy distintas entre sí, especialmente entre ciudades y áreas metropolitanas de diferentes tamaños así como entre distintas áreas geográficas del mundo, donde la configuración espacial de las ciudades, el reparto de los usos del suelo, los niveles de densificación o el tipo de trama urbana suelen ser muy diferentes. Por tanto, no en todas las ocasiones resulta posible, ni deseable, la adopción de todos los elementos que dan forma a los sistemas BRT de transporte público masivo (es decir, de alta capacidad), sino que se requiere la adaptación de las características generales del sistema a las condiciones particulares de cada ciudad y, más en concreto, de cada corredor, eje o itinerario.



**Figura 2.2.** Sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) de alta capacidad en la ciudad brasileña de Curitiba (Linha Verde 550).

Fuente: Wikimedia Commons <sup>46</sup>.

Así pues, en el contexto de Europa los conceptos básicos que conforman la idea original de BRT precisan ser adaptados a las características urbanas y otras ‘condiciones de contorno’ que resultan comunes en las ciudades europeas, tales como viario estrecho (sobre todo en los centros de las ciudades), uso relativamente alto del transporte público en los núcleos urbanos, áreas periféricas de densidad media-baja, preferencia asentada por la implantación de modos ferroviarios, solidez de las instituciones y de los operadores, disponibilidad de tecnologías avanzadas para los sistemas de información y para los vehículos, y menguada disponibilidad de fondos para la implantación de nuevos modos (Heddebaut *et al.*, 2010).

Surge de este modo la adaptación o evolución del concepto inicial de BRT —concebido como modo de transporte público masivo— hacia un sistema de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia. Se procura adoptar por tanto las características básicas comunes que definen a este tipo de sistemas (modos fundamentalmente en superficie, con intersecciones a nivel; circulación mayoritaria en plataforma reservada de categoría B; dotación de sistemas de priorización semafórica del transporte público), pero con una orientación más enfocada hacia la integración urbanística con el entorno y hacia la calidad y nivel de servicio ofrecido a los potenciales usuarios que hacia la maximización de la capacidad de transporte de viajeros, ya que en muchos contextos la capacidad máxima que podrían llegar a permitir este tipo de sistemas es más que suficiente para atender las necesidades de la demanda.

Así, en el ámbito europeo (especialmente en Francia), se ha planteado la utilización del concepto de Autobús de Alto Nivel de Servicio (abreviadamente BHLS, *Bus with High Level of Service*) para referirse, de una forma bastante amplia y genérica, a este tipo de adaptaciones (Heddebaut *et al.*, 2010; COST Action TU0603, 2011). En efecto, en la Acción COST TU0603 se define el Autobús de Alto Nivel de Servicio o BHLS como “*un sistema basado en autobuses, claramente identificado, que constituye un elemento de la red primaria de transporte público. Ofrece a los pasajeros un muy buen rendimiento y nivel de confort, tal como un sistema de tipo ferroviario, desde una terminal a otra y en las estaciones o paradas, en los vehículos y durante el viaje. El enfoque como ‘sistema’ comprendiendo la infraestructura, los vehículos y las herramientas de operación tiene objetivos coherentes y permanentes de acuerdo a la red de*

<sup>46</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linha\\_Verde\\_Curitiba\\_BRT\\_02\\_2013\\_Est\\_Marechal\\_Floriano\\_5978.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linha_Verde_Curitiba_BRT_02_2013_Est_Marechal_Floriano_5978.JPG) [Último acceso: 22/01/2020] (Autor: Mario Roberto Durán Ortiz; Licencia: Creative Commons Attribution Share-Alike 3.0 Unported).



*movilidad y al contexto de la ciudad*" (COST Action TU0603, 2011: p. 20). En este mismo documento de la Acción COST TU0603 se señalan tres indicadores relacionados con el nivel de servicio que se consideran como estratégicos: la puntualidad y regularidad, la frecuencia, y la velocidad (de operación). Para asegurar mejoras en estas tres cuestiones se identifica como elemento infraestructural clave la disponibilidad de una plataforma reservada adecuadamente diseñada y equipada, la cual se mantiene mayoritariamente en superficie (con alguna posible excepción puntual) por motivos de asequibilidad de costes. Otros aspectos que se advierten como importantes en el diseño de un servicio de BHLS atractivo para el usuario son los relacionados con la intermodalidad con el resto de la red de movilidad, la amplitud de horarios de servicio, la información al usuario, el confort, la seguridad, la accesibilidad (tanto a las paradas o estaciones como en el acceso a los vehículos), etc. Adicionalmente, se considera que la clara identificación del sistema dentro de la red de transporte público y la diferenciación con respecto al resto de líneas de autobús convencional desempeñan un papel relevante para el éxito de los sistemas de BHLS. En relación con este tipo de modo de transporte público, la Figura 2.3 ilustra gráficamente un ejemplo de un sistema de BHLS.



**Figura 2.3.** Sistema de BHLS (línea T1 o Tango+) en la ciudad de Nîmes (Francia).

Fuente: Margarita Novales.

Con respecto a las designaciones dadas en la práctica a esta clase de sistemas, cabe apuntar que los límites entre el uso de las denominaciones BRT y BHLS (esta última restringida prácticamente solo a Europa) son bastante difusos, siendo habitual que los sistemas que podrían calificarse como BHLS más completos (o *'full BHLS'*, de acuerdo a la categorización planteada por COST Action TU0603 (2011)) reciban también la denominación de BRT, la cual está bastante más extendida y popularizada a nivel general. Además, a veces se emplea particularmente el nombre comercial dado al sistema o línea en una determinada ciudad, o incluso denominaciones alternativas tales como *'metrobús'*. En cualquier caso, para referirse de una forma más genérica a los modos de capacidad intermedia basados en vehículos de tipo autobús probablemente la denominación más descriptiva e inclusiva sería *'sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada'*. Al respecto, Vuchic (2002) señala que en este tipo de casos la designación de BRT se utiliza más bien como una marca comercial de *'venta'*, pero que técnicamente el nombre correcto sería *'Bus Semirapid Transit'* (BST).

En la práctica, los modos de capacidad intermedia basados en autobuses (sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada, reciban la denominación de BHLS o 'hereden' la de BRT) se fundamentan en gran medida en la intención de transferir las características operativas, prestaciones y comodidades para el usuario típicas de los sistemas ferroviarios ligeros urbanos o metropolitanos (metro ligero o tranvía moderno) a modos de transporte público que simplemente utilicen autobuses, es decir, a sistemas de rodadura neumática. Esto permite evitar muchos de los costes de inversión relativamente elevados que están ligados al uso de tecnologías ferroviarias, al mismo tiempo que se procura mantener para los potenciales usuarios una experiencia de viaje y un nivel de servicio lo más cercanas posible a las de los sistemas de metro ligero o tranvía moderno.

Así pues, las paradas de los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada suelen concebirse con unas características similares a las de metro ligero o tranvía moderno, tanto en lo que concierne a la distancia entre paradas (con valores medios aproximadamente entre 400 y 600 m, aunque bastante variables entre centros urbanos y zonas metropolitanas), como en el diseño y equipamiento de las propias paradas. Cabe destacar por tanto la fuerte presencia visual de las marquesinas, la dotación de sistemas de información al viajero (normalmente en tiempo real), así como la habitual disponibilidad de sistemas de preadquisición del billete o título de viaje (máquinas de autoventa en las paradas, etc.), a veces complementada con la instalación de dispositivos de validación a utilizar por los propios usuarios en el interior de los autobuses.

Del mismo modo que en los sistemas ferroviarios ligeros urbanos y metropolitanos, una medida importante para facilitar el uso de este tipo de transporte público puede ser la implantación de aparcamientos disuasorios, normalmente en paradas periféricas estratégicas o en el borde exterior de los núcleos urbanos. Se pretende con ello disminuir el acceso de vehículos particulares a las áreas centrales de las ciudades. Por otra parte, también es frecuente —al igual que en los sistemas de metro ligero o tranvía moderno— que se procure favorecer la intermodalidad con modos alternativos o no motorizados, para lo cual una medida habitual es la incorporación de aparcamientos de bicicletas a las paradas o estaciones.

En cuanto a las limitaciones de trazado, en principio estas no son más que las normalmente impuestas para el uso convencional de los autobuses como cualquier otro vehículo de carretera, con radios de giro mínimos que no suelen sobrepasar los 12.5 m, incluso para autobuses articulados y biarticulados. Sin embargo, no resulta conveniente —siempre que no sea estrictamente necesario— recurrir a valores extremos, ya que, además de perjudicar la velocidad de operación, radios de giro muy reducidos pueden influir negativamente en el confort de marcha para los viajeros. En este sentido, se suele procurar que, a imitación de los sistemas de metro ligero o tranvía moderno, las plataformas reservadas para autobuses atraviesen centralmente las glorietas o rotondas.

Los vehículos empleados en los sistemas de BHLS y BRT pueden ir desde autobuses estándar como los utilizados normalmente en líneas convencionales hasta autobuses con diseños especiales concebidos para este tipo de sistemas. En general se considera preferible esto último: por una parte por una cuestión de visibilidad e identificación del sistema, por otro lado porque suelen diseñarse con un mayor número de puertas o con puertas de anchura especial. Es frecuente en los sistemas de BHLS y BRT el uso de autobuses articulados, aunque dependiendo de las necesidades particulares (adaptación de la capacidad al volumen de demanda) pueden encontrarse también autobuses biarticulados o autobuses rígidos convencionales. Las longitudes típicas de estos vehículos se sitúan en torno a 18 m para los autobuses articulados, alrededor de 12 m para los autobuses rígidos, y en torno a 24–25 m para los biarticulados. La anchura más común para los autobuses es de 2.55 m, aunque a veces se pueden encontrar variantes ligeramente más anchas o estrechas. Por otra parte, actualmente se considera casi un estándar que los autobuses dispongan de piso bajo en la práctica totalidad del vehículo<sup>47</sup>, lo que los aproxima en este aspecto a los vehículos de metro ligero o tranvías modernos. No obstante, el correcto

---

<sup>47</sup> En cambio, muchos de los sistemas tradicionales de BRT de transporte masivo utilizan autobuses de piso alto combinados con andén elevado en las estaciones o paradas.

posicionamiento de los autobuses junto al andén de las paradas es más dificultoso que en los sistemas ferroviarios (salvo que dispongan de algún tipo de sistema de guiado automático), por lo que las condiciones de acceso a nivel no son tan perfectas como en los modos ferroviarios. En este sentido, se utilizan en ocasiones pequeñas rampas desplegadas instaladas bajo las puertas de los autobuses, aunque hay que tener en cuenta que su accionamiento puede aumentar los tiempos de detención en parada.

En los sistemas basados en autobuses, las capacidades estáticas por vehículo, para una densidad media de pasajeros de pie alrededor de 4 prs/m<sup>2</sup>, se situarían en unos entornos aproximados de 64–68 prs/veh para los autobuses rígidos de 12 m, de 98 a 115 prs/veh para los articulados de 18 m, y entre 120 y 150 prs/veh para los biarticulados<sup>48</sup>. Además, en el caso de los autobuses no existe la posibilidad de acoplamiento de vehículos para formar una composición (salvo algunos casos puntuales de carácter excepcional o experimental). Estos datos implican que en una comparación típica entre los dos tipos de vehículos que se pueden considerar más comunes en sistemas de capacidad intermedia (tranvías o metros ligeros en el entorno de los 35 m de longitud y autobuses articulados de aproximadamente 18 m), la capacidad estática de las unidades de transporte de los modos ferroviarios ligeros es aproximadamente el doble —o un poco mayor— que la de los autobuses (Novalés *et al.*, 2014). Por tanto, para una misma frecuencia de operación determinada la capacidad dinámica en servicio de los sistemas basados en autobuses resultaría ser aproximadamente la mitad que en el caso de los modos ferroviarios ligeros. Inversamente, para proporcionar una misma capacidad dinámica del servicio es necesario para los sistemas de autobuses doblar aproximadamente la frecuencia de operación que se utilizaría para los modos ferroviarios ligeros (lo cual, por otra parte, conlleva una reducción a la mitad del intervalo de paso entre vehículos, disminuyendo con ello los potenciales tiempos de espera de los viajeros en las paradas).

Las tecnologías de alimentación de energía para la propulsión de los autobuses pueden ser diversas, incluyendo desde la motorización diésel convencional (con estándares de limitación de emisiones como el Euro VI) hasta sistemas de alimentación eléctrica de tipo *trolley* (con cables aéreos de contacto y pértiga entre estos y el vehículo). También es posible encontrar autobuses híbridos (tecnología diésel-eléctrica), autobuses adaptados al uso de gas natural vehicular —más habitualmente como gas natural comprimido (GNC/CNG) que en forma de gas natural licuado (GNL/LNG)—, autobuses eléctricos puros con baterías a bordo (con o sin carga de oportunidad en ciertas paradas o terminales), e incluso, aunque menos desarrollados y en algunos casos todavía en fases experimentales, autobuses con pila de combustible (*fuel cell*), sistemas de alimentación eléctrica inductiva, etc. Todo este tipo de tecnologías persiguen disminuir el impacto ambiental en forma de emisiones atmosféricas (sobre todo locales, aunque también de efecto global) que tradicionalmente se asocia a los sistemas de autobuses<sup>49</sup>. Al mismo tiempo, el uso de tecnologías distintas al motor de combustión disminuye los niveles de ruido generados por el transporte público.

Similarmente a lo que sucede con las tecnologías de alimentación de energía, también es posible encontrar una notable variedad de posibilidades en lo que al guiado de los vehículos se refiere. En cualquier caso, el guiado manual por parte del conductor (como en los autobuses comunes) es la opción ampliamente dominante. Para el guiado automatizado de los vehículos existen diversas posibilidades como el guiado mecánico (rodillo de eje horizontal instalado en las ruedas en contacto con un bordillo vertical, lo que normalmente requiere una infraestructura especializada de categoría A)<sup>50</sup>, el guiado óptico (caso del TEOR de Rouen en las inmediaciones de las paradas y del 'TRAM' de Castellón<sup>51</sup>), e incluso se ha experimentado con sistemas de guiado magnético, aunque este último tipo ha sido en

<sup>48</sup> Véase información más detallada sobre la capacidad estática de los vehículos de autobús en el epígrafe 5.3.1 de esta tesis.

<sup>49</sup> En este aspecto, los modos ferroviarios ligeros, al estar plenamente electrificados, gozan históricamente de una mejor imagen pública.

<sup>50</sup> Como ejemplos de autobuses con guiado mecánico se pueden citar el Cambridgeshire Guided Busway, una parte del Leigh-Salford-Manchester Bus Rapid Transit (ambos en Inglaterra) y el sistema O-Bahn (Essen y Adelaida).

<sup>51</sup> Transporte Metropolitano de La Plana, antiguamente denominado TVRCas.



ocasiones abandonado por el problemático funcionamiento de esta tecnología (Phileas en Eindhoven, Países Bajos). En todo caso, los sistemas de guiado automatizado deben permitir igualmente el guiado manual del autobús cuando el vehículo abandone las zonas o tramos en los que esté implantado el guiado automático.

Por otra parte, las consideraciones que se puedan hacer con respecto a aspectos complementarios —no por ello menos importantes— como la integración de las líneas de BHLS/BRT en sistemas más amplios de información al viajero (incluyendo preferentemente facilidades para la realización de viajes multimodales), o la incorporación en sistemas de integración tarifaria, no dejan de ser en realidad muy similares a las que sean aplicables a los sistemas ferroviarios ligeros urbanos y metropolitanos como el metro ligero o el tranvía moderno.

Una cuestión sobre la que en cambio existen bastantes dudas es si los sistemas de autobuses en plataforma reservada son capaces de generar unos impactos en los usos del suelo a un nivel similar al de los modos ferroviarios ligeros urbanos, ya que la visibilidad y permanencia a largo plazo de los sistemas de autobuses no son tan claras como en los metros ligeros y tranvías. Por otra parte, la incorporación de actuaciones de regeneración o renovación urbanística en los proyectos de implantación de líneas de BHLS/BRT depende en último término de los objetivos generales del proyecto y de las necesidades concretas de cada caso, aunque por lo general dichas actuaciones no suelen ser tan potentes como en el caso de los metros ligeros y tranvías modernos (lo cual no deja de ser una cuestión directamente relacionada con el presupuesto de inversión destinado al proyecto), salvo en algunas realizaciones francesas.

Según datos de Global BRT Data<sup>52</sup>, en enero de 2020 había en el mundo 172 ciudades en las que se hubiese implantado algún sistema de transporte público que pueda ser considerado como BRT (en un sentido bastante amplio) o similar, de las cuales 44 (aproximadamente la cuarta parte) se situarían en Europa. La longitud total de todos los sistemas de BRT o similares contabilizados en el mundo asciende a 5,163 km, sirviendo a más de 33.8 millones de pasajeros por día (solo el 4.8% de ellos en Europa, lo que da muestra de que los sistemas BHLS/BRT europeos no se caracterizan por estar enfocados al transporte masivo de viajeros).

### **2.2.5. Los modos de capacidad intermedia dentro del espectro de sistemas de transporte público urbano y metropolitano**

A continuación, en la Tabla 2.2, se resume la estructura general de clasificación en la que cabría encuadrar a los sistemas de transporte público urbano y metropolitano basados, por una parte, en tecnologías de tipo ferroviario, y, por otra, en vehículos de tipo autobús. Esta estructura permite contextualizar mejor el lugar que los modos de capacidad intermedia (en este caso equivalentes a los sistemas ‘semirrápidos’) ocupan dentro del amplio espectro de sistemas de transporte público urbano y metropolitano, así como perfilar los posibles paralelismos existentes entre los modos o sistemas que utilizan uno u otro tipo de tecnología. A nivel jerárquico (de acuerdo fundamentalmente a su capacidad, velocidad de operación y alcance territorial), se agrupan estos sistemas en ‘rápidos’ (*rapid transit*), ‘semirrápidos’ (*semirapid transit*), y convencionales (*street transit*). Estos tres niveles corresponden de una forma bastante precisa a aquellos modos que disponen de infraestructuras de circulación con tipos de sección transversal de las categorías A, B y C, respectivamente. Así pues, se indican en la tabla los tipos de modos basados o bien en tecnología ferroviaria o bien en vehículos de autobús que pueden ser incluidos en cada nivel o categoría.

<sup>52</sup> <https://brtdata.org/> [Acceso: 22/01/2020]

**Tabla 2.2.** Estructura general de clasificación de los sistemas de transporte público urbano y metropolitano basados en tecnologías ferroviarias y en autobuses.

Grupo general de sistemas	Categoría de infraestructura o sección transversal	Tipo de tecnología de los sistemas	
		Ferroviaria	Carretera/Autobuses
Sistemas 'rápidos' ( <i>Rapid Transit</i> )	A	· Ferrocarril de cercanías · Metro · LRRT ( <i>Light Rail Rapid Transit</i> )	· 'Full-BRT' (BRT 'original' de alta capacidad)
Sistemas 'semirrápidos' ( <i>Semirapid Transit</i> )	B	· Metro ligero (LRT) · Tranvía moderno	· 'BRT-Heavy' · BHLS ('full BHLS')
Sistemas convencionales ( <i>Street Transit</i> )	C	· Tranvía tradicional o clásico	· Autobús con carril-bus · Autobús convencional en tráfico mixto

### 2.3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE TRANSPORTE FERROVIARIO URBANO O METROPOLITANO Y SISTEMAS BASADOS EN AUTOBUSES

#### 2.3.1. Estudios comparativos

##### 2.3.1.1. Análisis de carácter generalista o cualitativo

El debate sobre el recurso excesivo a sistemas de tipo metro ligero (LRT, *Light Rail Transit*) o tranvía moderno para situaciones en las que un sistema de transporte público basado en autobuses priorizados, de altas prestaciones o con plataforma reservada podría proporcionar resultados similares con costes notablemente menores se remonta ya a varias décadas atrás. Así, suele considerarse a Hensher y Waters II (1994) como los autores que prendieron la mecha de esta duradera e irresuelta controversia. No obstante, existen algunos antecedentes previos en los que ya se cuestionaba la adecuación o conveniencia de ciertas implantaciones de sistemas de LRT.

Así, por ejemplo, Gomez-Ibanez (1985) analizaba los primeros años de experiencia de nuevos sistemas de LRT implantados en las ciudades de San Diego, Calgary y Edmonton, señalando que en materia de incremento de uso del transporte público los resultados fueron modestos en dos de las tres ciudades, pero con costes de operación mayores que los de los sistemas de autobús convencional a los que reemplazaban. Sugiere este autor que los proponentes de estas nuevas implantaciones podrían haber actuado sobrevalorando estratégicamente las bondades de los sistemas de LRT, y que nuevas ciudades que considerasen la implantación de esta clase de sistemas deberían mantener una actitud un poco más escéptica al respecto. Unos años después, Kain (1988) revisa estudios previos sobre el rendimiento en términos de coste-eficacia de modos ferroviarios urbanos/metropolitanos en comparación con sistemas de tipo BRT y concluye que estos últimos no solo son sustancialmente más baratos, sino que además son capaces de ofrecer una calidad de servicio superior a la de los modos ferroviarios para casi todos los tipos de usuarios. Este análisis lo aplica fundamentalmente a las ciudades de la región del Sunbelt (sur de Estados Unidos), señalando un 'compromiso ciego' (*blind commitment*) de los responsables políticos hacia los modos ferroviarios. También Pickrell (1992) indica, en un sentido similar, que los pronósticos que llevaron a los responsables de ocho ciudades de Estados Unidos a abogar por la implantación de proyectos ferroviarios en lugar de otras opciones menos costosas habían sobreestimado seriamente la capacidad de captación de viajeros de este tipo de sistemas e infravalorado los costes de construcción y de operación.

En 1994 se publica el influyente artículo de Hensher y Waters II (1994) en el que se revisan evidencias y puntos de vista sobre los sistemas de tipo LRT en comparación con lo que estos autores denominan sistemas de autobuses priorizados (incluyendo plataformas reservadas, calles 'solo-bus', medidas de priorización semafórica, etc.), señalando que el tipo de operación de estos últimos es mucho más similar al de los sistemas LRT que al de los autobuses convencionales. Se incide en que estos sistemas de autobuses priorizados son capaces de transportar volúmenes comparables de pasajeros a un coste menor que el de los LRT. Se reconoce, por una parte, que los sistemas LRT parecen tener una ventaja en cuanto a que su influencia sobre los usos del suelo promueve una mayor confianza a largo plazo en el transporte público, aunque los sistemas de autobuses en plataforma reservada también podrían ser capaces de alcanzar un impacto similar. Por otra parte, se admite que tanto los sistemas de LRT como los de autobuses priorizados no llegan a tener, en muchos casos, un impacto demasiado alto sobre el reparto modal, a menos que se tomen significativas medidas adicionales para desincentivar el uso del vehículo motorizado privado (especialmente en el caso de automóviles con un único ocupante).

A lo largo de los años posteriores, David A. Hensher ha sido uno de los principales impulsores de este tipo de debate. Así, en Hensher (1999) se propone a las vías exclusivas para autobuses como una eficiente alternativa a los sistemas de LRT considerando los datos disponibles sobre las ventajas y desventajas de ambos sistemas. En este artículo se pone especial énfasis en desmontar los sesgos o ideas preconcebidas introducidas por los defensores incondicionales de uno u otro tipo de sistema. Concluye el autor que en muchas ocasiones un mismo presupuesto invertido en un sistema de autobuses producirá mayores mejoras de accesibilidad que esa misma cantidad gastada en una única línea de LRT, ya que el primer tipo de sistema permitirá cubrir un área mucho mayor y servir a más población. Sin embargo, no resultará tan atractivo para políticos y planificadores, por lo que estos son más reacios a proponerlo. También apunta que los mecanismos de financiación de ampliaciones de la red de transporte público suelen estar más orientados a proyectos del segundo tipo (línea de LRT) que a mejoras menos concentradas y visibles, como podrían ser las llevadas a cabo en sistemas de autobuses. Con respecto a la comparación entre sistemas, concluye que las vías exclusivas para autobuses aportan en muchos casos un mayor valor a la sociedad en relación al coste de la inversión, y que si se diseñan adecuadamente pueden tener las características de permanencia y visibilidad normalmente asociadas a los sistemas ferroviarios. Dentro de Hensher (2000) se refuta la idea de que los sistemas de LRT tienen un mayor atractivo inherente que los sistemas basados en autobuses, una premisa que el autor considera falsa. Afirma también este prestigioso investigador que las pruebas existentes de ciudades que han invertido en sistemas de autobuses mejorados con plataformas priorizadas similares a las del LRT y con sus mismos tiempos de viaje indican que los sistemas de autobuses de este tipo son igual de eficaces en la atracción de viajeros, pero con un coste mucho menor.

Más recientemente, Hensher (2016) advierte de nuevo sobre la ausencia de consideración seria de los sistemas de *Bus Rapid Transit* (BRT) como alternativa a las propuestas de implantación de modos de tipo LRT, particularmente en varias ciudades australianas. El autor indica que esta preferencia no justificada se basaría nuevamente en factores que califica como ideológicos y emocionales, sugiriendo que buena parte de los prejuicios hacia los sistemas de tipo BRT podrían estar asociados precisamente al uso de la palabra 'bus'. Se señala que los hechos evidencian que un sistema de BRT con infraestructura dedicada es capaz de transportar el mismo número de pasajeros que un sistema LRT por solo un tercio de su coste. Además, resulta flexible y, al mismo tiempo, puede alcanzar un sentido de permanencia similar al de los sistemas LRT. Asimismo, señala el autor que puede gozar de la misma imagen positiva que el LRT si se planea y diseña adecuadamente.

Por su parte, Mackett y Edwards (1998) mostraron ya en su momento unos argumentos en línea con los de Hensher. Estos autores analizaron los efectos de la implantación de nuevos sistemas de transporte público urbano en ciudades de diferentes países del mundo (Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Australia, Hong Kong, Alemania, Suiza, Francia y Austria), la mayoría de ellos de tipo ferroviario. Se llegó a la conclusión de que en la mayor parte de los casos no se habían cumplido las expectativas iniciales. En este sentido, sostienen estos autores que los principales motivos por los que se sobreestimó la

capacidad de captación de viajeros de estos nuevos sistemas estaban relacionados con factores políticos, ya que se concebían las implantaciones de sistemas ferroviarios como un intento de proporcionar una alternativa de transporte público frente al coche notablemente diferente y más atractiva que la ya existente (sistemas de autobuses en la mayor parte de los casos). También indican que se dan muchos ejemplos de uso de tecnologías más sofisticadas de lo necesario, señalando la necesidad de considerar tecnologías más baratas y de abordar los problemas causados por el uso masivo del automóvil de formas más efectivas. Asimismo, se pone sobre la mesa la existencia de tres principales cuestiones a afrontar: contraargumentar la sobrevaloración de los ‘beneficios de imagen’ habitualmente atribuidos a los sistemas de tipo LRT en comparación con los sistemas de autobuses, enmendar los mecanismos de financiación para que busquen obtener el máximo beneficio de las inversiones en transporte público, y corregir los procedimientos analíticos de forma que estos no sobreestimen los beneficios de un nuevo sistema de transporte público.

En Vuchic (2002), entre otras cuestiones relacionadas con el desarrollo del concepto de *Bus Semirapid Transit* (BST) como modo de capacidad intermedia, se incluye una comparación entre este tipo de sistemas y los de ferrocarril ligero (LRT), incorporando también en la misma algunos aspectos relativos al autobús convencional. Por lo que se refiere a las características generales de los dos grandes tipos de sistemas de capacidad intermedia (LRT y, según la denominación propuesta por el autor, BST), Vuchic (2002) incluye una tabla en la que se sintetizan de forma breve pero precisa las principales cualidades de cada una de las dos clases de sistemas, indicando cuál de las dos tipologías ofrece un rendimiento superior en cada uno de estos campos. Por su especial interés, se reproduce dicho cuadro en la Tabla 2.3 de esta tesis.

**Tabla 2.3.** Comparación de las principales características de los sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia de tipo *Bus Semirapid Transit* (BST) y *Light Rail Transit* (LRT).

Característica	Modo		Superioridad
	Bus Semirapid Transit (BST)	Light Rail Transit (LRT)	
Rendimiento del vehículo y confort del pasajero	Bueno	Excelente	LRT
Coste de inversión	Alto	Muy alto	BST
Tiempo de implementación	Corto	Medio	BST
Coste de operación	Menor para demandas ‘bajas’ (medias-bajas)	Menor para demandas ‘altas’ (medias-altas)	—
Imagen del sistema y atracción de pasajeros	Buena	Excelente	LRT
Contaminación del aire y ruido	Considerable	Ninguna	LRT
Interacción con el desarrollo del suelo	Limitada	Excelente	LRT

Fuente: Vuchic (2002)

Por otra parte, Kühn (2002) compara los sistemas de tipo LRT y BRT en materias tales como planificación, costes, capacidad, diseño y construcción, operación y mantenimiento, satisfacción de los pasajeros, imagen, y potencial de desarrollo de los usos del suelo. Concluye este autor que los sistemas de tipo BRT son una buena alternativa para ciudades de tamaño intermedio (en principio hasta 1 millón de habitantes), principalmente en base a cuestiones de eficiencia y contención de costes. No obstante, se reconoce la ventaja de los sistemas de LRT en aspectos como su velocidad comercial, capacidad, atractivo para los usuarios de automóvil y otros factores cualitativos agrupados bajo el concepto de ‘imagen’. Se plantea asimismo que para corredores bien identificados, que alcancen un alto volumen de pasajeros, las líneas de BRT pueden adoptarse como un primer paso hacia una futura conversión a LRT.

Por su parte, Stutsman (2002) analiza los resultados de un estudio real comparando los sistemas de tipo LRT y BRT en un mismo corredor de la ciudad de Los Ángeles, incluyendo número de usuarios, relación

coste-eficacia, impacto ambiental, y respuestas política y de la comunidad. Los resultados reportados indican la superioridad del LRT en materia medioambiental (especialmente en relación al ruido y a los impactos en el tráfico) y en la capacidad de atraer a más nuevos usuarios para el transporte público, mientras que el BRT se muestra un tanto superior en términos de coste-eficacia.

Por otra parte, Hass-Klau *et al.* (2003) recopilan información comparativa entre sistemas de LRT y modos basados en autobuses (autobuses con plataforma reservada, autobuses guiados, y autobuses con carril-bus) en relación con sus características técnicas, coste de los esquemas, necesidad de medidas complementarias, y resultados de incremento de uso del transporte público y reducción de la utilización del automóvil particular. En los aspectos técnicos, los sistemas LRT se muestran ligeramente superiores en términos de espacio utilizado, velocidad, capacidad, confort, polución y ruido, si bien es cierto que los sistemas de autobuses —con las medidas adecuadas— podrían llegar a igualarlos en capacidad y velocidad, observándose además una gran mejora de los autobuses modernos en materia de contaminación ambiental. En cuanto a costes, la infraestructura de los autobuses en plataforma reservada resulta en general bastante más barata, aunque sostienen estos autores que la diferencia es menor que la normalmente asumida, especialmente cuando se trata de sistemas de autobuses con guiado automático. Los datos sobre costes de operación son bastante variables, pero en general se encuentra que el LRT es más barato de operar que los sistemas de autobuses solamente si transita con altos niveles de ocupación, pero no en otros casos. En cuestión de medidas complementarias, estas suelen ser más indispensables para los sistemas de autobuses, pero sin embargo resultan en la práctica más fáciles de implementar en las realizaciones de LRT. En cuanto al posible incremento de uso del transporte público y reducción del empleo del automóvil particular, la información disponible parece indicar que estos resultados dependen más de medidas complementarias rigurosamente aplicadas (desincentivando el uso del automóvil particular) que de si el modo de transporte público es ferroviario o se basa en autobuses. No obstante, se apunta —a través de un ejemplo en Calgary— que los viajeros pertenecientes a grupos con altos ingresos son más proclives a viajar en LRT que en sistemas de autobuses.

Por su parte, McBrayer (2003) sugiere que tanto LRT como BRT no dejan de ser diferentes expresiones de un mismo concepto, por lo que propone un nuevo término que abarque a ambas formas bajo la denominación de '*Rapid Light Transit*' (RLT). Así, se indica por parte de este autor que es la satisfacción de un determinado conjunto de características funcionales y no tanto la elección de una tecnología específica (ferroviaria o basada en autobuses) lo que debe determinar las soluciones a aplicar a un determinado corredor. Se incluyen también resultados comparativos de costes, concluyéndose al respecto que la construcción de sistemas basados en autobuses es generalmente menos cara que la de alternativas ferroviarias y, para volúmenes de pasajeros relativamente bajos, la operación resulta menos costosa. Para altos niveles de demanda, la operación de sistemas basados en autobuses es más cara, aunque la combinación de los costes de capital y de operación puede seguir siendo menor que en la opción ferroviaria.

Posteriormente, Zhang (2009) lleva a cabo un metaestudio comparativo entre sistemas de tipo ferroviario y sistemas basados en autobuses (no solo de capacidad intermedia), centrado principalmente en los costes de capital, en los costes de operación, en la capacidad, y en el impacto en el valor de las propiedades e inmuebles, así como en la densidad residencial necesaria para justificar cada modo de transporte público. En relación con la comparación directa entre LRT y BRT, se apunta como conclusión que los sistemas de BRT disponen del potencial necesario para superar al LRT a la hora de proporcionar una capacidad de servicio entre moderada y alta con unos niveles de costes de capital y de operación más contenidos, particularmente en áreas que presenten unas densidades de población y de empleos moderadas.

Por su parte, De Bruijn y Veeneman (2009) analizan las dificultades encontradas en los procesos de toma de decisiones a nivel local para la implementación en ciudades de los Países Bajos de sistemas de LRT. En relación con la supuesta irracionalidad de la que frecuentemente se acusa a la toma de decisiones favorables a los sistemas de LRT, estos autores consideran que los juicios sobre si el ferrocarril ligero es o no la solución correcta en cada caso no deben limitarse a analizar únicamente el

rendimiento de la tecnología de transporte. En una visión más amplia, que incluya la revitalización de los centros de las ciudades, nuevos desarrollos inmobiliarios, un transporte más 'verde' y la remodelación del viario existente, los sistemas LRT pueden ser considerados, según estos autores, como la decisión racional con capacidad para conjuntar a los distintos actores implicados e impulsar la mejora integral de las opciones de movilidad en las regiones afectadas. Los sistemas basados en autobuses carecerían en cambio de esta capacidad de movilización de los diferentes agentes.

En Francia, en paralelo al surgimiento del concepto de Autobús de Alto Nivel de Servicio (BHLS), el antiguo CERTU<sup>53</sup> (Rabuel, 2009) ofrece una comparación bastante completa entre este nuevo modo de transporte público y el tranvía moderno, incluyendo también en el análisis a algunos modos híbridos o intermedios como los tranvías sobre neumáticos. Se indica que los tranvías modernos y los sistemas BHLS pueden proporcionar un nivel de servicio similar en términos de frecuencia, amplitud de horarios, velocidad y regularidad. Se apunta sin embargo una mejor posición del tranvía en cuanto a niveles de confort, accesibilidad e imagen, aunque los adelantos desarrollados en torno a los autobuses (diseño, sistemas de guiado, etc.) también han supuesto mejoras en este sentido. En materia de costes, los datos aportados resultan claramente favorables a los sistemas BHLS en cuanto a costes de implantación de la línea (excluyendo los costes de regeneración urbanística, que son independientes del sistema elegido), coste de los vehículos (a pesar de que la vida útil esperada es aproximadamente el doble en el caso de los tranvías) y costes de operación. Como conclusión, se indica que cada sistema resulta adecuado en mayor o menor medida según la situación específica y los objetivos buscados por las autoridades competentes.

Por otra parte, Deng y Nelson (2011) indican como conclusión de su revisión sobre los desarrollos efectuados en el campo de los sistemas BRT que estos, si están adecuadamente diseñados y operados, pueden proporcionar un servicio de transporte de alta calidad, comparable al de un modo ferroviario, pero con un coste relativamente menor y con plazos de implementación más cortos. También apuntan que los sistemas BRT están capacitados para producir efectos significativos en el desarrollo del suelo urbano, aunque señalan que se precisaría más investigación sobre este aspecto.

En López-Lambas y Valdés (2013) se comparan varias experiencias europeas con sistemas de BHLS y de tranvías. En general se sostiene que los sistemas de BHLS permiten combinar la calidad de servicio de los tranvías y los menores costes y mayor flexibilidad de los sistemas de autobuses, proporcionando una solución muy interesante en términos de accesibilidad y admitiendo un amplio rango de niveles de servicio, lo que posibilita que este sistema sea adaptable a diferentes contextos urbanos de tamaño, población, densidad, etc. Se apunta que los costes de inversión en sistemas tranviarios son mucho más altos que en BHLS, siendo también menores para este último el coste de los vehículos y los costes de mantenimiento. Sin embargo, los costes de operación por plaza-km resultarían, según las autoras, mayores para los sistemas BHLS. En general, abogan estas investigadoras por una visión de la red de transporte público basada en la intermodalidad y la comodalidad.

Mientras, en Novales *et al.* (2014) se realiza una revisión general de las características que los sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia (sean de tipo metro ligero o autobuses de alto nivel de servicio) comparten en común, junto con un examen de las principales diferencias que separan a uno y otro tipo. Se señalan diferencias en aspectos tales como el guiado, el tamaño de los vehículos (que influye en las frecuencias del servicio y en las capacidades máximas), el potencial de atracción de viajeros, los costes de implantación, los costes de explotación, el impacto en los usos del suelo, el trazado y capacidad de inserción urbana, el impacto ambiental y eficiencia energética, y la flexibilidad de operación. Se indica que algunas de estas diferencias —como por ejemplo las relativas al potencial de atracción de viajeros no cautivos y a los costes de operación— no están todavía suficientemente clarificadas. Se estima como conclusión que con unas medidas adecuadas de diseño, explotación y marketing los sistemas de BHLS pueden alcanzar parcial o totalmente muchas de las características

---

<sup>53</sup> Centro de estudios sobre las redes, los transportes, el urbanismo y las construcciones públicas (Francia). Actualmente integrado en el CEREMA (Centro de estudios y de experiencia técnica sobre los riesgos, el medio ambiente, la movilidad y la planificación).

positivas de los metros ligeros, tales como el confort de marcha, la eficiencia energética o el impacto sobre los usos del suelo. Sin embargo, estas medidas reducen en cierto modo las ventajas de coste y flexibilidad de trazado y de operación asociadas a los sistemas de autobuses. También se señala que aunque la capacidad de transporte por vehículo de metro ligero es mayor, en muchos casos esta mayor capacidad no resulta necesaria para atender la demanda o bien conduciría a frecuencias poco favorables para la atracción de viajeros.

En un informe de Bentley *et al.* (2016) se recopila información tanto empírica como académica sobre las tecnologías emergentes en el campo de los sistemas de BRT y de LRT, con el objeto de contribuir a informar adecuadamente las decisiones de inversión. Se destaca que existe una aparente convergencia en ciertas facetas de estos dos modos de transporte, tales como confort de marcha, capacidad punta de la línea y uso de fuentes de energía similares, pero al mismo tiempo perviven diferencias fundamentales en la naturaleza de los servicios de transporte público proporcionados. En este sentido, las ventajas facilitadas por los sistemas LRT en términos de impacto en el desarrollo de los usos del suelo, eficiencia en los costes de operación y velocidad ofrecida son todavía significativas. También se apunta que los sistemas LRT tienden a inducir un mayor cambio modal desde el automóvil particular que los sistemas basados en autobuses.

Sin embargo, Ingvardson y Nielsen (2018) realizan una revisión internacional de los efectos producidos por un amplio conjunto de nuevos sistemas de transporte público implantados alrededor del mundo, incluyendo BRT y LRT (además de metro y ferrocarril convencional), y obtienen algunas conclusiones contrapuestas con las anteriores. Se indica que los sistemas de BRT pueden ser capaces de alcanzar efectos considerables en los tiempos de viaje y con ello producir cambios modales significativos, a un nivel similar al de los sistemas de tipo ferroviario. También sostienen, en base a su revisión, que se pueden obtener impactos importantes en el valor del suelo y de las propiedades inmobiliarias independientemente del tipo de sistema elegido. Los resultados del análisis estadístico efectuado por estos autores parecen sugerir que el nivel de los impactos depende más de la medida en la que el nuevo sistema mejora a la situación existente, del escenario de competencia con el viaje en automóvil y de la forma en la que el sistema es implementado en el contexto local que de la propia elección entre sistemas.

Por su parte, Bruun *et al.* (2018) también afrontan el tema de la elección de las soluciones de transporte público centrándolo más en los componentes o características del mismo (tipo de plataforma o sección transversal disponible, propiedades del trazado, características de diseño, etc.) que en la disyuntiva entre tecnologías ferroviarias y sistemas de autobuses. Sus resultados muestran que los costes de inversión se incrementan con el grado de separación de la infraestructura o sección transversal, independientemente de que se trate de una tecnología ferroviaria o de autobuses, aunque en el primer caso existe además un coste adicional de base tecnológica. También una alta velocidad de operación, independientemente del tipo de tecnología, reduce la inversión en vehículos y los costes de operación y mantenimiento. La principal conclusión que proponen estos autores es que, para mejorar la relación valor-coste del transporte público, la labor crítica es desarrollar técnicas constructivas y componentes tecnológicos que sean innovadores, sin que estos tengan por qué ser necesariamente específicos ni de sistemas ferroviarios ni de modos basados en autobuses.

Finalmente, Levine *et al.* (2018) comparan el servicio y el coste de sistemas BRT y LRT de Estados Unidos basándose en la proporción relativa de infraestructura dedicada, encontrando que, cuando se tiene en cuenta este factor, la diferencia de coste entre ambos sistemas es bastante menor de lo habitualmente reportado, con ratios comprendidos entre 2.2:1 y 2.0:1. Una alta proporción de infraestructura dedicada es identificada como un factor fundamental para que los sistemas de BRT alcancen niveles de servicio comparables a los del LRT. Sin embargo, indican estos autores que muchos sistemas implementados en Estados Unidos bajo la etiqueta de BRT carecen de elementos clave como un alto porcentaje de infraestructura dedicada y priorización semafórica. Esta difuminación del concepto de BRT para incluir al denominado 'BRT-Lite' hace que en la práctica los decisores no se encuentren realmente con la sencilla elección entre un sistema de transporte público de alto coste y otro de bajo

coste que sin embargo es capaz de ofrecer similares beneficios, sino entre un sistema de elevados estándares y costes altos (LRT) y otro de bajos estándares y reducidos costes (BRT).

Por otra parte, algunos investigadores han centrado la comparación entre sistemas de tranvía moderno, metro ligero o LRT y sistemas de BHLS o BRT en el estudio de casos concretos. Por ejemplo, Conles *et al.* (2014b) analizan la implantación de un sistema de BHLS en la ciudad francesa de Nantes (Busway o Línea 4), contrastando las características y resultados de esta nueva línea con las de las tres líneas de tranvía preexistentes. Se observa que la línea de BHLS ofrece un nivel de servicio bastante similar al de las líneas de tranvía, estando el sistema de BHLS mejor adaptado a un volumen total de demanda muy inferior al de aquellas, lo que justifica la implantación de un sistema con menores costes de inversión. Por su parte, Rizelioglu y Arslan (2019) comparan el sistema de LRT existente en la ciudad de Bursa (Turquía) con un hipotético BRT que virtualmente sustituyese al primero y que asumiese su misma demanda, analizando mediante simulación el rendimiento de este último en términos de capacidad, confort y costes de operación. De acuerdo a este estudio, el sistema de LRT parece ser más adecuado para este caso particular que el de BRT, especialmente a largo plazo.

En general, los estudios examinados en este epígrafe (2.3.1.1) buscan extraer conclusiones sobre las ventajas e inconvenientes de los sistemas de transporte urbano o metropolitano de tipo ferroviario y de los sistemas basados en autobuses, principalmente a partir del análisis de casos particulares (ya sea en mayor o menor número) y/o del conocimiento u opinión de expertos. En este tipo de estudios se comparan —en muchos casos de forma cualitativa— diversos aspectos relacionados con las características de cada uno de estos dos tipos de sistemas, siendo tratados cada uno de dichos aspectos de manera separada o independiente. Frente a este tipo de aproximación al problema en estudio, la presente tesis trata de aportar un enfoque analítico o racional, basado en lo posible en procedimientos cuantitativos y en el cual se integren las interacciones o interdependencias entre los distintos aspectos que son objeto de análisis (demanda potencial, características o atributos de la oferta, operación del servicio, costes asumidos por los viajeros y atractivo para los mismos, etc.). Se pretende que dicho enfoque resulte teóricamente robusto y que al mismo tiempo presente una validez suficientemente amplia y genérica como para poder ser aplicado —con cierta flexibilidad— a cualquier caso de estudio en particular. Así pues, para materializar este nuevo enfoque resultará necesario recurrir a la modelización formal del sistema de interés que es objeto de estudio. A su vez, la modelización resulta fundamental para poder establecer unas mismas condiciones de contorno en la comparación entre los sistemas basados en ferrocarril ligero urbano y los sistemas basados en autobuses de altas prestaciones, semirrápidos o de alto nivel de servicio, de forma que ambos sean evaluados bajo unas mismas ‘reglas de juego’. La posibilidad de introducir esta igualdad de condiciones supone por tanto una aportación adicional con respecto a la mayoría de los estudios previamente examinados. En cambio, el enfoque asumido en esta tesis, por sus características particulares, no incorpora ciertos aspectos que sí han sido examinados en algunos de los estudios anteriormente referenciados, tales como por ejemplo la sensación de permanencia de los nuevos sistemas y su visibilidad, el potencial de desarrollo de los usos del suelo y de revitalización urbanística, la flexibilidad de trazado y de operación, la imagen positiva para la ciudadanía en general y para la promoción de la ciudad, la respuesta política y de la comunidad, o la estimación de los impactos ambientales (aunque el modelo desarrollado sí es capaz de proporcionar como resultados ciertos parámetros básicos que son imprescindibles para la evaluación de estos impactos).

### 2.3.1.2. Estudios relacionados con la demanda potencial y el atractivo para el viajero

Uno de los primeros estudios que tratan de dilucidar la existencia de una supuesta preferencia sistemática de los viajeros por los modos ferroviarios frente a alternativas basadas en autobuses que ofrezcan los mismos valores de los atributos de servicio más relevantes (frecuencia, velocidad, fiabilidad, precio, ruta, etc.) se debe probablemente a Axhausen *et al.* (2001), que denominan a esta hipotética preferencia ‘*rail bonus*’. Estos autores aprovechan el caso de la ciudad alemana de Dresden, donde en su momento (invierno de 1998-99) algunas líneas de tranvía fueron reemplazadas por servicios de autobuses, para analizar un programa de encuestas que fueron llevadas a cabo por el



operador local y que incluía diarios de viaje y dos tipos de experimentos en preferencias declaradas (SP). Los resultados de las modelizaciones desarrolladas por estos investigadores indicarían una preferencia consistente, aunque débil en magnitud, por los modos ferroviarios, la cual se relaciona fundamentalmente con una menor desutilidad del tiempo a bordo del vehículo y con una mejor valoración de los vehículos tranviarios que de los autobuses, si bien estas ventajas son parcialmente compensadas por una mayor penalización de los transbordos. También se indica que la preferencia por el tranvía parece ser mayor para aquellos viajeros que utilizan más frecuentemente el transporte público.

Con unos objetivos del mismo tipo, Ben-Akiva y Morikawa (2002) utilizan modelos de elección discreta entre modos alternativos de viaje estimados mediante el empleo de datos de preferencias reveladas (RP) y de preferencias declaradas (SP) para analizar si existen o no evidencias de una predilección significativa por los modos ferroviarios frente a los sistemas basados en autobuses. La principal conclusión de este estudio es que los modos ferroviarios (en este caso metro y ferrocarril de cercanías) y los sistemas de autobuses que proporcionen similares atributos de servicio tienen el mismo potencial de atracción de pasajeros, aunque sí se aprecia un cierto sesgo cuando los modos ferroviarios efectivamente ofrecen una mayor calidad de servicio. Estos autores opinan, en base a su análisis, que no existe justificación para la introducción de un sesgo preferencial hacia el ferrocarril en los modelos de elección modal que se empleen para analizar alternativas de transporte público que incluyan modos ferroviarios y sistemas de autobuses de altas prestaciones.

Mientras, Lillo *et al.* (2003) apuntan para los sistemas ferroviarios —o más exactamente sobre un soporte fijo de cualquier tipo— una ventaja (en forma de reducción del coste generalizado de viaje) de entre 2 y 15 minutos generalizados con respecto a los autobuses convencionales, al menos en el contexto cultural de las islas británicas y de la península ibérica. Los valores inferiores de dicho rango corresponderían a viajeros sin acceso al automóvil, mientras que los más altos serían típicos de usuarios de automóvil con rentas altas.

Por su parte, Currie (2005) utiliza un análisis de atributos de viaje con el objeto de examinar el atractivo relativo que los sistemas BRT presentan para los viajeros en comparación con otros modos de transporte público como autobús convencional, LRT y ferrocarril convencional. Dichos atributos de viaje pueden ser divididos entre aquellos que son neutrales entre modos (igualmente valorados por los viajeros para un mismo valor del atributo) y aquellos otros cuya valoración se puede considerar específica de cada modo (en este caso la penalización por transbordo y otros factores agrupados en una constante específica de modo). Los datos empíricos sugieren que los pasajeros valoran los atributos de viaje de una forma bastante similar entre el BRT y los modos ferroviarios, por lo que opina el autor que los sistemas de BRT deberían ser tan eficaces como los ferroviarios a la hora de generar nuevos pasajeros cuando se implantan para reemplazar a servicios de autobús convencional. No obstante, el propio autor reconoce ciertas limitaciones en los datos y la necesidad de investigación adicional. Además, como posibles puntos de mejora de los sistemas BRT se señalan aquellos aspectos relacionados con los transbordos y con la simplicidad de uso para los potenciales pasajeros.

Beirão y Sarsfield-Cabral (2007) realizan un estudio cualitativo, tanto entre usuarios del transporte público como entre automovilistas del área metropolitana de Oporto, sobre las actitudes generales de los viajeros y sobre su percepción de la calidad de servicio del transporte público. Por lo que se refiere a la comparación entre LRT y sistemas de autobús (en este caso de tipo convencional), se indica que los usuarios habituales de automóvil particular tienen una actitud muy positiva hacia el LRT, percibiéndolo superior a los autobuses no solo en atributos tangibles (como fiabilidad y confort) sino también en otros atributos intangibles como el status del transporte y el ambiente o entorno en el que se desarrolla el viaje. Sin embargo, los usuarios habituales del transporte público parecen ser menos entusiastas con el LRT, especialmente los de bajos ingresos. Este tipo de encuestados prefieren un servicio de calidad independientemente del modo de transporte, en línea con los resultados de Ben-Akiva y Morikawa (2002). No obstante, de las actitudes de los encuestados hacia los dos modos se desprende que los

atributos intangibles de uno y otro son percibidos de diferente forma, lo que parece conducir también a una cierta preferencia por el LRT.

Por otra parte, Currie y Wallis (2008) analizan el rendimiento de diferentes medidas de mejora de los sistemas de autobús como medio para incrementar su cuota de mercado en contextos urbanos, basándose en una revisión de la literatura técnica, en la experiencia de los autores adquirida a través de una serie de estudios sobre el tema, y en una encuesta internacional dirigida a expertos en la materia. En relación con las evidencias disponibles sobre el atractivo intrínseco de diferentes modos (factores específicos de modo) indican estos autores que, a igualdad de cualesquiera otros factores, los sistemas ferroviarios pueden ser capaces de atraer un volumen de usuarios algo mayor que los sistemas basados en autobuses, con la posible excepción de aquellos dotados de infraestructura dedicada, sean guiados o no. Por otra parte, como resultado de la encuesta internacional se identifican como características clave para el aumento de la cuota de mercado de los sistemas de autobuses aquellas relacionadas con un incremento de la frecuencia del servicio y con la fiabilidad y velocidad, estando estas dos últimas cualidades más vinculadas a los sistemas BRT que a los autobuses convencionales.

En un informe para la Administración Federal de Transporte Público (FTA, *Federal Transit Administration*) del Departamento de Transportes de EE. UU., Cain *et al.* (2009) tratan de cuantificar la importancia que los factores de imagen y percepción tienen para los sistemas BRT, identificando las distintas características tangibles e intangibles que guían las diferencias apreciadas entre el BRT y otras formas de transporte público. Para ello se estudiaron una serie de grupos focales y se realizaron encuestas actitudinales a usuarios y no usuarios del transporte público en la ciudad de Los Ángeles, elegida por la variedad de sistemas de transporte disponibles. Se encontró que los atributos intangibles tienen una influencia significativa en la percepción de los modos, e incluso parece que las características del área urbana que es recorrida por un servicio de transporte público tienen un impacto más alto en la percepción del modo en cuestión que el hecho de tratarse de un sistema basado en autobuses o en tecnología ferroviaria. A nivel general, se concluye que el BRT (incluso en su forma de menores costes de inversión, como '*BRT-Lite*') puede competir con los modos ferroviarios (al menos en cuanto a la percepción del público general) a cambio de menores costes de inversión de capital. No obstante, la cuestión de si esas percepciones se trasladan a niveles similares de atracción de pasajeros es sin embargo un tema que requeriría mayor investigación.

Por su parte, Jou *et al.* (2010) analizan el comportamiento de viajeros recurrentes (*commuters*) ante el posible cambio modal desde modos de transporte motorizado privado (automóvil y motocicleta) al transporte público (modos ferroviarios o sistema de autobuses) en el área metropolitana de Taipei, empleando un modelo probit multinomial con preferencias declaradas (SP). El comportamiento frente al posible cambio modal parece estar significativamente influenciado por las características socioeconómicas del viajero y por las características del propio viaje. Aunque no parece tratarse de una comparación entre sistemas con una capacidad y características equiparables, los resultados de un análisis de elasticidades indican que, ante un mismo porcentaje de variación de los costes de viaje, la proporción de *commuters* dispuestos a cambiarse al modo ferroviario (MRT, *Metropolitan Rapid Transit*, un sistema de metro realmente) es mayor que el porcentaje de los que se cambiarían al sistema de autobuses. Se observan además algunas diferencias entre los usuarios de automóvil y los de motocicleta. Estos últimos parecen más propensos a cambiarse al sistema de autobús que los usuarios de automóvil, mientras que los automovilistas tienen más probabilidades de cambiarse al sistema MRT que los usuarios de motocicleta.

Scherer (2010) da comienzo a una serie de artículos en los que esta autora, junto con otros coautores, investiga un posible mayor atractivo intrínseco de los modos ferroviarios frente a los sistemas basados en autobuses ('*rail factor*'). En este caso se presentan argumentos en torno a un posible sesgo preferencial basándose en una revisión de la literatura sobre enfoques cognitivos y elecciones racionales, con el foco puesto principalmente en Europa y Norteamérica. La autora trata de explicar la hipotética mayor capacidad de atracción de viajeros de los sistemas LRT a través del enfoque cognitivo, atribuyendo esa preferencia intrínseca a los siguientes tipos de factores: mayor capacidad del LRT para

capturar la atención de los individuos (vehículos nuevos y modernos, diseño especial, visibilidad de la ruta, mayor presencia mediática, etc.); factores cualitativos asociados al LRT al tratarse de un sistema guiado (fiabilidad, confort de marcha); percepciones más favorables sobre el área que rodea a la ruta de la línea de transporte público (los sistemas LRT suelen atravesar zonas más atractivas); y mayor capacidad de los vehículos de transporte público, que según la autora podría actuar como un factor de demanda inducida.

En Scherer (2011), esta autora busca identificar diferencias en la imagen y atribuciones psicológicas asociadas a los dos modos de transporte público más comunes en Suiza (tranvía y autobús), a través del método de diferencial semántico y del análisis factorial. En general, se encontró que la imagen del tranvía no difiere muy significativamente de la imagen del autobús, pero se aprecian diferencias entre distintos grupos de individuos. Así, entre los usuarios frecuentes del transporte público sí se observaría una mejor imagen del tranvía en comparación con el autobús, pero a medida que desciende la frecuencia de uso del transporte público por parte del encuestado también se reduce la diferencia de imagen. De acuerdo a este estudio, la autora cuestiona que los no usuarios del transporte público vayan a variar sus patrones de movilidad dependiendo de si el servicio disponible corresponde a un tranvía o a un autobús si todas las demás características del servicio son iguales. No obstante, las atribuciones sobre las que los tranvías obtienen mejores puntuaciones que los autobuses se relacionan fundamentalmente con el tipo de circulación y con el respeto medioambiental.

Por su parte, en Scherer y Weidmann (2011) se recurre a un análisis de grupos (*cluster analysis*) de los servicios de transporte público de las ciudades suizas de Zúrich y Berna como herramienta para poder comparar los modos ferroviarios y los autobuses bajo condiciones similares, neutralizando las diferencias habitualmente existentes en atributos del servicio como velocidad de viaje y frecuencia y en la densidad residencial y de puestos de trabajo de las zonas servidas. En la investigación descrita no se encuentran evidencias significativas que avalen la existencia de un '*rail factor*'. Así, en los casos investigados de Zúrich y Berna el mayor volumen de demanda de los modos ferroviarios no se explicaría por la presencia de un '*rail factor*', sino porque en las áreas de captación recorridas por los modos ferroviarios (tranvías) existe una mayor demanda potencial (densidad residencial y número de empleos) que en las zonas servidas mediante autobús.

Sin embargo, los resultados reportados por Scherer y Dziekan (2012) sí respaldarían la existencia de una preferencia de base psicológica por los modos ferroviarios ('*psychological rail factor*'), de acuerdo a dos estudios llevados a cabo en Alemania y Suiza. En estos análisis se introduce un enfoque basado en esquemas mentales o '*schemata*' (definidos como paquetes de información sobre el mundo, eventos o personas que se almacenan en la memoria a largo plazo), al mismo tiempo que se tratan de identificar las posibles diferencias de atribuciones asociadas a los modos ferroviarios y a los sistemas de autobuses. Se encuentra que entre el 20% y el 50% de ese '*rail factor*' psicológico se explicaría por aspectos emocionales y sociales (sentimientos positivos, hábitos, etc.). Sin embargo, se reconoce que estos esquemas mentales están influenciados por condiciones locales y en consecuencia no pueden ser generalizados a regiones distintas sin considerar posibles diferencias culturales. Además, se apunta que la familiaridad con un cierto tipo de modo tiende a influir en las preferencias.

Por otra parte, Dell'Olio *et al.* (2012) investigan las preferencias de los viajeros ante dos escenarios diferentes para desplazarse a través de un corredor urbano congestionado: uno en el que el automóvil compite con los autobuses y otro en el que las opciones son el automóvil y un LRT. Se emplea una encuesta en preferencias declaradas y modelos logit mixtos para dilucidar qué variables afectan más a la elección entre modos, así como para calcular el reparto modal resultante. Los autores concluyen que los sistemas LRT pueden ser una alternativa más atractiva que los autobuses, pero para ello necesitan disponer de plataforma propia, operar a frecuencias relativamente altas y tener tarifas competitivas (es decir, no se trataría de una preferencia intrínseca). En cualquier caso, para conseguir una reducción en la utilización del automóvil es preciso actuar con medidas que desincentiven su uso, tales como precios de aparcamiento, tasas a los combustibles y peajes por congestión.

En su tesis de máster, Bunschoten (2012) realiza un interesante estudio sobre la existencia de una preferencia por los modos tranviarios (*'tram bonus'*) frente al autobús (convencional), tomando como campo de estudio varias ciudades de los Países Bajos. En la parte empírica de esta investigación se utilizan encuestas en preferencias declaradas realizadas a través de internet, estimando con ellas modelos logit multinomial (MNL) y logit mixto (ML) para obtener las funciones de utilidad tanto del autobús como del tranvía. Estas funciones de utilidad, a través de sus constantes específicas de alternativa, muestran efectivamente una preferencia por el tranvía en comparación con el autobús, de lo que cabe concluir que el *'tram bonus'* existiría, al menos en el marco de los casos estudiados. Esta preferencia se explicaría por diferencias percibidas en factores que el autor clasifica en tres grupos de aspectos: ambiente de viaje, características de los vehículos, e información de viaje. No obstante, el modelo logit mixto (ML) permite observar que existe una amplia desviación en la magnitud de esta preferencia, lo que implica una importante incertidumbre sobre el valor de dicho *'tram bonus'*. Además, las diferentes tendencias observadas entre distintas ciudades sugieren que la preferencia por el tranvía solo se pone de manifiesto cuando los viajeros están familiarizados con ambos tipos de modos de transporte. Cuando no es el caso, parece que los viajeros tienden a preferir el modo de transporte que ya conocen. Adicionalmente, según esta investigación son los usuarios habituales del transporte público los que tienen una mayor preferencia por el tranvía, mientras que aquellos individuos que apenas usan el transporte público presentarían preferencia por los autobuses. Esta misma investigación se describe también en Bunschoten *et al.* (2013).

Por su parte, Currie y Delbosc (2013) utilizan un modelo de regresión lineal múltiple para tratar de discernir cuáles son las variables o atributos que ejercen una influencia más significativa sobre la captación de viajeros de un conjunto de sistemas de BRT, LRT y tranvía (*streetcar*) en Australia, Europa y América del Norte. Se toma como variable dependiente el número de pasajeros que suben a los vehículos por cada kilómetro recorrido por estos, y como posibles predictores independientes el tipo de modo de transporte, la capacidad de los vehículos, el nivel de servicio, la densidad de empleos y residencial, la tasa de posesión de automóvil, la velocidad, el espaciamiento entre paradas, el tipo de infraestructura o categoría de la sección transversal, la accesibilidad a los vehículos y la integración tarifaria. El modelo de regresión indica que las variables con una influencia más significativa son el hecho de estar situado en Europa, la velocidad, la capacidad de los vehículos, la densidad de empleos, el nivel de servicio y la integración tarifaria. Aunque la demanda media de pasajeros es mayor para los sistemas de tipo ferroviario (LRT/tranvía) que para los BRT, los resultados del modelo sugieren que no es directamente el tipo de modo (predictor no significativo) el que influye en la atracción de viajeros, sino que lo hace a través del tamaño de los vehículos, del nivel de servicio y de la densidad residencial y de empleos, que suele ser mayor en las zonas atravesadas por líneas de LRT/tranvía que en el caso de las líneas de BRT.

Hensher y Mulley (2015) tratan de investigar la influencia de la imagen física de los modos de transporte en la formación de preferencias entre BRT y LRT, utilizando datos recogidos en seis ciudades australianas (en las que los individuos clasificaban por orden de preferencia dos diseños de BRT y dos de LRT presentados como imágenes) para desarrollar un modelo logit mixto (ML). De acuerdo a los resultados generales, parece que los modos basados en autobuses tienen una imagen relativamente negativa, y que los sistemas BRT sufren de una asociación indirecta con los autobuses, apreciándose una marcada preferencia por la imagen de aquellos modos en los que no se utilizan esta clase de vehículos. No obstante, también se encontró que no existen evidencias de este tipo de visión en aquellas ciudades en las que los sistemas BRT están más extendidos que el LRT, lo que supone un factor en favor del BRT. Un aspecto clave destacado por los autores es que la influencia de la imagen es menor cuando los individuos tienen experiencias previas de uso de los modos específicos. De hecho, la experiencia con modos relativamente próximos (como entre LRT y tren, y entre BRT y autobús) también parece presentar cierto efecto. Además, se indica que el nivel de ingresos también influiría en las preferencias basadas en la imagen. Así, ingresos más altos estarían positivamente relacionados con una mayor preferencia por los modos de tipo LRT en relación con el BRT.

Finalmente, Anta (2016) profundiza en su tesis doctoral sobre la posible existencia de una preferencia inherente hacia los modos ferroviarios frente a sistemas basados en autobuses (es decir, sobre el '*rail factor*'), centrando dicho análisis en el campo de los modos metropolitanos de capacidad intermedia (concretamente bajo las formas de LRT y BHLS). Como método de investigación utiliza la estimación de diferentes tipos de modelos de demanda (seleccionando el logit mixto como el más adecuado para tal fin) sobre la base de una serie de encuestas con elecciones en preferencias declaradas (SP) realizadas a la población objeto de estudio —en este caso estudiantes universitarios— en varias ciudades españolas y francesas. Como conclusión general se indica que no se puede aseverar la existencia de un '*rail factor*' de validez 'universal', y que aunque pueda existir una preferencia inherente hacia algunos modos de transporte público en las ciudades estudiadas, la magnitud de dicha preferencia, así como el hecho de que sea favorable a los modos ferroviarios o a los sistemas de autobuses, depende fuertemente del contexto local. En las ciudades francesas se aprecia una preferencia hacia la opción ferroviaria, mientras que las ciudades españolas estudiadas son más favorables a los sistemas de autobuses. Además, la experiencia previa con la red de transporte público parece tener una capacidad explicativa sobre las preferencias bastante mayor en el caso de las ciudades españolas que en las ciudades francesas. Por otra parte, los resultados obtenidos mediante la aplicación de los modelos de demanda sobre una población simulada no muestran una ventaja clara de un tipo de sistema frente a otro en lo que a captación de viajeros se refiere.

Como ha podido observarse a lo largo de este epígrafe (2.3.1.2), buena parte de los estudios previos relacionados con la comparación de la demanda potencial y del atractivo para el viajero de los sistemas de transporte urbano o metropolitano de tipo ferroviario y de los sistemas basados en autobuses se orientan principalmente a dilucidar y/o cuantificar la posible existencia de una preferencia intrínseca hacia los modos del primer tipo, ya sea con la denominación de '*rail bonus*', de '*rail factor*', de '*tram bonus*', etc. En muchos casos se utilizan para ello modelos de elección discreta, procediendo habitualmente a presuponer o prefijar unos determinados valores de los atributos para cada uno de estos tipos de sistemas de transporte (ya que estos estudios suelen estar más focalizados hacia la estimación de los valores de los coeficientes de los atributos o variables explicativas que hacia la modelización de los previsible valores de estas últimas). A diferencia de los estudios anteriores, el modelo comparativo propuesto en la presente tesis presenta como aportación que los valores de las variables indicativas de los atributos (características de la oferta) son calculados de forma dinámica, en función de las condiciones de operación previstas por el modelo según los volúmenes de demanda. A su vez, se incorpora recíprocamente la dependencia de dichos volúmenes de demanda con respecto a los atributos o características de la oferta de transporte.

Por otra parte, bastantes de los estudios precedentes confrontan la demanda potencial y el atractivo para el viajero de sistemas de tipo ferroviario y de sistemas basados en autobuses independientemente de que los modos de transporte público concretamente analizados presenten o no una capacidad y un nivel de servicio relativamente equiparables. En este sentido, la presente tesis contribuye a centrar el análisis comparativo y lo circunscribe a sistemas de capacidad comparable. Así pues, el ámbito de posible solapamiento entre ambos tipos de modos de transporte público se focaliza en los sistemas de capacidad intermedia, y, particularmente, en la comparación entre metro ligero o tranvía moderno y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (con la denominación de BHLS o BRT). Un notable precedente en este mismo sentido lo constituye Anta (2016).

### 2.3.1.3. Estudios centrados en el análisis de costes o en la evaluación de inversiones

Uno de los primeros estudios que incluyen una evaluación comparativa de costes entre modos ferroviarios y algún tipo de sistema de autobuses de prestaciones equivalentes o al menos relativamente similares es probablemente el debido a Stone *et al.* (1992). Estos autores desarrollaron un modelo —en formato de hojas de cálculo— para la estimación de los costes y rendimiento de varias opciones de transporte público, entre las que se incluyen, como modos de mayor interés para el objeto de estudio de esta tesis, un sistema de LRT y un autobús guiado sobre plataforma exclusiva. El modelo global

incorpora submodelos de estimación de los costes de construcción de estructuras, de evaluación del riesgo en cruces a nivel, de distribución de costes (otros costes de construcción, vehículos, estaciones y operación), del tiempo de viaje, y de la adecuación del trazado geométrico, aunque no incluye una estimación endógena de la demanda (a diferencia del modelo que se desarrolla en esta tesis). En relación con el caso de estudio planteado (en el cual el sistema LRT aprovecha en una parte de su trazado unas vías ferroviarias existentes, mientras que el autobús guiado requiere la construcción de una infraestructura dedicada en paralelo al trazado ferroviario), los resultados obtenidos muestran que mientras que ambas opciones ofrecen aproximadamente los mismos tiempos de viaje, el sistema de autobús guiado permite unos costes totales anuales en torno a un 30% menores que el LRT (para una cuota modal del 10% y a pesar de las diferencias en las necesidades constructivas). Esta diferencia de costes provendría principalmente del menor coste de adquisición de los vehículos de autobús, así como de los costes de operación.

Muy posteriormente, Bruun (2005) desarrolla un modelo paramétrico de estimación de costes de operación medios y marginales para la comparación entre LRT y BRT, utilizando datos disponibles de la *U.S. National Transit Database* y aplicándolo a una hipotética red de transporte público que simula la cobertura universal de un área metropolitana de tamaño medio (en el contexto norteamericano), en la cual las líneas troncales o radiales fuesen operadas o bien mediante LRT o bien mediante BRT. Se lleva a cabo un ejemplo computacional en el que se aplican datos de la Agencia de Transporte Público del área de Dallas, siendo necesario, para el caso del BRT, considerar un posible rango de costes de operación que incluye estimaciones relativas tanto con costes altos como con costes bajos. Como resultados particulares se destaca que los costes marginales del LRT y del BRT, en la estimación más baja de este último, son comparables cuando el propósito es incrementar el servicio durante los períodos punta. Sin embargo, con la estimación de costes más alta para el BRT, estos serían, durante dichos períodos punta, un 24% mayores que para el LRT. Señala el autor que para capacidades de las líneas troncales por debajo de 1,600 plazas/h la compensación o balance entre costes e intervalo de servicio resulta favorable al BRT, mientras que por encima de 2,000 plazas/h los intervalos de operación del BRT decrecen tanto que la efectividad de la priorización semafórica se reduce y la velocidad puede verse seriamente afectada. En el caso de los períodos valle (*off-peak*), se indica que los costes marginales de operación para incrementar el servicio son menores para el LRT que para el BRT.

Aunque no se trata exactamente de una comparación con sistemas LRT, Hess *et al.* (2005) examinan en detalle la composición de costes de una muestra de 14 sistemas BRT en ciudades norteamericanas (en su momento recientemente implantados o planificados), con la intención de determinar cómo los amplios rangos de niveles de servicio y de configuraciones tecnológicas afectan a los costes de estos sistemas. Al respecto, los autores ponen el foco en diferenciar dos visiones distintas del BRT: una como una nueva forma de transporte público con elevadas velocidades y características similares al LRT, y otra como una forma de bajo coste de mejorar la calidad e imagen de los servicios tradicionales de autobús. Los autores destacan que la mayor parte de los nuevos sistemas de BRT analizados corresponderían al primero de los grupos, relacionando este hecho con que la mayoría de los programas de financiación favorecen las inversiones de capital sobre las medidas de mejora operativa del transporte público. Esta situación también sería fruto de las preferencias de los responsables políticos por poner en funcionamiento proyectos más visibles y tangibles. No obstante, los autores defienden por su parte la validez y efectividad de las medidas de mejora de bajo coste.

En una línea de investigación distinta, Brand y Preston (2006) presentan el desarrollo de una herramienta informatizada (proyecto TEST) para asistir a los planificadores y operadores en la evaluación estratégica de redes locales de transporte, así como para ayudar en la selección de la tecnología de transporte público más apropiada para corredores urbanos o interurbanos de corta distancia (con hasta 15 variantes de modos de transporte público, incluyendo varios ferroviarios y varios basados en autobuses). Para esta finalidad se combinan características como la integración de modelos de simulación relativos al transporte público y a los efectos sobre el tráfico, la inclusión de efectos de demanda y de impactos ambientales en el coste social total, y la estimación de costes de

operación con datos actualizados para cada modo, con la opción de ajustarlos a las condiciones locales. Como primer módulo se desarrolló un modelo en forma de hoja de cálculo para la obtención del coste social como suma de los costes del operador, de los costes de los usuarios y de los costes externos, calculando costes medios y marginales por pasajero-kilómetro. Posteriormente esta hoja de cálculo fue integrada con un modelo de redes de transporte público y con modelos de redes de carreteras para formar la herramienta informática TEST. En un ejemplo de aplicación del primer módulo sobre una ruta urbana de 12 km, los resultados obtenidos por los autores sugieren que los sistemas basados en autobuses serían la mejor opción para demandas de hasta aproximadamente 30,000 pasajeros/día. Entre 30,000 y 60,000 pasajeros/día serían sistemas de tipo tranvitrén (en caso de ser posible su utilización) los que minimizarían los costes sociales, aunque también otros modos como el LRT estarían cercanos a dicho mínimo. Por encima de 60,000 pasajeros/día serían los sistemas ferroviarios convencionales los que, en este caso de aplicación, parecen minimizar los costes sociales. Por otra parte, los modelos de Brand y Preston (2006) consideran un número limitado y prefijado de períodos horarios (hora punta de la mañana, período intermedio, y hora punta de la tarde) frente al enfoque totalmente multiperíodo aportado por el modelo de la presente tesis. Además, los cambios en la demanda de transporte público se calculan en función de un modelo simple de elasticidades, en lugar del modelo sintético de distribución y de reparto modal que se utiliza en esta tesis como base teórica para la cuantificación de la demanda.

En 2008, la Asociación Alemana de Investigación sobre la Carretera y el Transporte (FGSV, 2008)<sup>54</sup> publica un detallado estudio de comparación de costes desagregados entre un sistema de tranvía moderno o LRT y un servicio totalmente comparable de autobuses sobre plataforma reservada (incluso con la misma capacidad de los vehículos, mediante la adopción simultánea de autobuses bi-articulados y de vehículos de metro ligero de dimensiones relativamente reducidas), considerando además un mismo volumen de demanda para ambos modos. Con las hipótesis de operación asumidas en el estudio, el coste total anualizado del sistema de BHLS/BRT se sitúa en el 67% del que correspondería al sistema tranviario, aunque esta cifra puede variar sensiblemente dependiendo de las variantes analizadas. Nótese que este tipo de estudio (FGSV, 2008) se centra únicamente en cuantificar los costes de implantación y de operación y mantenimiento de ambos sistemas, presuponiendo implícitamente que tanto uno como otro reportarían un mismo nivel de ventajas o beneficios para los usuarios del transporte público.

Por otra parte, aunque afectando únicamente a los modos ferroviarios urbanos, Sonmez y Ontepeli (2009) presentan métodos de modelización paramétrica de costes estimados —a nivel de prediseño— para este tipo de sistemas, basándose en datos de 13 proyectos de LRT y metro situados en Turquía. Para el desarrollo de dichos modelos se pusieron en práctica técnicas de análisis de regresión y de redes neuronales (para la identificación de relaciones no lineales). Los autores indican que, dependiendo de los datos del proyecto y de las relaciones entre parámetros y costes, cada técnica presenta ciertas ventajas, aunque destacan que el uso coordinado de ambas podría proporcionar un potente enfoque para la modelización paramétrica de costes.

Mientras, Tirachini *et al.* (2010a) plantean una hipotética red radial de transporte público urbano para desarrollar sobre ella un modelo de comparación de costes entre tres modos alternativos: LRT, ferrocarril convencional y BRT. El marco teórico del modelo se basa en minimizar el coste total asociado al servicio de transporte público, incluyendo en él no solo costes del operador sino también costes soportados por los usuarios, y tomando el número de líneas (densidad de la red) y la frecuencia de operación de cada modo como variables de decisión. La aplicación práctica del modelo utiliza datos de ciudades australianas, obteniéndose que en la mayor parte de los escenarios analizados la opción del BRT es la que ofrece un superior rendimiento en términos de coste-eficacia, debido principalmente a que conlleva menores costes para el operador (infraestructura, material rodante y costes de operación),

---

<sup>54</sup> Debido a su interés y grado de desagregación, este estudio forma parte de la revisión detallada de costes de implantación y de operación y mantenimiento que se realiza en el epígrafe 2.3.2, donde se analiza dicho estudio con mayor nivel de profundidad.

menor coste de tiempo de acceso (gracias a un mayor número de líneas), y menores costes de tiempo de espera (debido a una mayor frecuencia de operación). Los modos ferroviarios, como el LRT y el ferrocarril convencional, solo podrían llegar a tener un coste total inferior al del BRT si son capaces de operar a una velocidad notablemente mayor que la de este, de tal modo que la diferencia necesaria de velocidades (estimada en 5 km/h para el LRT y en 9 km/h para el ferrocarril convencional) tenga mayor peso que las ventajas del BRT en costes del operador, tiempos de acceso y tiempos de espera. No obstante, reconocen los autores la necesidad, en una evaluación real, de considerar otros aspectos como los costes externos y medioambientales, el impacto en los usos del suelo, el confort de los vehículos o las interrupciones de tráfico durante el período de construcción.

En comparación con algunas de las potenciales aportaciones del modelo desarrollado en la presente tesis, puede indicarse que en Tirachini *et al.* (2010a) se consideraba una demanda fija para el transporte público (directamente asociada al área de captación), en lugar de las variaciones endógenas de demanda incluidas en esta tesis. Además, la velocidad de recorrido (en los tramos entre paradas) era tratada como un *'input'* externo y no como una variable de cálculo. Tampoco se incluían posibles efectos sobre la fiabilidad de los tiempos de viaje en transporte público, que sí se procuran incorporar en esta tesis.

Un enfoque bastante diferente de los anteriores fue el utilizado por An (2011) en su tesis doctoral, en la que plantea un método multicriterio (concretamente el denominado ELECTRE III) como instrumento para el análisis comparativo y selección entre sistemas de transporte guiado en superficie operados sobre plataforma reservada. Así pues, como modos estudiados se incluyen el tranvía moderno de rodadura ferroviaria, el tranvía sobre neumáticos, y varias variantes de sistemas de BHLS con distintos tipos de autobuses (entre los que el autor incluye el TVR —a pesar de que este podría considerarse más bien un tranvía sobre neumáticos—, autobuses con guiado óptico, autobuses con guiado magnético, trolebuses y autobuses sin guiado automatizado). Como criterios de análisis se consideran tres categorías: criterios vinculados al rendimiento y servicio ofrecido por el modo de transporte público (capacidad, frecuencia, velocidad, puntualidad, ocupación de espacio, fiabilidad, y accesibilidad); criterios relativos a costes (costes de inversión y costes de explotación); y criterios ligados a aspectos ambientales (emisión de gases de efecto invernadero y criterios urbanísticos de imagen). De acuerdo a los resultados obtenidos por el autor en la aplicación del análisis multicriterio, el sistema de tranvía moderno (de rodadura ferroviaria) ocuparía un lugar de privilegio en la mayoría de los escenarios de operación planteados, aunque también el tranvía sobre neumáticos y algunos tipos de BHLS (con autobuses de guiado óptico, con el TVR e incluso con trolebuses) tendrían su campo de aplicación dependiendo de las condiciones de operación.

Ese mismo año, Hodgson (2011), también en su tesis doctoral, desarrolla un análisis comparativo que incluye los costes de implementación, costes de operación e impactos medioambientales de un tranvía moderno y de un sistema de autobús BRT guiado de alta calidad (en plataforma reservada), de forma que este último proporcione un rendimiento equivalente al del tranvía en cuanto a capacidad y experiencia de viaje para los pasajeros. El estudio se aplica particularmente al contexto del Reino Unido, aunque se basa también en información del resto de Europa y de América del Norte. Para los costes de capital se indica que para el caso del BRT guiado estos son aproximadamente dos tercios de los del tranvía, lo que supondría un ahorro de costes menor de lo generalmente proclamado (una posible interpretación de este hecho es que los sistemas BRT suelen diseñarse en la práctica con especificaciones inferiores a las de los sistemas de metro ligero). Por su parte, los costes de operación no parecen diferir significativamente entre uno y otro sistema. En cuanto a impactos ambientales, el uso de autobuses de motorización híbrida permitiría obtener unas emisiones de CO<sub>2</sub> similares a las del sistema tranviario, aunque incluso así las emisiones de NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) del BRT seguirían siendo mayores que para los tranvías. La amplia investigación llevada a cabo por este autor se presenta también, de forma sintetizada, en Hodgson *et al.* (2013)<sup>55</sup>. Obsérvese que, al igual que en FGSV (2008),

---

<sup>55</sup> Estos estudios (Hodgson, 2011 y Hodgson *et al.*, 2013) se incorporan también, debido a su especial interés y nivel de detalle, a la revisión específica de costes de implantación y de operación y mantenimiento que se incluye en el epígrafe 2.3.2.



estos estudios se focalizan en el análisis de costes (de implementación, de operación, y algunos costes medioambientales), pero —en contraposición a lo que se pretende aportar en esta tesis— no valoran las posibles diferencias en los beneficios producidos a los viajeros por uno u otro sistema (se asume implícitamente que estos deberían ser equivalentes).

También en el Reino Unido, la organización UK Tram (2012) realiza un informe en el que se pretenden examinar los costes de diferentes esquemas de LRT implantados en el propio país, en Europa continental y en América del Norte durante los 20 años anteriores, con la intención de analizar el nivel de disponibilidad de información, las diferencias de costes entre las distintas zonas geográficas y los motivos para esas diferencias, además de determinar cómo podría mejorarse la recopilación de estos datos para futuros esquemas. El informe señala que la disponibilidad de información detallada sobre los costes de estos esquemas de LRT es muy limitada, y que cuando dicha información se encuentra disponible el formato de la misma no está estandarizado (a diferencia de Estados Unidos), lo que complica su análisis comparativo. También se indica que las implantaciones de LRT en el Reino Unido, contrariamente a la percepción generalizada, no son más costosas que en Europa o en América del Norte, apuntándose como posible motivo que muchos sistemas de LRT en el Reino Unido han aprovechado, al menos en parte, antiguos corredores ferroviarios ya existentes, con el consiguiente ahorro de costes. Como posibles ejemplos para la reducción de costes se pone el foco en el Portland Streetcar (EE. UU.) y en la ciudad de Besançon (Francia), aunque el informe se muestra prudente con la disminución real de costes a lo largo del ciclo de vida de estos esquemas y con su posible transferibilidad al Reino Unido.

Por otra parte, Hsu (2013) desarrolla un modelo de estimación de costes para sistemas de tipo LRT y BRT, en el que se proporcionan los costes totales de capital o inversión, el coste anualizado de capital, los costes de operación y mantenimiento y el coste por pasajero-milla de ambos modos, con la intención de servir de ayuda a planificadores y decisores en la elección entre uno u otro sistema. El modelo permite la estimación de costes para diferentes categorías de infraestructura o tipos de sección transversal, distintas configuraciones de trazado y diferentes volúmenes prefijados de demanda. Se basa además en la aplicación de costes unitarios tomados de sistemas existentes, aunque debido a la variabilidad de los mismos resulta más razonable estimar rangos de valores comprendidos entre las estimaciones de costes más altas y más bajas. El autor aplica el modelo, como ejemplo, a un corredor en la ciudad de Austin (Texas, EE. UU.), en el cual se propone la implantación de un sistema de LRT que combina infraestructura exclusiva y circulación en tráfico mixto. Los resultados de este ejemplo indicarían que los sistemas de LRT implican un menor coste por pasajero-milla que los de BRT cuando el volumen de demanda exceda los 2,000 pasajeros por hora y sentido. Dado que la previsión de demanda para dicho caso es de 3,400 pasajeros por hora y sentido en hora punta, el autor señala que la elección de un sistema de LRT resulta adecuada. Nótese que el modelo de Hsu (2013) se centra exclusivamente en la estimación de costes, sin tener como objetivo la evaluación de los potenciales beneficios generados por los sistemas de LRT y BRT para los usuarios y otros viajeros (a diferencia de las aportaciones pretendidas por esta tesis), y sin considerar tampoco dependencias de la demanda con respecto a la oferta.

Grimaldi *et al.* (2014) desarrollan un modelo simplificado de análisis coste-beneficio destinado a la evaluación inicial de nuevas líneas urbanas de LRT como alternativa a líneas de autobús que circulen sobre un mismo corredor. Este modelo tiene en cuenta los cambios de costes y de excedente para los distintos agentes afectados, incluyendo: usuarios del transporte público (a través de mejoras de regularidad, mejoras de velocidad, incremento o reducción en la frecuencia del servicio, costes de transbordo), no usuarios (beneficios del cambio modal en relación con el medio ambiente, la accidentalidad y la descongestión), proveedores del servicio de transporte (ingresos adicionales por venta de billetes e incremento o reducción en los costes de operación y mantenimiento), y administración pública (costes de inversión y reducción de ingresos por impuestos indirectos). Los autores ofrecen resultados en forma de diagramas en los que se representan los umbrales de inversión justificable en función de la demanda actual y de otros parámetros significativos del modelo. Concluyen estos autores, en base a sus

simulaciones, que en muchas ocasiones los sistemas LRT pueden representar una solución adecuada y eficiente para los problemas de transporte urbano más comunes, a veces incluso aunque los costes de inversión necesarios sean bastante altos.

Cabe destacar que el modelo de Grimaldi *et al.* (2014) parte de unos objetivos relativamente similares a los que motivan esta tesis en lo que se refiere a la necesidad de una adecuada evaluación coste-beneficio *ex-ante* sobre la potencial implantación de un sistema de transporte público urbano o metropolitano de capacidad intermedia. Sin embargo, el trabajo de estos autores no compara sistemas alternativos de LRT y de BRT, sino que evalúa la instauración de un sistema de capacidad intermedia (sea LRT o, en su caso, BRT) en sustitución de servicios de autobús (convencional) desarrollados sobre un corredor. No se trata por tanto de un modelo comparativo entre modos ferroviarios ligeros (LRT) y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BRT o BHLS), a diferencia del planteamiento de esta tesis. Por otra parte, la nueva demanda en el sistema de capacidad intermedia, tanto generada o inducida como desviada desde el automóvil, tiene que ser introducida en el modelo de Grimaldi *et al.* (2014) como un parámetro externo, a diferencia del tratamiento endógeno aportado por esta tesis. Lo mismo sucede, por ejemplo, para la velocidad de operación de los modos de transporte público.

Mientras, Chen *et al.* (2015) proponen un modelo de maximización del bienestar social (desde el punto de vista de una autoridad de transporte público) como forma de afrontar tanto el diseño de una línea en un corredor como la selección del tipo de tecnología (incluyendo metro, LRT y BRT). Así, en el modelo propuesto se optimizan conjuntamente la longitud de la línea, el número de estaciones, el espaciamiento entre estas, el intervalo de operación y la tarifa, considerando explícitamente efectos de elasticidad de la demanda y restricciones de capacidad. Además, mediante la comparación de los niveles de bienestar social optimizado obtenido para cada alternativa de transporte público se determina el tipo de solución tecnológica más adecuada junto con la densidad de población crítica. Los autores destacan que la selección del tipo de tecnología depende en gran medida de la densidad de población y presentan algunos ejemplos de aplicación del modelo en ciudades chinas. Se reconocen además algunas limitaciones en relación con el modelo, como —entre otras— el supuesto de solamente un corredor lineal como única estructura urbana modelizada, la hipótesis de que todos los viajeros del corredor se dirigen al centro de la ciudad, la ausencia de interacciones y de efectos de sustitución entre el transporte público y el automóvil (los cuales sí se incluyen, como aportación, en el modelo de la presente tesis), o la homogeneidad de todos los pasajeros con respecto a su valor del tiempo y su sensibilidad hacia los niveles de servicio.

Por su parte, Li y Preston (2015) renuevan el modelo de hoja de cálculo desarrollado en su momento como parte del proyecto TEST por Brand y Preston (2006), actualizando las tablas de costes unitarios, añadiendo una nueva tecnología de transporte público (autobús de tránsito elevado o '*straddle bus*'<sup>56</sup>) e incluyendo efectos de demanda endógena (es decir, incorporando la variación de la misma con las características del nivel de servicio). En este sentido, se utiliza simplemente un modelo de demanda del transporte público con elasticidades constantes con respecto al tiempo de espera y al tiempo de viaje en el vehículo como forma de estimar la reacción de los viajeros ante cambios en el nivel de servicio (en contraste con las aportaciones del modelo de esta tesis, en el que se utilizan para la estimación de la demanda formulaciones más elaboradas —con inclusión del reparto modal entre alternativas de viaje— y se incorporan otras variables adicionales como atributos del transporte público con influencia sobre el comportamiento de los viajeros). Los resultados del modelo de Li y Preston (2015) sobre una ruta de 12 km de longitud indicarían, según los autores, que las tecnologías de transporte público con un menor coste social por pasajero serían los minibuses para demandas por debajo de 2,000 pasajeros/día, los autobuses de un solo piso para demandas desde 3,000 hasta 16,000 pasajeros/día, los autobuses de

---

<sup>56</sup> El '*straddle bus*' o autobús de tránsito elevado fue un prototipo conceptual en el que un vehículo de transporte público de grandes dimensiones diseñado con el habitáculo elevado con respecto al nivel del pavimento (dejando un vano de más de 2 m de altura) circularía guiado sobre unos raíles insertados en los laterales de los carriles generales del tráfico rodado (abarcando una anchura de dos carriles), de forma que el resto de vehículos (automóviles, motocicletas, etc.) podrían transitar a través del vano libre (es decir, por debajo del habitáculo). Actualmente este concepto parece haber sido totalmente descartado y abandonado.

doble piso para demandas entre 17,000 y 57,000 pasajeros/día, el autobús de tránsito elevado para un rango entre 58,000 y 101,000 pasajeros/día, y el metro subterráneo para demandas por encima de esta última cifra.

Moccia y Laporte (2016) toman como base un modelo de optimización de una línea de transporte público (con la función objetivo de minimizar la suma de costes de los pasajeros y del operador) en el que se considera la demanda como fija o inelástica (a diferencia de la presente tesis), y que había sido anteriormente desarrollado por Tirachini *et al.* (2010b). Presentan estos autores tres extensiones del modelo original, en las cuales se añaden: la optimización de la separación entre paradas, la consideración del coste de penalización por aglomeración de pasajeros en los vehículos de transporte público conjuntamente con la optimización de la longitud de tren (aplicable al caso de los modos ferroviarios), y el tratamiento de múltiples períodos de demanda (esta última es una característica que también está presente en el modelo de esta tesis). Los autores aplican las extensiones del modelo a un ejemplo ilustrativo en el que se incluyen dos modos basados en autobuses (autobús convencional en tráfico mixto y BRT) y dos modos ferroviarios (LRT y ferrocarril convencional), definidos mediante sus parámetros técnicos y económicos (con valores tomados de la literatura específica). El modelo de base muestra como dominantes a los modos basados en autobuses para todos los niveles de demanda excepto los más altos, aunque a medida que se añaden refinamientos al modelo se aprecia cómo la frontera que limita el campo de adecuación entre las dos clases de modos desciende hacia niveles de demanda inferiores. Así, los autores concluyen que en dicho ejemplo ilustrativo el punto límite entre BRT y LRT se situaría aproximadamente en 13,000 pasajeros/hora (volumen de demanda ciertamente elevado), mientras que entre LRT y ferrocarril convencional (de cercanías) el límite se encontraría en torno a 20,000 pasajeros/h.

Posteriormente, Moccia *et al.* (2017) extienden el modelo anterior mediante la inclusión de los efectos de la elasticidad de la demanda, asumiendo que esta puede ser aproximada como una función lineal simple de la tarifa y de los componentes del tiempo de viaje (nótese que, en contraste, en la presente tesis se incorporan como aportación modelos de demanda con capacidad para estimar el reparto modal, en los que se tiene en cuenta además la influencia de los atributos de otras posibles alternativas). Por otra parte, se utiliza en Moccia *et al.* (2017) todo un rango de funciones objetivo en cuyos dos extremos se situarían la maximización de las ganancias del operador y la maximización del bienestar social. Los autores estudian la influencia de la elasticidad de la demanda sobre la elección de la tecnología de transporte público en comparación con los modelos de demanda fija, encontrando que los límites entre los rangos de selección de tecnologías de transporte público son bastante similares a los obtenidos con dichos modelos. Otro resultado destacado por los autores es que la demanda adicional capturada bajo el criterio de maximización de las ganancias del operador es aproximadamente la mitad que la obtenida con el objetivo de maximización del bienestar social.

Con un enfoque diferente, López-Lambas *et al.* (2017) proponen la utilización de técnicas de Análisis Multi-Criterio de Decisiones (MCDA) para ayudar a planificadores y decisores en la elección entre sistemas de LRT y BRT/BHLS en áreas urbanas. Este tipo de técnicas permitirían la posibilidad de comparar criterios no homogéneos, tanto cualitativos como cuantitativos, así como obtener finalmente una clasificación objetiva de las diferentes alternativas. En este sentido, se definen tres categorías de objetivos (impactos de transporte, impactos económicos, e impactos sociales y medioambientales), aplicando desde el punto de vista metodológico la técnica TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Como caso de estudio particular se plantea la comparación entre el metro ligero de Santa Cruz de Tenerife y el BHLS de la ciudad italiana de Prato, argumentando la semejanza de características con respecto a los datos geográficos y demográficos y las similitudes entre las dos respectivas líneas de transporte público. Los resultados de la aplicación a estas ciudades de tamaño medio indicarían una mejor puntuación global para el sistema de BHLS. Parcialmente, el LRT sobrepasa ligeramente al BRT en la categoría de impactos de transporte, pero este último obtiene mejores puntuaciones en materia de impacto social y medioambiental, y sobre todo en el impacto económico y financiero.

En Moccia *et al.* (2018) se presenta un nuevo modelo de optimización orientado al diseño de una línea de transporte público ‘semirrápido’ y a la selección del correspondiente tipo de tecnología (BRT o LRT), buscando como objetivo minimizar la suma de los costes de tiempo de los pasajeros y los costes del operador. Con respecto a los modelos anteriores, se mejora la representación de la variabilidad temporal y espacial de la demanda, así como varios aspectos operacionales y de diseño. Se trata todavía, no obstante, de un modelo de enfoque unimodal, en el que solo el transporte público entra a formar parte del análisis, siendo tratado de forma aislada con respecto a otras alternativas modales (en contraste, en el modelo de la presente tesis se procura abordar, como aportación, un enfoque multimodal, al menos a un nivel relativamente básico). Mediante la aplicación del modelo de Moccia *et al.* (2018) a dos escenarios en los que se ofrece un rendimiento comparable en términos de nivel de servicio, se muestra que una planificación orientada a ofrecer un viaje más rápido puede ser más importante que la propia elección entre sistemas basados en autobuses y modos ferroviarios, con la excepción de niveles de demanda muy bajos. Asimismo se indica que las diferencias en el coste total (entendido como suma de los costes de tiempo para los pasajeros y los costes del operador) entre los dos tipos de tecnologías son, para un amplio rango de demandas, menores de lo comúnmente aceptado.

En línea con los modelos basados en optimización, Verma *et al.* (2018) desarrollan un modelo matemático para seleccionar, entre BRT y un modo ferroviario de alta capacidad como es el metro, la tecnología de transporte público más adecuada para la demanda de viajes (de tipo ‘*many-to-many*’) en un área urbana. Para ello formulan una función de bienestar social, la cual se pretende optimizar con respecto al espaciamiento entre paradas o estaciones, al intervalo y a la tarifa, para diferentes niveles de densidad de población y para cada tecnología de transporte público. Obsérvese, en cualquier caso, que el modelo de Verma *et al.* (2018) está enfocado a la elección entre BRT y metro (dos modos en principio de distintos niveles de capacidad, salvo que se conciba el BRT como ‘*full BRT*’ de muy alta capacidad), y no a la selección entre sistemas de capacidad intermedia en la forma de LRT, metro ligero o tranvía moderno y BHLS/BRT, como es el caso de la presente tesis. En el modelo de Verma *et al.* (2018), si se toma la densidad de población como dato de entrada, se observaría que para ciudades con bajas densidades de población el bienestar social obtenido mediante el sistema de BRT es mayor que con el metro, así como que el número óptimo de paradas o estaciones se reduce al incrementarse la densidad de población. Además, comparando la densidad de población actual con la densidad crítica (aquella para la cual las funciones de bienestar social de BRT y metro se igualan), el modelo es capaz de estimar el momento futuro en el cual sería más conveniente introducir la nueva tecnología de transporte público.

Por otra parte, existen algunos autores que en sus estudios se han centrado exclusivamente en el análisis de casos concretos. Este es el caso en primer lugar de Spencer y Andong (1996), que modelizan y comparan varias alternativas de transporte público (autobús en plataforma exclusiva, LRT y un sistema ferroviario elevado) para un corredor congestionado de la ciudad de Pekín/Beijing, empleando como técnica de evaluación el análisis coste-beneficio. De acuerdo a sus resultados, solo el sistema de autobús presentaría un valor actual neto de signo positivo, aunque reconocen los autores que este resultado depende en buena medida de la anchura disponible en el viario de la ciudad. Por otra parte, también en relación con el estudio de situaciones particulares, Prud’homme *et al.* (2011) toman el caso de la sustitución de una línea de autobús por un tranvía moderno en un bulevar de París, con una reducción aparejada de aproximadamente un tercio en el espacio disponible para el tráfico general. Una encuesta a unos 1,000 usuarios indicaría que el tranvía apenas generó cambio modal desde automóviles particulares al transporte público, sino más bien cambios entre distintos modos de transporte público y desvíos de ruta para los automóviles particulares. Evaluando los costes y beneficios de estos cambios, los autores señalan que los beneficios generados para los usuarios del transporte público son menores que los costes por pérdidas de tiempo causados a los usuarios de vehículos motorizados privados. Se indica una situación similar con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que las disminuciones producidas en el sistema de transporte público y por la reducción de un pequeño número de viajes en automóvil particular tienen menos peso que los efectos del incremento de la longitud de recorrido y del aumento de la congestión que soportan los viajes en automóvil particular. Concluyen los autores que el valor

actual neto del proyecto resulta negativo, incluso ignorando el coste de la inversión inicial de unos 350 millones de euros. Por último, en un trabajo de investigación realizado para la obtención del título de ingeniero civil, López-Gutiérrez (2018) lleva a cabo una comparación cuantitativa, a través de diversos índices y calificaciones que se agregan en un valor final general, entre dos sistemas de capacidad media implantados en Ciudad de México: la Línea 1 del Metrobús (sistema de BRT) y la línea de Tren Ligero (LRT) de dicha ciudad. La valoración de índices y calificaciones para cada una de estas dos líneas se articula en torno a cinco áreas temáticas: la adaptación a las características propias de los sistemas de transporte de capacidad intermedia, el rendimiento del sistema en cuanto a sus características de operación, los impactos generados (sociales, económicos, y de emisiones), el nivel de servicio (calidad o experiencia de usuario y precio), y los costes producidos (de inversión, de operación, de inversiones, y los costes totales anuales). La calificación final obtenida según este autor resulta ser un poco mejor (aproximadamente un 10%) para la línea de Tren Ligero de Ciudad de México que para la Línea 1 del Metrobús (BRT).

En comparación con las tendencias generales observadas en aquellos estudios y modelos que, estando más relacionados con los objetivos y planteamientos de la presente tesis, se citan a lo largo de este epígrafe (2.3.1.3), es posible avanzar brevemente algunas de las contribuciones que el modelo a desarrollar en esta tesis pretende aportar. Así, como aportación más general, se puede destacar que el modelo de esta tesis integra o acopla endógenamente y de forma dinámica la previsión de la futura demanda, la caracterización de los atributos de la oferta de transporte, la valoración de cada una de las opciones o alternativas a través de su coste generalizado de viaje, y la estimación de las elecciones agregadas de los potenciales viajeros. Dicho modelo se desarrolla además desde un enfoque multimodal, que tiene en cuenta e incorpora efectos cruzados entre los volúmenes de viajes en las distintas alternativas modales de un posible conjunto de elección, cada una de ellas caracterizada por unas determinadas condiciones de oferta, demanda y costes. También se incorpora en el desarrollo del modelo un amplio abanico de variables de entrada (agrupadas en diferentes áreas temáticas), lo cual aportará una mayor riqueza de posibilidades en el análisis e identificación de los factores que podrían influir con mayor peso en los resultados y la rentabilidad socioeconómica de los proyectos de sistemas de capacidad intermedia. Otra característica que puede destacarse como aportación del modelo —al menos con respecto a buena parte de las referencias anteriores— es que se aborda una segmentación multiperíodo de las diversas condiciones horarias del sistema de transporte, con la posibilidad de definir, caracterizar separadamente y tratar analíticamente múltiples períodos horarios (tales como horas punta en cada sentido de viaje, horas valle, períodos intermedios, etc.), de modo que las distintas cantidades de beneficios y costes generados durante cada uno de estos períodos específicos puedan ser posteriormente agregadas y tenidas en cuenta en la evaluación.

Otra aportación relevante del modelo presentado en esta tesis se refiere a la introducción de una segmentación temporal del horizonte o período de evaluación, con una diferenciación explícita de varias fases o etapas a lo largo de este. En relación con este aspecto, puede resultar particularmente importante la posibilidad de incorporar los efectos producidos durante la fase de implantación de los nuevos modos de capacidad intermedia, tales como los costes de interrupción.

Es destacable también que una aportación de esta tesis no observada al mismo nivel en ninguno de los estudios anteriores consiste en desarrollar el tratamiento metodológico de la incertidumbre a través de la implementación explícita en el modelo de múltiples simulaciones aleatorias, en aplicación del método de Montecarlo. En este sentido, se incorporan además las previsible correlaciones entre ciertas variables aleatorias.

Por último, como característica metodológica diferenciadora con respecto a los modelos previamente citados, puede señalarse la aplicación práctica en esta tesis de formulaciones incrementales (de tipo '*pivot-point*') sobre la base de un modelo sintético de distribución y reparto modal.

### 2.3.1.4. Otros tipos de estudios comparativos

En relación con otros tipos de estudios en los que se tratan aspectos comparativos concernientes a sistemas de transporte urbano o metropolitano de capacidad intermedia, cabe mencionar en primer lugar aquellos que analizan aspectos relativos al impacto medioambiental.

Así, Puchalsky (2005) realiza una comparación entre sistemas de BRT y LRT en relación con las emisiones urbanas o regionales (es decir, excluyendo efectos globales) de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Para el sistema LRT se incluyen en el análisis la generación de la energía eléctrica en la correspondiente central, las pérdidas en la línea de transporte y el uso de electricidad por los vehículos (que no genera emisiones directas). Para el BRT (con la consideración de vehículos diésel como estándar medio e híbridos-eléctricos y de gas natural comprimido como casos más avanzados) se incluyen las emisiones directas salidas del tubo de escape de los autobuses y los procesos de distribución y almacenamiento del combustible final (no así el refinado, la compresión del gas ni otros posibles procesos anteriores). Tomando datos de Estados Unidos, el autor encuentra que, en términos relativos (gramos por pasajero-km o gramos por plaza-km), el sistema LRT presenta emisiones más reducidas que el BRT para cualquiera de los tres tipos de sustancias analizadas cuando se comparan soluciones tecnológicas con un nivel de avance equiparable. Además, se destaca una notable mejora en el nivel de emisiones de uno y otro sistema durante los años anteriores a la fecha del estudio, cuyas conclusiones deben ser en todo caso contextualizadas en el tiempo. En este sentido, se debería tener presente que, de forma más reciente, se está produciendo —y previsiblemente se intensificará en un futuro cercano— un proceso de creciente electrificación de los sistemas de autobuses, ya sea mediante sistemas con baterías de carga nocturna o de carga de oportunidad.

Más recientemente, la firma consultora Carbone 4 (2016) realiza un estudio —financiado por Alstom— en el que se analizan comparativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producidas por sistemas de tranvía o metro ligero y de BRT a lo largo de un ciclo de vida de 30 años (huella de carbono). El estudio tiene en cuenta el dióxido de carbono emitido para la construcción, mantenimiento y renovación del sistema de transporte, así como para alimentar la tracción de los vehículos. Para crear una comparación equilibrada, se establece como caso de referencia una hipotética línea de 10 km de longitud situada en Bélgica, en la que ambos modos transportarían el mismo número de pasajeros. De acuerdo a los resultados del caso de referencia, las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a un sistema BRT con autobuses diésel serían, a lo largo del ciclo de vida de 30 años, más del doble de las correspondientes al sistema tranviario. En el caso de un BRT con vehículos híbridos enchufables, dichas emisiones serían aproximadamente un 30% mayores que para el tranvía, mientras que incluso con un sistema BRT totalmente electrificado seguirían siendo un 17% más elevadas. Estas ventajas del sistema tranviario se originan principalmente en las fases de operación y mantenimiento, así como por el mayor período de vida útil de los vehículos de tranvía. También se efectúa un análisis de sensibilidad con respecto al factor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de energía eléctrica (dependiente del 'mix' energético), concluyéndose que incluso con factores muy altos —tales como los de China— el sistema tranviario sigue produciendo menores emisiones de dióxido de carbono en la totalidad del ciclo de vida.

Por otro lado, algunos artículos han analizado en detalle las posibilidades de futura conversión de sistemas BRT en LRT y las previsiones de diseño necesarias para ello. Un primer estudio de este tipo es el debido a Wood *et al.* (2006), que revisan una selección de proyectos de BRT y LRT en América del Norte y otras áreas geográficas para determinar cuáles son los aspectos claves de diseño que necesitan ser contemplados en previsión de una posible futura conversión. Así, como elementos de diseño se señalan, por su influencia en la sección transversal, el tipo de vehículo (por ejemplo, autobuses guiados frente a autobuses convencionales) y la configuración operativa de la propia sección (existencia de barrera física entre carriles, utilización compartida con vehículos de alta ocupación, etc.). Las restricciones geométricas horizontales y verticales y los gálibos de los vehículos se destacan como los elementos críticos que deben ser considerados para este tipo de conversión. Por otra parte, se señala que las actividades constructivas necesarias para dicha conversión incluyen modificaciones tanto en la línea principal como en las estaciones. En caso de que no se hayan tomado las previsiones adecuadas de

diseño y construcción para la futura conversión a LRT, los costes de la misma podrían ser significativamente altos por la necesidad de modificaciones extremas e incluso de la reconstrucción total de ciertas estructuras.

En una línea de investigación similar, Henke (2013) examina las razones por las que en muy pocas ocasiones se ha llevado a cabo la conversión de sistemas BRT a LRT, así como las dificultades del proceso y los costes asociados al enfoque de diseño necesario para dicha convertibilidad, presentando como ejemplos de estudio casos reales. Asimismo, se incluyen una serie de recomendaciones de diseño para aquellos proyectos en los que se aspire a facilitar la futura conversión.

Por otra parte, Gibson *et al.* (2016) se centran en estudiar los beneficios de tiempo para los usuarios que se derivarían de la implantación en sistemas de autobuses de una plataforma reservada de inserción central, siendo este un componente infraestructural clave en muchos sistemas de BRT. Para ello, se desarrolla un modelo general en el que se consideran los efectos de dicha implantación tanto sobre el tiempo de viaje a bordo del vehículo como sobre el tiempo de acceso a las paradas. Los autores estiman este modelo con datos de un caso de estudio en Santiago de Chile, referido a la hipotética implantación de una plataforma reservada central de calzadas separadas, que es comparada con sendos casos base que corresponden a tráfico mixto y a carril-bus. Los resultados de esta aplicación muestran que los ahorros de tiempo de viaje en el vehículo obtenidos con la plataforma reservada de inserción central se ven en parte disminuidos por los aumentos en los tiempos de acceso, los cuales se producen debido a los incrementos en las distancias a recorrer a pie y en las demoras en el cruce de viales. De acuerdo a las conclusiones de los autores, el caso por ellos analizado sugeriría que las plataformas reservadas de inserción central son particularmente apropiadas para zonas intermedias situadas entre el centro de las ciudades y las áreas periféricas o suburbios.

Finalmente, otros estudios se han propuesto identificar las preferencias entre sistemas de LRT y de BRT observadas entre distintos tipos de agentes (no necesariamente viajeros potencialmente afectados por la disponibilidad de un nuevo modo de transporte público).

Así, en Hensher *et al.* (2015) se pretende estudiar las preferencias generales de las comunidades en relación con las inversiones en transporte público bajo unas condiciones de restricción presupuestaria, tratando de dilucidar además la influencia que las etiquetas de LRT y BRT ejercen sobre dichas preferencias. Para ello se desarrolla en varias ciudades australianas un experimento en preferencias declaradas (SP) con dos opciones no etiquetadas definidas mediante un conjunto de 20 potenciales factores condicionantes de las predilecciones de inversión para una mejora del transporte público, donde cada escenario de elección está caracterizado por un coste estimado de construcción y un límite del presupuesto total anual disponible para invertir en infraestructuras de transporte. A continuación se revela al encuestado si cada opción corresponde a un sistema de BRT o de LRT, pretendiendo examinar cómo esta información adicional influye en la revisión de las preferencias. A través de la estimación de modelos logit mixtos, los autores concluyen que cuando se asume una regla de elección totalmente compensatoria (todos los atributos son relevantes para todos los individuos), tal como se hace habitualmente en los estudios de comparación modal, se aprecia una preferencia predominante de la comunidad por el LRT sobre el BRT, a pesar de la restricción presupuestaria, de la similitud en los atributos de servicio y de la posibilidad de cubrir con la red de BRT un área más extensa por el mismo coste de construcción. En cambio, cuando se aplica una regla de elección semi-compensatoria (que permite tener en cuenta la irrelevancia de algunos atributos para los individuos) ya no se observa un sesgo modal significativo afectando a las preferencias.

Recientemente, Hensher *et al.* (2019) llevan a cabo un estudio con un enfoque metodológico similar al anterior (aunque sin restricción presupuestaria), pero extendiéndolo a ciudades de Estados Unidos, Reino Unido, Francia y Portugal (además de las australianas), con la intención de comprobar si las preferencias modales entre LRT y BRT son específicas de cada cultura o emplazamiento y, en caso de ser así, determinar cuáles son los factores condicionantes de estas preferencias en diferentes contextos geográficos. Los autores concluyen que entre los países estudiados existen diferentes factores que

condicionan el apoyo relativo de las comunidades a una u otra opción, por lo que sugieren que la promoción específica de los sistemas basados en autobuses debería resaltar diferentes conjuntos de atributos en cada país. Otro resultado destacado hace referencia a la importante influencia que la experiencia previa con un modo específico ejerce sobre las preferencias modales entre ambos sistemas. Así, se señala que el apoyo al BRT o LRT está a menudo influido por el hecho de que la experiencia con uno de los modos haya sido positiva o negativa, de forma que hay incluso ejemplos de cómo una mala experiencia con el LRT ha favorecido el apoyo al BRT a pesar de que este último no hubiese sido previamente probado.

### 2.3.2. Revisión detallada de costes de implantación y de operación y mantenimiento

A continuación, para concluir el presente capítulo y atendiendo a su especial interés en relación con la temática de esta tesis, se analizan con mayor detenimiento las cuestiones relativas a la estimación de los costes de implantación y de operación y mantenimiento —así como de los correspondientes costes totales anualizados— de cada una de las dos principales clases de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia: tranvía moderno o metro ligero (LRT) y sistemas de autobuses semirrápidos o de alto nivel de servicio (bajo las denominaciones de BHLS o BRT)<sup>57</sup>. Aunque este tema ya ha sido tratado someramente dentro del epígrafe 2.3.1.3, este análisis en profundidad se basará en una revisión específica de aquellos estudios que han abordado esta materia con mayores niveles de detalle y de desagregación de datos.

En este sentido, los estudios que han tratado la temática de la comparación de costes asociados a sistema de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia (de tipo LRT frente a BRT o BHLS) con mayor profundidad, grado de detalle y nivel de desagregación son los llevados a cabo por la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) en Alemania, y por Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013) en el Reino Unido.

El primero de ellos (FGSV, 2008) plantea la comparación de costes sobre la base de una hipotética red simplificada, compuesta por 2 líneas diametrales de 10 km de longitud cada una de ellas que cruzarían un área urbana intersecándose en su centro. Los vehículos circularían a lo largo de la totalidad de las líneas sobre plataforma reservada, con intervalos de paso de 5 minutos y a una velocidad de operación de 20 km/h. Este estudio, en su planteamiento base, considera que los vehículos de ambos tipos de sistemas tengan la misma capacidad (145 plazas, con tranvías de 28 m de longitud y autobuses biarticulados de 25 m).

Por su parte, los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013) sitúan la comparación de costes entre un sistema de tipo LRT y su alternativa como BHLS o BRT (en forma de autobús guiado sobre plataforma reservada) en una hipotética red a implantar en la ciudad inglesa de Reading. Esta red tendría una longitud de 22.4 km, con 16.5 km de vía doble (caso del LRT) o carril doble (BRT/BHLS) y 5.9 km de vía única o carril único. Los intervalos de paso en hora punta, ajustados a la distinta capacidad de los vehículos, serían de 10 minutos para el sistema LRT y de 5–6 minutos para el de tipo BRT/BHLS, con una velocidad de operación en ambos casos de 25 km/h.

Así pues, en los epígrafes desarrollados a continuación se procede al análisis pormenorizado de los costes iniciales de implantación, de los costes de operación y mantenimiento, y del coste total anual de estos sistemas de transporte, todo ello en base a los estudios efectuados por la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) y por Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

---

<sup>57</sup> Los contenidos del presente epígrafe están basados en una actualización de la ponencia ‘Revisión de estudios económicos de comparación de costes asociados a sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia (LRT y BHLS)’ (Conles *et al.*, 2014a), presentada por el autor de esta tesis en la XI edición del Congreso de Ingeniería del Transporte (Santander, 9-11 de junio de 2014).



### 2.3.2.1. Costes iniciales de implantación

#### 2.3.2.1.a. Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV)

De acuerdo al estudio desarrollado por la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008), se recopilan en la Tabla 2.4 los costes de inversión inicial necesarios para la implantación de un nuevo sistema de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia, tanto si es este un metro ligero o LRT como si se trata de un sistema BRT o BHLS basado en autobuses de alta capacidad operando sobre plataforma reservada. Recuérdese que los costes indicados están referidos a un conjunto de 2 líneas de 10 km de longitud cada una de ellas, sumando un total de 20 km de infraestructura lineal. Por otra parte, dado que los costes reportados por el estudio original corresponden al período 2006-2007, se han actualizado aplicando un factor de ajuste igual al cociente entre los índices armonizados de precios al consumidor (HICP) de Alemania en mayo de 2019 y en enero de 2007. De acuerdo a datos tomados de Eurostat<sup>58</sup>, dicho factor de ajuste de precios resulta ser 1.2066 (es decir, una inflación acumulada del 20.66% a lo largo del período de actualización).

**Tabla 2.4.** Costes iniciales totales de implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada según el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Centros de costes	Metro ligero / LRT <sup>(a)</sup>		BRT / BHLS <sup>(b)</sup>	
	EUR-01/2007 (€ <sub>07</sub> )	EUR-05/2019 (€ <sub>19</sub> )	EUR-01/2007 (€ <sub>07</sub> )	EUR-05/2019 (€ <sub>19</sub> )
Costes de planificación, proyecto y preparación del emplazamiento	32,000,000	38,611,872	15,000,000	18,099,315
Adquisición de terrenos	12,000,000	14,479,452	12,000,000	14,479,452
Trabajos de ingeniería civil y plataforma de cimentación	30,000,000	36,198,630	25,000,000	30,165,525
Construcción de infraestructura de circulación del transporte público	28,000,000	33,785,388	10,000,000	12,066,210
Sistema de suministro de energía de tracción	16,000,000	19,305,936	No Aplic.	No Aplic.
Costes de las paradas o estaciones	10,000,000	12,066,210	10,000,000	12,066,210
Costes de reordenación y remodelación de los espacios viarios	80,000,000	96,529,680	80,000,000	96,529,680
Costes de las tecnologías de los sistemas de comunicaciones, información y venta de billetes	16,000,000	19,305,936	16,000,000	19,305,936
Tratamiento preferencial (priorización) en la semaforización y señalización del tráfico	12,000,000	14,479,452	12,000,000	14,479,452
Adquisición de vehículos	80,000,000	96,529,680	16,000,000	19,305,936
Instalación de depósito y talleres	25,000,000	30,165,525	10,000,000	12,066,210
TOTAL (sin planta de depósito y talleres)	316,000,000	381,292,237	196,000,000	236,497,717
TOTAL (con planta de depósito y talleres)	341,000,000	411,457,763	206,000,000	248,563,927

<sup>(a)</sup> Flota de 32 tranvías (28 en operación y 4 en reserva) de 28 m de longitud y 145 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>).

<sup>(b)</sup> Flota de 32 autobuses biarticulados (28 en operación y 4 en reserva) de 25 m de longitud y 145 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>), con motorización diésel.

De los datos contenidos en la Tabla 2.4 cabe destacar que el sistema de tipo BRT o BHLS requeriría una inversión inicial un 39.6% inferior a la necesaria para un sistema de metro ligero, en caso de que fuese precisa la construcción de una nueva instalación de depósito y talleres. Si no fuese así, el ahorro relativo de costes entre uno y otro sistema se reduce ligeramente, al 38.0%. Los grupos de elementos de los que se deriva un mayor ahorro del sistema BRT o BHLS respecto al metro ligero son la adquisición de vehículos, la construcción de la infraestructura de circulación (al evitar el BRT o BHLS el coste de la vía tranviaria), los costes de planificación, proyecto y preparación del emplazamiento, la dotación del

<sup>58</sup> [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=prc\\_hicp\\_midx&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=prc_hicp_midx&lang=en) [Acceso: agosto 2019]

sistema de suministro de energía de tracción (innecesario para el tipo de BRT/BHLS contemplado como caso base del estudio) y la construcción de la instalación de depósito y talleres.

A continuación, en la Tabla 2.5, se obtienen los costes unitarios proporcionales o prorrateados de los distintos grupos de elementos o centros de costes, aplicando en cada caso la magnitud de referencia que mejor se ajuste a la clase de elemento o coste analizado (dentro de las limitaciones que la disponibilidad de datos permite). Este tipo de análisis facilitaría la extrapolación de costes iniciales de implantación —aunque con notables precauciones— a otras líneas o redes de uno u otro sistema que presentasen características diferentes en cuanto a longitud de las líneas, tamaño de la flota de vehículos necesaria, número de paradas o estaciones, etc.

**Tabla 2.5.** Costes iniciales prorrateados para la implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Centros de costes	Magnitud de prorrateo	Metro ligero / / LRT <sup>(a)</sup>	BRT / BHLS <sup>(b)</sup>
Costes de planificación, proyecto y preparación del emplazamiento	Longitud total de infraestr.	1,930,594 [€ <sub>19</sub> /km]	904,966 [€ <sub>19</sub> /km]
Adquisición de terrenos	Longitud total de infraestr.	723,973 [€ <sub>19</sub> /km]	723,973 [€ <sub>19</sub> /km]
Trabajos de ingeniería civil y plataforma de cimentación	Longitud total de infraestr.	1,809,932 [€ <sub>19</sub> /km]	1,508,276 [€ <sub>19</sub> /km]
Construcción de infraestructura de circulación del transporte público	Longitud total de infraestr.	1,689,269 [€ <sub>19</sub> /km]	603,311 [€ <sub>19</sub> /km]
Instalaciones de catenaria e hilo de contacto	Longitud total de infraestr.	748,105 [€ <sub>19</sub> /km]	No Aplic.
	Unidades de subestación	651,575 [€ <sub>19</sub> /subestación]	No Aplic.
Subestaciones de energía de tracción	Longitud total de infraestr. <sup>(c)</sup>	217,192 [€ <sub>19</sub> /km]	No Aplic.
	Longitud total de infraestr.	603,311 [€ <sub>19</sub> /km]	603,311 [€ <sub>19</sub> /km]
Paradas o estaciones	Unidades de parada <sup>(d)</sup>	301,655 [€ <sub>19</sub> /parada]	301,655 [€ <sub>19</sub> /parada]
	Longitud total de infraestr.	4,826,484 [€ <sub>19</sub> /km]	4,826,484 [€ <sub>19</sub> /km]
Costes de reordenación y remodelación de los espacios viarios	Longitud total de infraestr.	965,297 [€ <sub>19</sub> /km]	965,297 [€ <sub>19</sub> /km]
Costes de las tecnologías de los sistemas de comunicaciones, información y venta de billetes	Longitud total de infraestr.	723,973 [€ <sub>19</sub> /km]	723,973 [€ <sub>19</sub> /km]
Tratamiento preferencial (priorización) en la semaforización y señalización del tráfico	Longitud total de infraestr.	3,016,553 [€ <sub>19</sub> /veh.]	603,311 [€ <sub>19</sub> /veh.]
Adquisición de vehículos	Nº de vehículos en la flota	678,724 [€ <sub>19</sub> /veh.]	282,802 [€ <sub>19</sub> /veh.]
Depósito (sin talleres)	Tamaño de la flota de vehículos	263,948 [€ <sub>19</sub> /veh.]	94,267 [€ <sub>19</sub> /veh.]
Taller de mantenimiento y operaciones	Tamaño de la flota de vehículos	19,064,612 [€ <sub>19</sub> /km]	11,824,886 [€ <sub>19</sub> /km]
TOTAL (sin depósito ni talleres)	Longitud total de infraestr.	20,572,888 [€ <sub>19</sub> /km]	12,428,196 [€ <sub>19</sub> /km]
TOTAL (con depósito y talleres)	Longitud total de infraestr.		

<sup>(a)</sup> Ídem Nota <sup>(a)</sup> en Tabla 2.4.

<sup>(b)</sup> Ídem Nota <sup>(b)</sup> en Tabla 2.4.

<sup>(c)</sup> El estudio de FGSV (2008) considera una subestación por cada 3 km de línea.

<sup>(d)</sup> Se ha supuesto de media la existencia de una parada por cada 500 m de línea, aunque este dato no se especifica en el estudio de FGSV (2008).

Finalmente, la Tabla 2.6 indica los costes iniciales de inversión correspondientes a posibles alternativas o variantes en cada tipo de sistema, ya sea mediante el uso de autobuses de alimentación eléctrica por *trolley* y línea aérea (trolebuses), mediante la utilización de autobuses articulados en lugar de

biarticulados (por tanto con menor capacidad), o mediante el empleo de tranvías de 40 m de longitud en vez de 28 m, aumentando así la capacidad unitaria de los vehículos de LRT. En el primer caso, el sistema de trolebuses supondría un coste adicional de 46.7 M€ con respecto al caso base de BRT/BHLS. Por su parte, la utilización de autobuses articulados de 20 m permitiría apenas un ahorro de 1.9 M€. Por último, para el sistema de metro ligero, el ahorro inicial que se obtiene por el empleo de tranvías de 40 m es bastante limitado (11.6 M€), pero para el usuario supondría la desventaja de un sensible aumento en el intervalo de paso entre vehículos.

**Tabla 2.6.** Costes iniciales totales de implantación de posibles variantes en sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada según el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Centros de costes	Trolebús (eléctrico) biarticulado, de 25 m <sup>(a)</sup>	Autobús diésel articulado, de 20 m <sup>(b)</sup>	Tranvía de 40 m <sup>(c)</sup>
Sistema de suministro de energía de tracción	21,236,530 € <sub>19</sub>	No Aplic.	19,305,936 € <sub>19</sub>
Adquisición de vehículos	32 ud. × 1,266,952 € <sub>19</sub> /ud.	37 ud. × 470,582 € <sub>19</sub> /ud.	21 ud. × 4,042,180 € <sub>19</sub> /ud.
	40,542,466 € <sub>19</sub>	17,411,541 € <sub>19</sub>	84,885,788 € <sub>19</sub>
Instalaciones de depósito y talleres	16,289,384 € <sub>19</sub>	12,066,210 € <sub>19</sub>	30,165,525 € <sub>19</sub>
Resto	Ídem Tabla 2.4 (BRT / BHLS)	Ídem Tabla 2.4 (BRT / BHLS)	Ídem Tabla 2.4 (Metro ligero / LRT)
TOTAL (sin depósito ni talleres)	278.97 M€ <sub>19</sub>	234.60 M€ <sub>19</sub>	369.65 M€ <sub>19</sub>
TOTAL (con depósito y talleres)	295.26 M€ <sub>19</sub>	246.67 M€ <sub>19</sub>	399.81 M€ <sub>19</sub>

<sup>(a)</sup> Flota de 32 trolebuses (28 en operación y 4 en reserva) con alimentación eléctrica, de 25 m de longitud y 145 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>).

<sup>(b)</sup> Flota de 37 autobuses articulados (34 en operación y 3 en reserva) de 20 m de longitud y 120 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>), con motorización diésel.

<sup>(c)</sup> Flota de 21 tranvías (18 en operación y 3 en reserva) de 40 m de longitud y 240 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>).

### 2.3.2.1.b. Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013)

Análogamente a lo realizado con anterioridad para el estudio desarrollado por la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008), en la Tabla 2.7 se sintetizan los costes de inversión inicial que, de acuerdo a los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013), corresponderían a la implementación de un nuevo sistema de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia en la ciudad de Reading (Reino Unido), ya sea de tipo LRT (metro ligero) o de tipo BRT/BHLS (materializado mediante autobuses articulados guiados circulando sobre plataforma reservada). Recuérdese al respecto que la hipotética red a implantar tendría una longitud total de 22.4 km (con 16.5 km de vía doble o carril doble y 5.9 km de vía única o carril único). Por otra parte, los costes indicados en los estudios originales corresponden al primer trimestre de 2007, por lo que se ha procedido a actualizarlos mediante la aplicación de un factor de ajuste igual al cociente entre los índices armonizados de precios al consumidor (HICP) de Reino Unido en mayo de 2019 y en enero de 2007 (haciendo coincidir así el período de actualización con el aplicado al estudio alemán de la FGSV). A partir de datos tomados de Eurostat<sup>59</sup>, este factor de ajuste de precios se cifra en 1.3387 (inflación acumulada del 33.87% en Reino Unido a lo largo del período de actualización). Además, se ha aplicado finalmente para la conversión entre libras esterlinas (unidad monetaria del estudio original) y euros el tipo medio de cambio del mes de mayo de 2019 según datos de Eurostat<sup>60</sup> (1 € = 0.87176 £).

<sup>59</sup> [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=prc\\_hicp\\_midx&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=prc_hicp_midx&lang=en) [Acceso: agosto 2019]

<sup>60</sup> [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ert\\_bil\\_eur\\_m&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ert_bil_eur_m&lang=en) [Acceso: agosto 2019]

**Tabla 2.7.** Costes iniciales totales de implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS) según los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Centros de costes	Metro ligero / LRT <sup>(a)</sup>		BRT / BHLS con autobús guiado <sup>(b)</sup>	
	GBP-01/2007 (£'07)	EUR-05/2019 (€'19)	GBP-01/2007 (£'07)	EUR-05/2019 (€'19)
Preparación del emplazamiento	9,719,000	14,924,887	9,886,000	15,181,339
Obras de plataforma reservada y viales	15,172,000	23,298,733	15,450,000	23,725,641
Trabajos medioambientales, paisajísticos y arquitectónicos	4,537,000	6,967,199	4,041,000	6,205,522
Estructuras y puentes, viaductos, etc.	9,158,000	14,063,393	9,158,000	14,063,393
Vía tranviaria	20,958,000	32,183,947	No Aplic.	No Aplic.
Paradas y estaciones	16,471,000	25,293,529	16,918,000	25,979,960
Sistema de suministro de energía de tracción	17,447,000	26,792,314	No Aplic.	No Aplic.
Sistemas de comunicaciones y control	10,458,000	16,059,725	8,409,000	12,913,198
Sistema de señalización y priorización de intersecciones viarias	7,661,000	11,764,539	6,681,000	10,259,612
Obras auxiliares (viales de acceso a las obras, posibles demoliciones, etc.)	4,370,000	6,710,748	3,872,000	5,945,999
Depósito e instalaciones de mantenimiento	9,938,000	15,261,192	7,337,000	11,266,992
SUBTOTAL: Coste neto de construcción	125,889,000	193,320,206	81,752,000	125,541,655
Costes adicionales relacionados con el proyecto y su construcción	48,089,598	73,848,319	31,229,264	47,956,912
SUBTOTAL: Coste de construcción del proyecto	173,978,598	267,168,524	112,981,264	173,498,568
Adquisición de terrenos	43,520,000	66,831,060	39,240,000	60,258,520
Conexión a las redes y provisión de servicios públicos, y desvío de servicios afectados	45,320,824	69,596,478	29,096,383	44,681,575
Aseguramiento de la compatibilidad electromagnética	750,000	1,151,730	250,000	383,910
Gastos del promotor en relación a operador y concesionario	5,035,560	7,732,808	3,270,080	5,021,666
SUBTOTAL: Coste total del proyecto (sin vehículos)	268,604,982	412,480,601	184,837,727	283,844,239
Adquisición de vehículos	37,674,000	57,853,708	12,060,000	18,519,820
Pruebas de marcha de los vehículos	1,130,220	1,735,611	603,000	925,991
TOTAL: Coste total de implantación del sistema	307,409,202	472,069,920	197,500,727	303,290,051

(a) Flota de 18 tranvías Bombardier Flexity Swift CR-4000 (15 en operación y 3 en reserva) de 30.1 m de longitud y 208 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>).

(b) Flota de 30 autobuses articulados New Flyer DE60LF-BRT (25 en operación y 5 en reserva), de 18.6 m de longitud y 115 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>), con motor de combustión interna y transmisión eléctrica, a los que se han incorporado los dispositivos del sistema de guiado óptico.

De acuerdo a los costes de implementación recopilados en la Tabla 2.7, el sistema de tipo BRT/BHLS precisaría una inversión inicial total un 35.8% menor que la necesaria para un sistema de LRT o metro ligero. Esta diferencia en la inversión requerida tiene su origen fundamentalmente en los siguientes elementos o centros de costes: adquisición de vehículos, construcción de la vía tranviaria específica del sistema LRT, sistema de suministro de energía de tracción (inexistente en el BRT/BHLS si no se utilizan trolebuses), y conexión a las redes y provisión de servicios públicos con desvío de los servicios afectados.

Por otra parte, en la Tabla 2.8 se calculan los costes unitarios proporcionales o prorrateados que corresponderían a cada apartado, grupo de elementos o centro de costes, de cara a una posible extrapolación de costes de implantación —con las debidas precauciones— a otras líneas o redes que presenten atributos diferentes (tales como longitud de las líneas, tamaño de la flota de vehículos, número de paradas o estaciones, superficie de terreno a ocupar para depósito y talleres, etc.).

**Tabla 2.8.** Costes iniciales prorrateados para la implantación de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Centros de costes	Magnitud de prorrateo	Metro ligero / / LRT <sup>(a)</sup>	BRT / BHLS autobús guiado <sup>(b)</sup>
Preparación del emplazamiento	Longitud total de infraestr.	666,290 [€ <sub>19</sub> /km]	677,738 [€ <sub>19</sub> /km]
Obras de plataforma reservada y viales	Long. equivalente con vía/carril doble <sup>(c)</sup>	1,140,232 [€ <sub>19</sub> /km]	1,161,124 [€ <sub>19</sub> /km]
Trabajos medioambientales, paisajísticos y arquitectónicos	Longitud total de infraestr.	311,036 [€ <sub>19</sub> /km]	277,032 [€ <sub>19</sub> /km]
Estructuras especiales (puentes, viaductos, etc.)	Nº de estructuras <sup>(d)</sup>	14,063,393 [€ <sub>19</sub> /estructura]	14,063,393 [€ <sub>19</sub> /estructura]
Vía tranviaria	Long. equivalente con vía doble <sup>(c)</sup>	1,575,071 [€ <sub>19</sub> /km]	No Aplic.
Paradas y estaciones	Unidades de parada <sup>(e)</sup>	790,423 [€ <sub>19</sub> /parada]	811,874 [€ <sub>19</sub> /parada]
	Longitud total de infraestr.	1,129,175 [€ <sub>19</sub> /km]	1,159,820 [€ <sub>19</sub> /km]
Sistema de suministro de energía de tracción	Long. equivalente con vía doble <sup>(c)</sup> <sup>(f)</sup>	1,311,206 [€ <sub>19</sub> /km]	No Aplic.
Sistemas de comunicaciones y control	Longitud total de infraestr.	716,952 [€ <sub>19</sub> /km]	576,482 [€ <sub>19</sub> /km]
Sistema de señalización y priorización de intersecciones viarias	Nº de intersecciones reguladas o controladas <sup>(g)</sup>	165,698 [€ <sub>19</sub> /intersecc.]	205,192 [€ <sub>19</sub> /intersecc.]
	Longitud total de infraestr.	525,203 [€ <sub>19</sub> /km]	458,018 [€ <sub>19</sub> /km]
Obras auxiliares (viales de acceso a las obras, posibles demoliciones, etc.)	Longitud total de infraestr.	299,587 [€ <sub>19</sub> /km]	265,446 [€ <sub>19</sub> /km]
Depósito e instalaciones de mantenimiento	Tamaño de la flota de vehículos	847,844 [€ <sub>19</sub> /veh.]	375,566 [€ <sub>19</sub> /veh.]
SUBTOTAL: Coste neto de construcción	Longitud total de infraestr.	8,630,366 [€ <sub>19</sub> /km]	5,604,538 [€ <sub>19</sub> /km]
Costes adicionales relacionados con el proyecto y su construcción	% sobre coste neto de construcción	38.2%	38.2%
SUBTOTAL: Coste de construcción del proyecto	Longitud total de infraestr.	11,927,166 [€ <sub>19</sub> /km]	7,745,472 [€ <sub>19</sub> /km]
Adquisición de terrenos para depósito, instalaciones de mantenimiento y aparcamientos disuasorios (P+R)	Superficie ocupada en planta	614 [€ <sub>19</sub> /m <sup>2</sup> ]	614 [€ <sub>19</sub> /m <sup>2</sup> ]
Adquisición de terrenos para infraestructura de circulación	Longitud total de infraestr.	781,531 [€ <sub>19</sub> /km]	781,531 [€ <sub>19</sub> /km]
Conexión a las redes y provisión de servicios públicos, y desvío de servicios afectados	Longitud total descontando long. no afectada por servicios públicos	3,177,921 [€ <sub>19</sub> /km]	3,177,921 [€ <sub>19</sub> /km]
Aseguramiento de la compatibilidad electromagnética	Longitud total de infraestr.	51,417 [€ <sub>19</sub> /km]	17,139 [€ <sub>19</sub> /km]
Gastos del promotor en relación a operador y concesionario	% sobre coste neto de construcción	4%	4%
SUBTOTAL: Coste total del proyecto (sin vehículos)	Longitud total de infraestr.	18,414,313 [€ <sub>19</sub> /km]	12,671,618 [€ <sub>19</sub> /km]
Adquisición de vehículos	Nº de vehículos en la flota	3,214,095 [€ <sub>19</sub> /veh.]	617,327 [€ <sub>19</sub> /veh.]
Pruebas de marcha de los vehículos	% sobre coste de adquisición de vehículos	3%	5%
TOTAL: Coste total de implantación del sistema	Longitud total de infraestr.	21,074,550 [€ <sub>19</sub> /km]	13,539,734 [€ <sub>19</sub> /km]

<sup>(a)</sup> Ídem Nota <sup>(a)</sup> en Tabla 2.7.

<sup>(b)</sup> Ídem Nota <sup>(b)</sup> en Tabla 2.7.

<sup>(c)</sup> Para los tipos de costes señalados se acepta la hipótesis de que el coste correspondiente a vía única o carril único equivale a dos tercios del que se tendría con vía doble o carril doble, a efectos de calcular una longitud equivalente de vía/carril doble.

(d) Originalmente se incluiría un paso elevado y tres pasarelas peatonales. Sin embargo, se ha considerado únicamente el paso elevado debido a la imposibilidad de distinguir los costes (muy diferentes) correspondientes a uno y otro tipo de estructuras.

(e) 32 paradas o estaciones para cada sistema, aunque incluyendo diferentes tipos de paradas.

(f) Se incluye en el coste medio por kilómetro la parte proporcional de una dotación total de 9 subestaciones.

(g) El número de intersecciones reguladas o controladas asciende a 71 para el sistema LRT y a 50 para el BRT o BHLS.

Por último, en la Tabla 2.9 se indican los costes iniciales de inversión que corresponderían a posibles variantes en el sistema de BRT o BHLS, que en este caso afectan únicamente a los tipos de vehículos. En ambas alternativas se contempla el uso de autobuses que incorporan tecnologías que en el momento de los estudios originales se consideraban menos maduras y con menor tiempo en el mercado, y que por tanto conllevan un coste adicional en términos de inversión inicial (entre 18.0 y 28.1 M€).

**Tabla 2.9.** Costes iniciales totales de implantación de posibles variantes en sistemas de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS) según los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Centros de costes	Autobús guiado (Phileas) en plataforma reservada <sup>(a)</sup>	Autobús guiado (Civis) en plataforma reservada <sup>(b)</sup>
Coste total del proyecto (sin vehículos)	Ídem Tabla 2.7 (BRT / BHLS)	Ídem Tabla 2.7 (BRT / BHLS)
Adquisición de vehículos	30 ud. × 1,474,215 € <sub>19</sub> /ud.	30 ud. × 1,188,585 € <sub>19</sub> /ud.
	44,226,437 € <sub>19</sub>	35,657,565 € <sub>19</sub>
Pruebas de marcha de los vehículos	7.5% sobre coste de adquisición	5% sobre coste de adquisición
	3,316,983 € <sub>19</sub>	1,782,878 € <sub>19</sub>
TOTAL: Coste total de implantación del sistema	331.39 M€ <sub>19</sub>	321.28 M€ <sub>19</sub>

(a) Flota de 30 autobuses articulados APTS Phileas (25 en operación y 5 en reserva), de 18.4 m de longitud y 129 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>), con propulsión híbrida (motor de combustión interna y transmisión eléctrica) y con sistema de guiado magnético.

(b) Flota de 30 autobuses articulados Irisbus Civis (25 en operación y 5 en reserva), de 18 m de longitud y 120 plazas de capacidad (con 4 prs/m<sup>2</sup>), con propulsión híbrida (motor de combustión interna y transmisión eléctrica) y con sistema de guiado óptico.

### 2.3.2.2. Costes de operación y mantenimiento

#### 2.3.2.2.a. Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV)

En la Tabla 2.10 se detalla el cálculo de los costes de operación y mantenimiento de los sistemas de metro ligero o LRT y de sistemas BRT o BHLS basados en autobuses de alta capacidad circulando sobre plataforma reservada, de acuerdo a los datos indicados en el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008). Bajo las premisas de dicho estudio, la suma anual de costes de operación y mantenimiento del sistema de tipo BRT/BHLS resulta un 17.6% inferior a la del sistema de metro ligero. Esta misma proporción se mantiene también en términos relativos (€/veh-km y €/plaza-km) debido a la hipótesis de idéntica capacidad de los vehículos e igual número de kilómetros recorridos. Las razones que explican el menor coste del sistema BRT/BHLS se hallarían no tanto en los costes de operación propiamente dichos, sino más bien en los de mantenimiento, tanto de los elementos de infraestructura como de los vehículos.

**Tabla 2.10.** Costes de operación y mantenimiento de sistemas de metro ligero o LRT y de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Concepto	Metro ligero / / LRT <sup>(a)</sup>	BRT / BHLS <sup>(b)</sup>
Costes fijos anuales de los vehículos		
Impuesto de vehículos a motor	0 € <sub>19</sub> /veh-año	0 € <sub>19</sub> /veh-año
Seguros	11,342 € <sub>19</sub> /veh-año	5,671 € <sub>19</sub> /veh-año
Costes administrativos	11,825 € <sub>19</sub> /veh-año	11,825 € <sub>19</sub> /veh-año
Suma de costes fijos de los vehículos	23,167 € <sub>19</sub> /veh-año	17,496 € <sub>19</sub> /veh-año
Costes anuales del personal de conducción		
Horas de uso comercial	3,000 h/veh-año	3,000 h/veh-año
Sobrecarga por períodos de traslados	500 h/veh-año	500 h/veh-año
Horas de trabajo totales	3,500 h/veh-año	3,500 h/veh-año
Coste completo por hora de trabajo	33.79 € <sub>19</sub> /h	33.79 € <sub>19</sub> /h
Coste del personal de conducción	118,249 € <sub>19</sub> /veh-año	118,249 € <sub>19</sub> /veh-año
	1.97 € <sub>19</sub> /veh-km	1.97 € <sub>19</sub> /veh-km
Costes de combustible o energía eléctrica para operación de vehículos		
Consumo de combustible o energía eléctrica	3.5 kWh/km	72 l/100km
Coste unitario del combustible o energía eléctrica	0.103 € <sub>19</sub> /kWh	1.207 € <sub>19</sub> /l
Kilometraje anual por vehículo	60,000 km/veh-año	60,000 km/veh-año
Coste de combustible o energía eléctrica	0.359 € <sub>19</sub> /veh-km	0.869 € <sub>19</sub> /veh-km
	21,538 € <sub>19</sub> /veh-año	52,126 € <sub>19</sub> /veh-año
Costes de reparaciones y mantenimiento de vehículos		
Coste por reparaciones y mantenimiento	1.03 € <sub>19</sub> /veh-km	0.60 € <sub>19</sub> /veh-km
	61,538 € <sub>19</sub> /veh-año	36,199 € <sub>19</sub> /veh-año
Costes de mantenimiento de los elementos de infraestructura		
Vía o vial de circulación	59,124 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	12,066 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Paradas o estaciones	24,132 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	24,132 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Sistema de control y gestión de la operación	50,678 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	50,678 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Instalaciones de catenaria e hilo de contacto	18,703 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	No Aplic.
Subestaciones	4,344 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	No Aplic.
Talleres de mantenimiento	13,092 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	4,676 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Edificios del depósito	33,665 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	14,027 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Suma de costes de mantenimiento de los elementos de infraestructura	203,738 € <sub>19</sub> /km(línea)-año	105,579 € <sub>19</sub> /km(línea)-año
Coste total de operación y mantenimiento		
Suma de costes de operación y mantenimiento	11.26 M€ <sub>19</sub> /año	9.28 M€ <sub>19</sub> /año
	5.86 € <sub>19</sub> /veh-km	4.83 € <sub>19</sub> /veh-km
	0.0404 € <sub>19</sub> /plaza-km	0.0333 € <sub>19</sub> /plaza-km

<sup>(a)</sup> Ídem Nota <sup>(a)</sup> en Tabla 2.4.

<sup>(b)</sup> Ídem Nota <sup>(b)</sup> en Tabla 2.4.

### 2.3.2.2.b. Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013)

En la Tabla 2.11 se especifican los costes de operación y mantenimiento correspondientes a los sistemas de tipo LRT (metro ligero) y de autobús articulado guiado sobre plataforma reservada (BRT/BHLS), conforme a los datos utilizados en los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). En este caso, los costes de operación y mantenimiento del sistema BRT/BHLS resultarían un 5.0% superiores a los calculados para el modo LRT en términos absolutos de aportación al coste anual del sistema. No obstante, en relación a la distancia total recorrida por los vehículos (veh-km), los costes de operación y mantenimiento del sistema BRT/BHLS serían un 34.7% inferiores, mientras que resultarían un 18.8% superiores en términos de coste por plaza-km. En cualquier caso, los costes de operación y mantenimiento estimados por Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013) parecen resultar inusualmente elevados.

**Tabla 2.11.** Costes de operación y mantenimiento de sistemas de metro ligero o LRT y de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), obtenidos a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Concepto	Metro ligero / LRT <sup>(a)</sup>	BRT / BHLS con autobús guiado <sup>(b)</sup>
Costes generales relacionados con la operación	6,870,454 €/19/año	6,673,892 €/19/año
Costes de operación relacionados con los vehículos		
Conductores	93,845 €/19/veh-año	90,040 €/19/veh-año
	2.20 €/19/veh-km	2.19 €/19/veh-km
Inspectores	38,476 €/19/veh-año	38,493 €/19/veh-año
	0.90 €/19/veh-km	0.93 €/19/veh-km
Consumo de combustible o energía eléctrica	4.40 kWh/km	72.37 l/100km
Coste unitario de combustible o energía eléctrica <sup>(c)</sup>	0.1013 €/19/kWh	0.4328 €/19/l
Kilometraje anual por vehículo	42,667 km/veh-año	41,186 km/veh-año
Coste de combustible o energía eléctrica	19,025 €/19/veh-año	12,899 €/19/veh-año
	0.446 €/19/veh-km	0.313 €/19/veh-km
Otros	21,072 €/19/veh-año	16,892 €/19/veh-año
	0.49 €/19/veh-km	0.41 €/19/veh-km
Subtotal de los costes de operación relacionados con los vehículos	172,418 €/19/veh-año	158,325 €/19/veh-año
	4.04 €/19/veh-km	3.84 €/19/veh-km
Costes de operación relacionados con las infraestructuras	41,270 €/19/km(línea)-año	50,594 €/19/km(línea)-año
Costes de operación relacionados con sistemas electromecánicos	3,016 €/19/km(línea)-año	3,016 €/19/km(línea)-año
Costes generales relacionados con el mantenimiento	142,815 €/19/año	142,815 €/19/año
Costes de mantenimiento relacionados con los vehículos <sup>(d)</sup>	146,824 €/19/veh-año	120,497 €/19/veh-año
	3.44 €/19/veh-km	2.93 €/19/veh-km
Costes de mantenimiento relacionados con las infraestructuras	59,917 €/19/km(línea)-año	31,673 €/19/km(línea)-año
Costes de mantenimiento relacionados con sistemas electromecánicos	102,559 €/19/km(línea)-año	52,582 €/19/km(línea)-año
Total de costes de operación y mantenimiento	17.39 M€/19/año	18.27 M€/19/año
	22.64 €/19/veh-km	14.78 €/19/veh-km
	0.127 €/19/plaza-km	0.151 €/19/plaza-km

<sup>(a)</sup> Ídem Nota <sup>(a)</sup> en Tabla 2.7.

<sup>(b)</sup> Ídem Nota <sup>(b)</sup> en Tabla 2.7.

<sup>(c)</sup> Este dato no se revela explícitamente en los estudios originales de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013), sino que ha sido calculado a partir de valores interrelacionados que se indican en dichos estudios originales.

<sup>(d)</sup> Se han considerado los valores incluidos en Hodgson *et al.* (2013). Sin embargo, estos difieren de los indicados previamente en Hodgson (2011), siendo estos últimos sensiblemente menores.

### 2.3.2.3. Coste total anual del sistema de transporte

#### 2.3.2.3.a. Estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV)

A continuación, en las Tablas 2.12 y 2.13 se analizan respectivamente los costes totales anuales del sistema de tipo metro ligero o LRT y del sistema BRT o BHLS basado en autobuses de alta capacidad sobre plataforma reservada, según el estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008). Se trata del coste soportado en total por el conjunto de productores del servicio de transporte, dejando al margen otras clases de costes asumidos por los demás agentes potencialmente afectados (viajeros, resto de la sociedad, etc.). Se incluye por tanto el coste anualizado de amortización del capital invertido en las infraestructuras —o al menos en determinados tipos de infraestructuras— y en los vehículos, junto con el coste anual de operación y mantenimiento.



**Tabla 2.12.** Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de metro ligero o LRT, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Concepto	Inversión inicial	Vida útil (años)	Valor final o residual	Tasa de interés	Coste
Coste de capital de las infraestructuras					
Vía	33.79 M€ <sub>19</sub>	35	15%	3%	1.49 M€ <sub>19</sub> /año
Paradas o estaciones	12.07 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.81 M€ <sub>19</sub> /año
Sistema de control y gestión de la operación	14.48 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.97 M€ <sub>19</sub> /año
Instalaciones de catenaria e hilo de contacto	14.96 M€ <sub>19</sub>	35	0%	3%	0.70 M€ <sub>19</sub> /año
Subestaciones	4.34 M€ <sub>19</sub>	35	0%	3%	0.20 M€ <sub>19</sub> /año
Depósito (sin talleres)	21.72 M€ <sub>19</sub>	50	0%	3%	0.84 M€ <sub>19</sub> /año
Taller de mantenimiento y operaciones	8.45 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.57 M€ <sub>19</sub> /año
Coste de capital de los vehículos					
Flota de vehículos	96.53 M€ <sub>19</sub>	30	0%	3%	4.92 M€ <sub>19</sub> /año
Costes de operación y mantenimiento					
Coste anual de operación y mantenimiento	---	---	---	---	11.26 M€ <sub>19</sub> /año
Costes totales					
Coste total por año	---	---	---	---	21.77 M€ <sub>19</sub> /año
Coste total por vehículo-km	---	---	---	---	11.34 € <sub>19</sub> /veh-km
Coste total por plaza-km	---	---	---	---	0.0782 € <sub>19</sub> /plz-km

**Tabla 2.13.** Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de BRT o BHLS sobre plataforma reservada, derivados del estudio de la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008).

Concepto	Inversión inicial	Vida útil (años)	Valor final o residual	Tasa de interés	Coste
Coste de capital de las infraestructuras					
Vial de circulación	12.07 M€ <sub>19</sub>	13	15%	3%	1.02 M€ <sub>19</sub> /año
Paradas o estaciones	12.07 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.81 M€ <sub>19</sub> /año
Sistema de control y gestión de la operación	14.48 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.97 M€ <sub>19</sub> /año
Depósito (sin talleres)	9.05 M€ <sub>19</sub>	50	0%	3%	0.35 M€ <sub>19</sub> /año
Taller de mantenimiento y operaciones	3.02 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.20 M€ <sub>19</sub> /año
Coste de capital de los vehículos					
Flota de vehículos	19.31 M€ <sub>19</sub>	12	0%	3%	1.94 M€ <sub>19</sub> /año
Costes de operación y mantenimiento					
Coste anual de operación y mantenimiento	---	---	---	---	9.28 M€ <sub>19</sub> /año
Costes totales					
Coste total por año	---	---	---	---	14.58 M€ <sub>19</sub> /año
Coste total por vehículo-km	---	---	---	---	7.59 € <sub>19</sub> /veh-km
Coste total por plaza-km	---	---	---	---	0.0524 € <sub>19</sub> /plz-km

Del estudio desarrollado por la ‘Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes’ (FGSV, 2008) se extrae que el coste total anual para los productores resultaría un 33.0% inferior con el sistema de tipo BRT/BHLS en comparación con el metro ligero o LRT (esta misma proporción se mantiene para los costes totales por vehículo-km y por plaza-km debido a las hipótesis asumidas en el estudio original). La parte de mayor peso en esta diferencia de coste anual corresponde al coste de capital de los vehículos, aunque también el coste de capital de las infraestructuras y los costes de operación y mantenimiento desempeñan un papel importante.

### 2.3.2.3.b. Estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013)

A continuación se ha efectuado, en las Tablas 2.14 y 2.15, un análisis similar al descrito en el epígrafe 2.3.2.3.a, pero empleando en esta ocasión los datos tomados de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). Este tipo de síntesis no se llega a realizar en los estudios citados, por lo que se han adoptado a tal efecto los mismos criterios que se emplearon en el análisis desarrollado por la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008) en cuanto a tipologías de infraestructuras a considerar para la amortización del capital, vidas útiles, valores finales o residuales, tasa de interés, etc.

**Tabla 2.14.** Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de metro ligero o LRT, calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Concepto	Inversión inicial	Vida útil (años)	Valor final o residual	Tasa de interés	Coste
Coste de capital de las infraestructuras					
Obras de plataforma reservada	22.60 M€ <sub>19</sub>	35	15%	3%	1.00 M€ <sub>19</sub> /año
Vía tranviaria o de metro ligero	30.89 M€ <sub>19</sub>	35	15%	3%	1.36 M€ <sub>19</sub> /año
Paradas o estaciones	24.28 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	1.63 M€ <sub>19</sub> /año
Sistema de control y gestión de la operación	11.41 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.77 M€ <sub>19</sub> /año
Sistema de suministro de energía de tracción	25.90 M€ <sub>19</sub>	35	0%	3%	1.21 M€ <sub>19</sub> /año
Depósito (sin talleres)	10.50 M€ <sub>19</sub>	50	0%	3%	0.41 M€ <sub>19</sub> /año
Taller de mantenimiento y operaciones	4.09 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.27 M€ <sub>19</sub> /año
Coste de capital de los vehículos					
Flota de vehículos	57.85 M€ <sub>19</sub>	30	0%	3%	2.95 M€ <sub>19</sub> /año
Costes de operación y mantenimiento					
Coste anual de operación y mantenimiento	---	---	---	---	17.39 M€ <sub>19</sub> /año
Costes totales					
Coste total por año	---	---	---	---	26.99 M€ <sub>19</sub> /año
Coste total por vehículo-km	---	---	---	---	35.14 € <sub>19</sub> /veh-km
Coste total por plaza-km	---	---	---	---	0.1969 € <sub>19</sub> /plz-km

**Tabla 2.15.** Costes totales anuales (del conjunto de productores) del sistema de autobús guiado sobre plataforma reservada (BRT o BHLS), calculados a partir de los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

Concepto	Inversión inicial	Vida útil (años)	Valor final o residual	Tasa de interés	Coste
Coste de capital de las infraestructuras					
Obras de plataforma reservada y viales	23.02 M€ <sub>19</sub>	13	15%	3%	1.94 M€ <sub>19</sub> /año
Paradas o estaciones	24.94 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	1.68 M€ <sub>19</sub> /año
Sistema de control y gestión de la operación	9.95 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.67 M€ <sub>19</sub> /año
Depósito (sin talleres)	8.11 M€ <sub>19</sub>	50	0%	3%	0.32 M€ <sub>19</sub> /año
Taller de mantenimiento y operaciones	2.70 M€ <sub>19</sub>	20	0%	3%	0.18 M€ <sub>19</sub> /año
Coste de capital de los vehículos					
Flota de vehículos	18.52 M€ <sub>19</sub>	12	0%	3%	1.86 M€ <sub>19</sub> /año
Costes de operación y mantenimiento					
Coste anual de operación y mantenimiento	---	---	---	---	18.27 M€ <sub>19</sub> /año
Costes totales					
Coste total por año	---	---	---	---	24.91 M€ <sub>19</sub> /año
Coste total por vehículo-km	---	---	---	---	20.16 € <sub>19</sub> /veh-km
Coste total por plaza-km	---	---	---	---	0.2056 € <sub>19</sub> /plz-km

De acuerdo a los datos tomados de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013), el coste total anual asumido por los productores resultaría un 7.7% inferior para el sistema BRT/BHLS en relación al metro ligero o LRT, en términos absolutos de coste anual del sistema. Esta reducción de costes se amplía hasta el 42.6% si se analiza en proporción a la distancia total recorrida por los vehículos (€/veh-km). Sin embargo, debido a la distinta capacidad unitaria de los vehículos de una y otra clase de sistemas, los costes totales por plaza-km resultan ligeramente mayores (un 4.4%) para el sistema BRT/BHLS que para el metro ligero o LRT. En todo caso, debe tenerse presente que los valores obtenidos parecen atípicamente elevados, debido fundamentalmente a los muy altos costes de operación y mantenimiento considerados en los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013).

#### 2.3.2.4. Conclusiones

Los estudios desarrollados por la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008) en Alemania y por Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013) en el Reino Unido coinciden en que el coste de inversión inicial para poner en marcha un sistema de transporte urbano y metropolitano de tipo BRT o BHLS se sitúa algo por debajo de los dos tercios ( $\frac{2}{3}$ ) del que sería necesario para implantar un sistema equivalente basado en rodadura ferroviaria (sistemas de metro ligero o LRT). Así, los costes de implementación de los sistemas de tipo LRT o metro ligero se situarían según estos estudios alrededor de los 20–21 M€/km, mientras que la implantación de un sistema equivalente basado en autobuses (BRT o BHLS) implicaría unos costes de inversión inicial entre 12 y 14 M€/km.

En materia de costes de operación y mantenimiento se observa una mayor disparidad. Según el estudio de la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008), este tipo de costes serían casi un 18% inferiores para los sistemas BRT o BHLS en idénticas condiciones de capacidad de los vehículos y frecuencia de paso. En cambio, según Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013), los costes de operación y mantenimiento de sistemas BRT/BHLS serían casi un 35% menores que para el LRT en relación a la distancia recorrida por los vehículos (coste por vehículo-km), pero un 19% superiores en proporción a la capacidad de transporte de viajeros (coste por plaza-km). De cualquier modo, los costes de operación y mantenimiento estimados por estos autores británicos (0.127 €/plaza-km para LRT y 0.151 €/plaza-km para BRT/BHLS) resultan muy superiores a los considerados en el estudio de origen alemán (0.0404 €/plaza-km para LRT y 0.0333 €/plaza-km para BRT/BHLS).

Finalmente, el coste total anual de producción del servicio de transporte (coste anualizado de amortización del capital invertido en infraestructuras y vehículos, más costes anuales de operación y mantenimiento) resultaría inferior para los sistemas BRT/BHLS con respecto a los de tipo LRT; concretamente, un 33% más reducido según la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008) y un 8% menor de acuerdo a los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). Sin embargo, en base a estos últimos autores, el coste total por plaza-km resultaría ligeramente inferior para el sistema de tipo LRT a pesar de que el coste total por vehículo-km sea casi un 43% menor para el BRT o BHLS (esta disparidad se debe a la influencia de la diferente capacidad de los vehículos). De nuevo, el coste total de producción del servicio resulta ser muy superior según los estudios de ámbito británico (en torno a 0.20 €/plaza-km para uno y otro sistema) que en el caso de los realizados por la FGSV (2008) en Alemania (0.0782 €/plaza-km para LRT y 0.0524 €/plaza-km para BRT/BHLS).



## 3. Descripción general del modelo

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo constituye una introducción general al modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado de viaje que es desarrollado detalladamente a lo largo de capítulos posteriores de la tesis (fundamentalmente Capítulos 5, 6, 7 y 8), de forma que el contenido de este capítulo suponga para el lector una primera aproximación orientativa hacia dicho modelo y contribuya a facilitar la posterior comprensión de su estructura y funcionamiento.

Con este propósito, se comienza estableciendo los tres escenarios que deben ser objeto de modelización (un escenario base y dos escenarios con modos ferroviarios ligeros y con autobuses semirrápidos en plataforma reservada como respectivas alternativas de sistemas de transporte público de capacidad intermedia), para a continuación definir la segmentación del horizonte o período de evaluación, dentro de cada posible escenario, en varias fases referidas a las diferentes condiciones de oferta y demanda de transporte que pueden tener lugar durante las etapas de implantación y posterior explotación de los sistemas de transporte público. Asimismo, se delimitan, para cada escenario y cada una de sus posibles fases o etapas, las alternativas modales de transporte que, además del propio sistema de transporte público, se contemplan como parte integrante del modelo (modos típicos de transporte motorizado privado y, por otra parte, principales modalidades de desplazamiento no motorizado y de 'micromovilidad', estas últimas al menos como opciones incluidas dentro de la formulación del reparto modal).

A continuación se introduce la necesidad de que el modelo planteado recoja y analice, de forma diferenciada, las características o condiciones particulares de cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que se pretenda estudiar la potencial implantación de un modo de capacidad intermedia, de cada tipo de período o franja horaria (horas punta, horas valle, períodos intermedios, etc.), y de cada posible sentido de viaje. También se presentará la discretización en años del tiempo transcurrido a lo largo del horizonte o período de evaluación.

Tras ello se realiza una aproximación general al tipo de tratamiento metodológico de la incertidumbre con el que se afrontará el diseño del modelo, caracterizado por la especificación como variables aleatorias de aquellas variables previsiblemente sujetas a un considerable nivel de incertidumbre, en aplicación de las técnicas de análisis estadístico-numérico conocidas como método de Montecarlo.

El capítulo continúa con una presentación inicial de varios principios metodológicos y simplificaciones básicas que guían y condicionan el planteamiento de ciertas partes o sectores del modelo (otras simplificaciones de menor calado se irán detallando a lo largo del desarrollo de dicho modelo). Entre estos aspectos se destacan el marco teórico de referencia en el que se basa el modelo de demanda de viajes y de reparto modal, las condiciones previas de diseño y entorno operativo supuestas por el modelo para la circulación de los distintos modos de transporte público, o los atributos o variables incluidas en la composición del coste generalizado de viaje para cada opción modal. También se incluyen al respecto las limitaciones asumidas sobre los datos de viajes realizados en las líneas de transporte público, junto con aspectos derivados de estas limitaciones y simplificaciones como el tratamiento homogeneizado del respectivo corredor, eje o itinerario.

Finalmente se introduce el esquema básico o general de funcionamiento del modelo desarrollado en esta tesis, en relación a sus sectores o partes principales, las funciones desempeñadas por las mismas y su adecuado orden de ejecución. Se presenta asimismo la división del núcleo central del modelo en

diferentes módulos de cálculo, así como la distinción entre tipos de bucles iterativos incorporada en el diseño de cada uno de estos módulos de cálculo.

### 3.2. ESCENARIOS A MODELIZAR

Tal como se indicó en el epígrafe 1.3 en relación con las características y objetivos específicos a los que ha de adaptarse el diseño general del modelo, el conjunto de escenarios alternativos que se incorporarán en la modelización debe ser acorde al carácter comparativo o incremental del análisis coste-beneficio, por lo que deben contemplarse tanto los posibles proyectos alternativos de inversión (situaciones o escenarios ‘con proyecto/alternativa’) como un escenario base o de referencia en el que ninguno de dichos proyectos se efectuase (situación o escenario ‘sin proyecto’). En consonancia con el objeto de estudio de esta tesis (sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia), es necesario analizar dos escenarios ‘con proyecto/alternativa’ que corresponderían respectivamente a la posible implantación, en uno o varios corredores, ejes o itinerarios, de cada uno de los dos tipos fundamentales de modos de capacidad intermedia: un modo ferroviario ligero (metro ligero o tranvía moderno) y un sistema de autobús semirrápido en plataforma reservada (BHLS o BRT). Complementariamente, es preciso definir un escenario base o de referencia (escenario ‘sin proyecto’) que represente la evolución más probable en el tiempo de la situación actual, caracterizándose generalmente dicho escenario por un plan de actuación de tipo continuista. En este caso, la opción más realista y objetiva para definir el escenario base de comparación pasa por plantear una situación actual en la que ya existiese sobre cada corredor, eje o itinerario una línea de transporte público con una cobertura zonal equivalente, pero operada mediante un modo de menor capacidad e inferior nivel de servicio que los nuevos sistemas propuestos. Así pues, como modo de transporte público de referencia a adoptar para esta comparación, procede seleccionar, de conformidad con la situación actualmente más típica, al autobús convencional en tráfico mixto. Por tanto, el escenario base consiste en prolongar en el tiempo, a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, la operación de una línea análoga de autobús convencional. En conclusión, la configuración de los distintos escenarios se basa en la premisa de que en cada corredor, eje o itinerario se pretende evaluar la posible sustitución de una línea de autobús convencional en tráfico mixto, ya existente, por una línea de similar trazado, bien de metro ligero o tranvía, o bien de BHLS o BRT.

Por tanto, el modelo a desarrollar incluirá el análisis de los tres escenarios siguientes:

- Escenario base (escenario ‘0’): consiste en mantener la operación de las respectivas líneas de transporte público mediante autobús convencional en tráfico mixto durante todo el horizonte o período de evaluación (escenario ‘sin proyecto’). Se trata en concreto de un escenario de tipo ‘*business as usual*’ (BAU). En el contexto particular del modelo, al escenario base o de referencia también se le denominará abreviadamente escenario ‘0’.
- Escenario ‘R’: se designa de esta forma al escenario (‘con proyecto/alternativa’) en el que se proyectaría e implantaría para cada corredor, eje o itinerario objeto de análisis una línea de transporte público mediante modos ferroviarios ligeros, ya sea bajo la denominación de metro ligero o de tranvía (moderno sobre plataforma reservada).
- Escenario ‘B’: esta designación hace referencia al escenario (‘con proyecto/alternativa’) en el cual se proyectaría e implantaría en cada uno de estos corredores, ejes o itinerarios una línea equivalente de autobús semirrápido en plataforma reservada (BHLS o BRT).

En la notación particular empleada para el desarrollo del modelo, los valores de variable que hagan referencia específica a cada uno de estos escenarios se van a denotar generalmente mediante el superíndice  $s$ , que por tanto podrá tomar respectivamente los valores  $s=0$  (escenario base o escenario ‘0’),  $s=R$  (escenario ‘R’) o  $s=B$  (escenario ‘B’).

### 3.3. SEGMENTACIÓN TEMPORAL DEL HORIZONTE O PERÍODO DE EVALUACIÓN

A lo largo del horizonte o período de evaluación, que puede llegar a comprender un elevado número de años (habitualmente no menos de 30 en estos casos), resulta preciso distinguir explícitamente, para cada escenario, varias fases relacionadas con las diferentes condiciones y características de oferta y demanda de transporte que pueden tener lugar durante las etapas de implantación y posterior explotación de los sistemas de transporte público. En este sentido, se van a considerar en la modelización a desarrollar las siguientes posibles fases o etapas dentro del horizonte o período de evaluación de cada escenario:

- Fase de implantación de los nuevos modos de transporte público: corresponde al período en el que se desarrolla la completa implementación (elaboración del proyecto, construcción, adquisición de vehículos, pruebas en blanco, etc.) de los sistemas de transporte público de nueva creación, hasta que estos están plenamente preparados para su puesta en servicio. Por consiguiente, esta fase o etapa incumbe solamente a los escenarios en los que efectivamente se implementa un nuevo sistema de transporte público de capacidad intermedia (escenarios 'R' y 'B'). En dichos escenarios y durante el transcurso de esta fase, se asume que ha de mantenerse la prestación del servicio de transporte público mediante el modo preexistente, es decir, mediante autobús convencional en tráfico mixto, si bien es cierto que las condiciones de operación del mismo pueden verse negativamente afectadas por las restricciones de capacidad viaria que van aparejadas a las obras de construcción de los nuevos sistemas. De hecho, durante esta etapa —además de concentrarse la mayor parte de los costes de inversión— pueden producirse adicionalmente los denominados costes de interrupción, que son aquellos derivados del conjunto de alteraciones que la construcción de una infraestructura genera a los usuarios del transporte y a la sociedad en su conjunto, como congestión, cambios provisionales en otros modos, molestias, ruidos, etc. (de Rus *et al.*, 2010: p. 56). Nótese que la duración de esta fase puede ser en general distinta en los escenarios 'R' y 'B', debido fundamentalmente a las diferentes características constructivas de los proyectos de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT.
- Fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público: se trata de la primera fase o etapa en el ciclo de vida comercial de los sistemas de transporte público de nueva implantación, a la que se da comienzo con la puesta en servicio de los nuevos modos y que se prolongaría durante un número de años en general bastante reducido. De acuerdo a su definición, esta fase o etapa afecta únicamente a los escenarios que suponen la implantación de un nuevo sistema de transporte público, es decir, a los escenarios 'R' y 'B'. Desde el punto de vista del comportamiento de la demanda, esta fase se caracterizaría por una progresiva readaptación de dicha demanda a los nuevos atributos de nivel de servicio que ofrece el modo de transporte público recientemente introducido. Así pues, en el modelo se asume que durante esta fase tiene lugar un cierto retardo entre la variación de nivel de servicio (coste generalizado en términos cuantitativos) generada con la entrada en funcionamiento del nuevo modo de transporte público (en comparación con el servicio de autobús convencional anteriormente en operación) y la respuesta producida en el comportamiento de la demanda ante dicha variación. Este retardo o desfase puede vincularse a efectos de inercia en el comportamiento decisional de los viajeros, relacionados con la posible necesidad de que transcurra un cierto período de tiempo hasta que todo el conjunto de los potenciales viajeros haya asimilado completamente —preferiblemente a través de la experimentación en primera persona— e incorporado a sus elecciones modales el balance de ventajas e inconvenientes que el nuevo modo de transporte público les puede producir. Esto se traduce en que la respuesta de la demanda ante el nivel de servicio ofrecido por el nuevo modo se vea un tanto 'amortiguada' en comparación con lo que el modelo reflejaría si no se contemplase en la modelización esta fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (es decir, un 'escalón' puntual de los volúmenes de demanda). De nuevo, la duración de esta fase podrá en general ser ligeramente distinta en los escenarios 'R' y 'B'.

- Fase de madurez del servicio (o fase de servicio consolidado): se trataría de la etapa definitiva —y generalmente de mayor duración en el tiempo— del ciclo de vida comercial de los sistemas de transporte público modelizados, dando comienzo tras el final de la fase de introducción y consolidación, y prolongándose indefinidamente hasta la hipotética retirada de servicio del sistema en cuestión (o, en el caso del modelo, hasta la finalización del horizonte o período de evaluación). Desde el punto de vista del previsible comportamiento de la demanda, esta etapa se caracterizaría por ajustarse a unos patrones más estabilizados y continuos en la relación entre las variaciones en el nivel de servicio ofrecido por el modo de transporte público (siendo generalmente dichas variaciones de menor cuantía y más progresivas durante esta etapa) y la respuesta producida en los volúmenes de demanda. En el modelo se prescindiría ya del efecto de ‘amortiguamiento’ (retardo o desfase) que caracterizaba a la fase anterior, y se asumiría en su lugar una relación directa entre las variaciones de coste generalizado de viaje estimadas entre dos años consecutivos para las respectivas opciones de transporte y la correspondiente modificación en el reparto modal. Esta fase de madurez del servicio forma parte de los dos escenarios en los que se implanta un nuevo sistema de transporte público de capacidad intermedia (escenarios ‘R’ y ‘B’), pero también del escenario ‘sin proyecto’ (escenario base o escenario ‘0’). De hecho, en este último escenario, que corresponde al mantenimiento indefinido del servicio de transporte público mediante autobús convencional en tráfico mixto, lo más razonable es considerar que la totalidad del horizonte o período de evaluación se encuadra ya desde un principio en su etapa de madurez.

En resumen, la Tabla 3.1 sintetiza esquemáticamente las fases o etapas en las que se divide el horizonte o período de evaluación en el caso de cada uno de los escenarios que forman parte del modelo.

**Tabla 3.1.** Segmentación del horizonte o período de evaluación en fases o etapas para cada uno de los escenarios que forman parte del modelo.

	Escenario ‘0’	Escenario ‘R’	Escenario ‘B’
Horizonte o período de evaluación	Fase de madurez	Fase de implantación	Fase de implantación
		Fase de introducción y consolidación	Fase de introducción y consolidación
		Fase de madurez	Fase de madurez

### 3.4. CONJUNTO DE OPCIONES MODALES EN CADA ESCENARIO Y FASE

Debido al objeto de estudio de la tesis, el modelo a desarrollar presta especial atención al análisis de las condiciones de operación, atributos ofrecidos de nivel de servicio y volumen de demanda de los diferentes modos de transporte público correspondientes a cada escenario. No obstante, es necesario tener en cuenta que los cambios en la oferta y en la demanda producidos por la introducción y servicio de los nuevos modos de capacidad intermedia también afectan de forma cruzada a las condiciones en las que se desarrollan los viajes en otras alternativas modales. Es decir, los usuarios de estas otras opciones modales pueden ver modificados sus propios costes de viaje en función de factores tanto intrínsecos a la propia opción (por ejemplo, el precio de los combustibles en el caso de los automóviles particulares) como por factores que son propios de otras alternativas (por ejemplo, la mayor o menor cuota de reparto modal obtenida por el transporte público —la cual depende a su vez, entre otras cuestiones, de sus atributos de nivel de servicio— influirá en el grado de congestión viaria en el que se desarrollan los



viajes en vehículos particulares). Además, la inclusión en el modelo de otras opciones modales es imprescindible para poder evaluar los posibles cambios en el excedente de los usuarios de dichas alternativas, así como para cuantificar las posibles variaciones en el total de los costes externos generados (por ejemplo, a través de cambios en el volumen de viajes realizados en automóvil particular).

En conclusión, resulta necesario afrontar el problema analizado con un enfoque relativamente multimodal, que vaya más allá del propio modo de transporte público. Por tanto, el modelo planteado debe estar diseñado para el pronóstico, en cada uno de los tres escenarios, de los futuros valores del conjunto de variables que caractericen las condiciones de oferta y demanda de cada una de las principales opciones modales de viaje, incluyendo aquellas que se consideren suficientemente significativas.

En cuanto a la opción genérica de viaje en transporte público, esta se particulariza mediante diferentes modos o sistemas dependiendo del escenario analizado y de sus sucesivas fases o etapas. Así, la opción disponible de transporte público será el autobús convencional en tráfico mixto para todo el escenario 'O', así como durante la fase de implantación tanto del escenario 'R' como del escenario 'B', ya que en dicha fase todavía no están en servicio los nuevos modos de capacidad intermedia. Por su parte, el metro ligero o tranvía moderno será la opción de transporte público en el escenario 'R' durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio y durante su fase de madurez, mientras que el sistema de BHLS o BRT desempeña un papel análogo en el escenario 'B' durante esas mismas fases (introducción y consolidación y fase de madurez).

En cuanto al resto de opciones modales, se han tratado de incluir las alternativas fundamentales y más relevantes, pero procurando no ampliar excesivamente su número por razones de simplicidad y manejabilidad del modelo. En este sentido, se ha centrado el foco en los modos de transporte motorizado privado más consolidados y en las principales modalidades de desplazamiento no motorizado y de 'micromovilidad' (tratando a las opciones modales de este segundo grupo al menos como alternativas incorporadas dentro de la formulación del reparto modal). En concreto, se han seleccionado para su inclusión en el modelo el automóvil particular y la moto o ciclomotor como dos opciones típicas de transporte motorizado privado<sup>61</sup>, mientras que en materia de desplazamiento no motorizado y de 'micromovilidad' se ha considerado al viaje a pie (modo peatonal) y a la bicicleta, junto con otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal, como opciones básicas. Estas cuatro alternativas al viaje en transporte público permanecen presentes en cualquiera de los tres escenarios y durante todas las posibles fases o etapas en las que se divide el horizonte o período de evaluación.

En el ámbito de la notación particular del modelo, la referencia específica a cada uno de estos modos de transporte en los valores de las variables va a ser generalmente indicada por medio del superíndice  $m$ . En particular, a dicho superíndice se le asignarán los siguientes valores para hacer mención a cada uno de los modos de transporte:

- $m=0$  para el transporte público con autobús convencional en tráfico mixto.
- $m=R$  para el transporte público con metro ligero o tranvía moderno.
- $m=B$  para el transporte público con BHLS o BRT.
- $m=C$  para el automóvil particular.
- $m=M$  para la moto o ciclomotor.
- $m=V$  para la bicicleta o pequeño vehículo urbano de movilidad personal.
- $m=P$  para el viaje a pie (modo peatonal).

<sup>61</sup> De cara a futuros modelos más avanzados, resultaría de interés la consideración de nuevas opciones de movilidad colaborativa en automóvil (*carpooling*, *carsharing*, etc.).

Así pues, el conjunto de opciones modales disponibles según el modelo en cada escenario y en cada una de sus fases o etapas queda resumido a continuación en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Resumen de opciones modales disponibles en cada escenario del modelo y en cada una de las fases o etapas del horizonte o período de evaluación.

Fases	Escenarios		
	Escenario 'O'	Escenario 'R'	Escenario 'B'
Fase de implantación	No Aplic.	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: autobús convencional (<math>m=0</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: autobús convencional (<math>m=0</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>
Fase de introducción y consolidación	No Aplic.	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: metro ligero o tranvía (<math>m=R</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: BHLS o BRT (<math>m=B</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>
Fase de madurez	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: autobús convencional (<math>m=0</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: metro ligero o tranvía (<math>m=R</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TP: BHLS o BRT (<math>m=B</math>)</li> <li>· Automóvil particular (<math>m=C</math>)</li> <li>· Moto/ciclomotor (<math>m=M</math>)</li> <li>· Bicicleta o vehículo de movilidad personal (<math>m=V</math>)</li> <li>· Viaje a pie (<math>m=P</math>)</li> </ul>

### 3.5. CARACTERIZACIÓN PARTICULAR DE LÍNEAS, PERÍODOS HORARIOS, SENTIDOS DE VIAJE Y AÑOS

#### 3.5.1. Caracterización particular de diferentes corredores, ejes o itinerarios

El modelo a desarrollar será concebido con la capacidad para analizar paralelamente los resultados de la potencial implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia en uno o varios corredores, ejes o itinerarios distintos, si bien es cierto que en el desarrollo práctico del modelo no se contemplarán posibles interacciones o efectos de red entre corredores diferentes (es decir, los cálculos del modelo van a ser independientes para cada uno de estos corredores, ejes o itinerarios, en caso de definirse efectivamente más de uno). Tal como se ha visto, cada uno de estos corredores, ejes o itinerarios analizados es asimilable al recorrido servido por una línea de transporte público existente (inicialmente con autobús convencional en tráfico mixto), en la cual se pretenda evaluar prospectivamente la posible implementación de un sistema de capacidad intermedia.

En consecuencia, el conjunto de características particulares empleado por el modelo para caracterizar a estos corredores, ejes o itinerarios debe ser definido separadamente para cada uno de ellos. A tal efecto, en el desarrollo efectivo del modelo se empleará en general el subíndice  $i$  para hacer referencia a los valores de variable asignados específicamente a un corredor, eje o itinerario en particular, así como a su correspondiente línea de transporte público. Cada uno de estos corredores y líneas respectivas se denotan, a nivel interno del modelo, mediante números naturales consecutivos (comenzando en 1) cuyo orden es asignado arbitrariamente —pero consistentemente a lo largo del modelo— por el analista, con independencia de la denominación comercial que estas líneas puedan recibir dentro de la red.

### 3.5.2. Diferenciación de períodos horarios

Tal como se anticipó en el epígrafe 1.3 al describir las características y objetivos específicos que dan forma al diseño general del modelo, este debe ser capaz de analizar separadamente las muy diferentes condiciones de demanda, oferta, costes de viaje, etc. que tienen lugar en diferentes períodos o franjas horarias (horas punta, horas valle, períodos intermedios, etc.). En principio, estos distintos períodos horarios pueden hacerse corresponder con diferentes horas del día (horas punta de la mañana y de la tarde según el sentido de viaje, horas valle, etc.), con diferentes tipos de días de la semana (días laborables, fines de semana, festivos), con distintas épocas del año (curso escolar, mes habitual de vacaciones estivales, período navideño, etc.), o incluso con una combinación entre estas distintas periodicidades. Así pues, el modelo a desarrollar permitirá definir el nivel de discretización en períodos que se considere más oportuno en cada caso, teniendo en cuenta la conveniencia de que cada uno de los períodos horarios definidos pueda considerarse razonablemente homogéneo en cuanto a condiciones de oferta y demanda de transporte. Idealmente, esta definición de razonable homogeneidad debe hacer referencia no solamente a la oferta y demanda del propio servicio de transporte público, sino también a las del resto de opciones modales (principalmente los modos motorizados privados).

En el contexto del modelo y su notación particular, los distintos períodos horarios definidos para un determinado corredor, eje o itinerario van a ser generalmente representados mediante el subíndice  $j$  en las respectivas variables. A nivel interno, este subíndice tomará valores de números naturales consecutivos (con inicio en 1), siendo la asignación entre tipo de período horario y valor numérico identificativo arbitraria por parte del analista (con la necesidad de que se respete, lógicamente, la consistencia interna de dicha asignación a lo largo del modelo).

### 3.5.3. Diferenciación de sentidos de viaje

Al igual que sucede con los aspectos anteriores, es necesario también que el modelo a desarrollar diferencie, en cada corredor, eje o itinerario y para cada uno de los períodos horarios, las condiciones de demanda y oferta propias de cada posible sentido de viaje. Esta diferenciación afecta lógicamente a aquellos casos en los que se analicen líneas de transporte público de doble sentido, siendo esta en principio la situación más frecuente (la excepción al respecto la constituyen las líneas circulares de sentido único). Debe tenerse en cuenta al respecto que en muchas ocasiones los desplazamientos de los viajeros —especialmente en el caso de los de tipo *commuter*— siguen patrones notablemente pendulares, de forma que mientras que durante un determinado período horario (por ejemplo la hora punta de la mañana) se produce la mayor carga de viajeros en uno de los sentidos del corredor, eje o itinerario, en el sentido opuesto el volumen de desplazamientos es comparativamente bajo. En cambio, esta situación puede invertirse durante otro período horario (por ejemplo, la hora punta de la tarde). Aunque este tipo de situaciones constituirían los ejemplos más representativos, la distinción entre las condiciones de demanda y oferta de transporte de cada sentido de viaje resulta necesaria en cualquier corredor, eje o itinerario sobre el que preste servicio una línea de doble sentido.

En relación con esta cuestión, la notación particular definida para el desarrollo del modelo empleará en general el subíndice  $k$  en las respectivas variables para identificar los distintos sentidos de viaje posibles. En el caso de aquellos corredores, ejes o itinerarios que acojan líneas de transporte público de doble sentido (líneas convencionales o longitudinales y líneas circulares de doble sentido), el subíndice  $k$  tomará los valores numéricos 1 y 2, donde cada uno de ellos es identificado arbitrariamente —pero consistentemente a lo largo del modelo— con un sentido de viaje. Por el contrario, en los casos que se refieran a una línea circular de sentido único, el subíndice  $k$  adoptará simplemente el valor numérico 1.

### 3.5.4. Discretización en el tiempo del horizonte o período de evaluación

Para estimar la evolución en el tiempo, a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, de los futuros valores de la serie de variables que caracterizan en cada escenario el estado o comportamiento

del sistema de transporte se hace necesario dividir o discretizar dicho intervalo de tiempo en unidades más pequeñas, a cada una de las cuales se les puedan atribuir propiedades homogéneas. Dadas las características y duración del horizonte de evaluación, la unidad de tiempo más adecuada para dicha discretización es el año.

Así pues, en el contexto de la notación particular del modelo, la referencia específica en los valores de las variables a cada uno de los años incluidos en el horizonte o período de evaluación va a ser indicada en general por medio del subíndice  $y$ . Desde el punto de vista del funcionamiento del modelo, los sucesivos años incluidos en el horizonte de evaluación se numeran secuencialmente con números naturales contados a partir de 1 (de forma que un valor de subíndice  $y=1$  hace referencia al primer año del horizonte o período de evaluación, y así sucesivamente hasta el final del mismo). Nótese además que este primer año del horizonte o período de evaluación ( $y=1$ ) es considerado en la modelización inmediatamente posterior al año base, que es aquel que representa las condiciones actuales a partir de las cuales se desarrollan las previsiones del modelo.

### **3.6. TRATAMIENTO METODOLÓGICO DE LA INCERTIDUMBRE**

El proceso de modelización de cualquier sistema de transportes está generalmente sometido a unos notables niveles de incertidumbre, particularmente cuando se trata de efectuar pronósticos sobre la evolución futura —especialmente si es a largo plazo— del comportamiento de dicho sistema. Este elevado nivel de incertidumbre proviene de una combinación entre los efectos, por una parte, de las limitaciones metodológicas (aquellas que están relacionadas con las limitadas capacidades analíticas del propio modelo para reflejar con total fidelidad la realidad presente o futura) y, por otra parte, de las limitaciones en la información disponible (incertidumbre sobre la exactitud de los valores que han de ser utilizados por el modelo como datos de entrada y, en especial, sobre la posible evolución futura de algunos de dichos datos).

De acuerdo al nivel metodológico más elevado de análisis de riesgo en la evaluación (presentado dentro del epígrafe 1.2.2), la incertidumbre asociada a todo el proceso de modelización ha de ser abordada desde el inicio mismo del desarrollo del modelo. Es decir, desde un principio se deberían tratar estadísticamente las variables sujetas a un cierto grado de incertidumbre —especialmente aquellas que puedan presentar una mayor influencia sobre los resultados finales— como variables aleatorias que se caracterizan por unas determinadas probabilidades de ocurrencia de sus posibles valores. En este sentido, el modelo a desarrollar en esta tesis va a hacer aplicación de la forma más clásica de las técnicas de análisis estadístico-numérico conocidas como método de Montecarlo.

Así, una vez planteada la modelización formal del problema, se han de identificar en primer lugar las variables o componentes iniciales del modelo —sean datos de entrada, parámetros, ecuaciones o funciones internas del modelo planteadas como aproximaciones o simplificaciones, etc.— sobre los que pueda existir un razonable nivel de incertidumbre, al efecto de considerarlas como fuentes primigenias de aleatoriedad en dicho modelo. A continuación se ha de seleccionar, en función de la información disponible, el tipo de distribución de probabilidad más apropiado para cada una de estas variables, junto con los valores específicos de los parámetros estadísticos (por ejemplo la media y la desviación estándar en el hipotético caso de que se tratase de una distribución normal) que, de acuerdo a los datos existentes sobre la variable, mejor se ajustarían al comportamiento observado o previsto de la misma.

En relación con esta cuestión, en el desarrollo del modelo se plantea el uso de distribuciones triangulares de probabilidad para la modelización estadística de las variables aleatorias iniciales. Este tipo de distribuciones quedan determinadas por medio de los valores de tres parámetros: el valor mínimo, el máximo y la moda o 'pico' de la distribución (valor con mayor densidad de probabilidad de ocurrencia). Las distribuciones triangulares de probabilidad aparecen contempladas como apropiadas —e incluso recomendadas bajo ciertas condiciones o circunstancias habituales— para el análisis de riesgos e incertidumbres en la evaluación de proyectos de transporte en varios manuales o documentos en los

que se trata este aspecto: de Rus *et al.* (2006: pp. 47-48), EC-DGRP (2008: pp. 236-237) y de Rus *et al.* (2010: p. 24). En particular, el segundo de ellos (EC-DGRP, 2008: p. 237) señala que las distribuciones triangulares son a menudo usadas con este propósito cuando es previsible que no se disponga de una información muy detallada o muy precisa del comportamiento de la variable, al ser los datos disponibles limitados o escasos. Otras posibles ventajas de la distribución triangular son su relativa sencillez, la acotación de valores entre límites mínimo y máximo bien definidos (que evita tener que recurrir a distribuciones truncadas para prevenir valores extremos anormalmente altos o bajos o con signo no válido), y la flexibilidad para definir con facilidad tanto distribuciones simétricas como asimétricas (simplemente haciendo que la moda coincida o no con el valor medio entre el mínimo y el máximo).

Por otra parte, las variables o componentes del modelo a través de las que se introduce inicialmente la aleatoriedad del problema deben ser seleccionadas y tratadas de tal forma que actúen a modo de variables independientes desde el punto de vista del modelo de cálculo, es decir, se excluyen a tal efecto aquellas otras variables que se obtengan a través de dependencias que se consideren deterministas, ya que la aleatoriedad que se observe en este último tipo de variables vendrá propagada únicamente desde las variables independientes que las determinan.

Al respecto puede distinguirse, por una parte, la aleatorización de los datos o variables de entrada (en relación con la incertidumbre de dichos datos) y, por otro lado, la aleatorización interna aplicada sobre ciertas funciones de cálculo propias del modelo (en relación con la incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización)<sup>62</sup>. En este último caso procederá considerar que, para cada combinación particular de valores de los datos de entrada de la función, son los posibles resultados o respuestas de dicha función aleatorizada los que adoptarían una determinada distribución de probabilidad (triangular para el caso del modelo desarrollado en esta tesis). Los parámetros estadísticos particulares de cada distribución (mínimo, máximo y moda en este caso) se calcularán a partir de los valores de los datos de entrada de la función mediante dependencias deterministas, siendo una variable aleatoria auxiliar (con valores extraídos previamente para cada simulación) la encargada de introducir la aleatorización de los resultados o respuestas de la función. Cada uno de estos resultados o respuestas se obtendrá mediante transformación de los respectivos valores de la variable aleatoria auxiliar (con su propia distribución inicial o de partida) a la distribución particular final, caracterizada por los parámetros previamente calculados. En el caso particular del modelo a desarrollar, para esta tarea será de gran utilidad la obtención de funciones de transformación de valores desde una distribución uniforme a una distribución triangular y entre dos distribuciones triangulares de diferentes parámetros.

Además, durante todo el proceso de aleatorización se ha de tener presente la posible existencia en la realidad de correlaciones estadísticas, en mayor o menor grado, entre algunas de las variables iniciales del modelo de cálculo en las que se incorpora la aleatoriedad (por ejemplo, distintas variables de entrada que estén ligadas a la renta o nivel socioeconómico de los viajeros, la evolución del precio de distintos tipos de combustibles derivados del petróleo como gasolina y diésel, etc.). En estos casos se deberá introducir dicho grado de correlación en la modelización estadística del problema, presuponiendo para ello una estimación probable del coeficiente de correlación entre dichas variables. De este modo se asegura la consistencia interna de cada una de las simulaciones aleatorias que se realizarán posteriormente, evitando la generación de situaciones incoherentes.

A continuación, ha de tenerse en cuenta que la base del método consistirá en ejecutar repetidamente un elevado número de simulaciones aleatorias del problema de interés, es decir, efectuar múltiples realizaciones del modelo de cálculo, en cada una de las cuales se empleará como punto de partida una combinación diferente de valores de las variables aleatorias iniciales. Al respecto, la notación desarrollada para el modelo de esta tesis utilizará en general el subíndice  $r$  para hacer referencia a los valores de cada variable que correspondan a una determinada simulación aleatoria. Las respectivas simulacio-

<sup>62</sup> Un posible ejemplo ilustrativo de la aleatorización relacionada con la incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización sería aquel que afecta al cálculo o estimación del tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público en función del intervalo de operación de este, especialmente en aquellos casos en los que dicho intervalo es relativamente elevado.

nes aleatorias se identificarán mediante números naturales asignados consecutivamente, con inicio en 1 ( $r=1$ ) y con final en el número total de simulaciones aleatorias que se prevea realizar.

Pero para ejecutar las sucesivas simulaciones aleatorias del modelo de cálculo es necesario que en cada una de esas simulaciones se extraigan previamente valores aleatorios de cada una de las variables iniciales que actúan como fuentes primigenias de aleatoriedad, debiendo ser obtenidos dichos valores aleatorios con probabilidades de extracción acordes a las distribuciones de probabilidad anteriormente definidas para cada variable.

El paso definitivo consistirá en la repetida ejecución del modelo de cálculo con cada una de las combinaciones diferentes de valores de las variables aleatorias iniciales, dando lugar por tanto a las simulaciones aleatorias propiamente dichas. De este modo, para cada una de las variables de interés obtenidas como resultado del modelo se habrá generado finalmente una muestra estadística de posibles valores de la variable (con tantos valores como simulaciones aleatorias se hayan realizado).

Por último, a partir de esta muestra estadística de valores sería posible estimar una distribución de probabilidad de la variable en cuestión (ya sea en forma de histograma de frecuencias relativas, como distribución continua inferida, etc.), así como calcular parámetros estadísticos sobre la muestra de dicha variable, como su media, desviación estándar, distintos percentiles, etc. De esta forma, quedarían caracterizados estadísticamente los resultados del modelo.

### **3.7. PRINCIPIOS METODOLÓGICOS Y SIMPLIFICACIONES BÁSICAS**

#### **3.7.1. Bases del modelo de demanda de viajes y de reparto modal**

Como base para el desarrollo de la parte del modelo dedicada a la previsión de la demanda de viajes y del reparto modal de dichos viajes entre las diferentes opciones de desplazamiento, se recurrirá al ámbito de los modelos agregados de transporte, al considerarse que esta clase de modelos permiten abordar de una forma suficientemente adecuada el tipo de objetivos marcados para esta tesis. Al mismo tiempo, suponen una forma más sencilla de tratar el problema analizado, evitando la mayor complejidad de los modelos de elección discreta desagregados.

Así pues, se adoptará en particular el marco teórico de referencia correspondiente a un modelo gravitacional sintético de distribución y de reparto modal, cuyas bases y formulación general se detallarán en el epígrafe 4.2.1. Sobre este marco teórico de referencia se van a introducir asimismo ciertas simplificaciones y particularizaciones que permitirán sentar las bases de un modelo de demanda de viajes y de reparto modal menos exigente en cuanto a requerimiento de datos necesarios, y por consiguiente más fácilmente aplicable y mejor adaptado a las limitaciones prácticas derivadas de los objetivos de la tesis. Estas simplificaciones y particularizaciones, que se pormenorizan en el epígrafe 4.2.2, se relacionan fundamentalmente con la forma en la que se trata en el modelo la distinción entre el grupo de viajeros que podrían escoger entre cualquiera de las opciones modales incluidas en la modelización y aquellos otros grupos de individuos que deban ser considerados como usuarios cautivos de un determinado modo de transporte.

Por otra parte, la variable fundamental en base a la que se configuran este tipo de modelos va a ser el coste generalizado de viaje, el cual —tal como se adelantó en capítulos precedentes— constituye una variable cuantitativa en la que se combinan aditivamente, de acuerdo a su importancia relativa, los principales atributos asociados a la desutilidad de efectuar un viaje en una determinada opción modal (es decir, el conjunto de desincentivos a los que se enfrenta un individuo para la realización de dicho viaje). En el coste generalizado se convierten los distintos valores de esta serie de atributos (tales como los tiempos empleados en cada etapa, el dinero gastado, otras posibles incomodidades, etc.) a una magnitud común, que suele expresarse en unidades monetarias equivalentes, para poder agregar así sus respectivos valores en una única cuantía.

Otro aspecto que tendrá gran relevancia en el desarrollo del modelo de demanda de viajes y reparto modal particularmente utilizado en esta tesis es la elaboración de formulaciones incrementales basadas en modelos en principio más complejos, dando lugar a un tipo de modelos que reciben la denominación de modelos de pivoteo o *'pivot-point'* (Ortúzar y Willumsen, 2011: pp. 433-435). La idea central que motiva el desarrollo de formulaciones incrementales y de los correspondientes modelos de pivoteo es la posibilidad que ofrecen de estimar la demanda futura de viajes a partir del conocimiento de los niveles actuales de dicha demanda (por ejemplo el volumen de viajes y el reparto modal entre las distintas opciones de transporte) y de tan solo los cambios o variaciones en los atributos o variables de nivel de servicio de dichas alternativas previstos entre la situación actual y la situación futura (cuantitativamente traducidos a cambios de coste generalizado). Esta posibilidad permitirá prescindir del conocimiento de los valores específicos de todos aquellos atributos o variables de nivel de servicio para las que se pueda asumir que no van a cambiar entre una y otra situación.

### 3.7.2. Condiciones previas en el diseño y operación de los distintos modos de transporte público

Para perfilar el marco en el que se desarrollan aquellas partes de la modelización referidas a la operación de los distintos modos de transporte público que son objeto de análisis, conviene delimitar un pequeño conjunto de características de diseño que se asumen como condiciones previas en el desarrollo de estas partes del modelo. Varias de estas condiciones de diseño hacen referencia a las características comunes esenciales que forman parte del núcleo infraestructural básico de los modos de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, las cuales se expusieron ya anteriormente en el epígrafe 2.2.2 con mayor profundidad. La condición adicional hace mención, para cualquiera de los tres modos o sistemas de transporte público, a la posición o localización de los puntos de parada a lo largo de la línea o líneas analizadas.

Así pues, estas condiciones previas en el diseño y entorno operativo de los modos de transporte público a modelizar pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Para el caso de los nuevos sistemas de transporte público (metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT), se asume que se trata de modos que discurren totalmente —o en su práctica totalidad— en superficie, por lo que estarían expuestos, a lo largo de su recorrido, a la presencia habitual de intersecciones a nivel con otros modos de transporte que también circulen en superficie (principalmente el tráfico rodado de vehículos) y con otros posibles usuarios de las vías públicas (peatones, etc.).
- Para la modelización referida a los sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT se impone que estos dispongan de circulación en plataforma reservada (de categoría B<sup>63</sup> o entorno operativo de tipo exclusivo<sup>64</sup>) a lo largo de todo su recorrido. Se presupone adicionalmente como condición del modelo que la plataforma reservada esté dedicada exclusivamente a la circulación del correspondiente modo de transporte público (con la hipotética excepción puntual de vehículos de emergencias). Además, se va a considerar que la plataforma reservada es de carácter permanente, de forma que no estaría autorizado el uso de la misma a otros vehículos o usuarios durante ninguno de los períodos horarios.
- Para estos mismos modos de transporte público (metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT) se asume en el modelo la dotación de sistemas de preferencia o priorización semafórica en las intersecciones a nivel con el tráfico general, que actúen en favor de la continuidad de paso del transporte público.
- Finalmente, se aplica como condición previa adicional para el modelo a desarrollar que se mantenga la misma posición o localización de los puntos de parada a lo largo de la línea o líneas analizadas para cualquiera de los tres sistemas de transporte público en estudio (autobús convencional en tráfico

<sup>63</sup> Vuchic (2005: p. 5).

<sup>64</sup> *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* (TCRP, 2013: pp. 2.31-2.35).

mixto, metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT). Aparte de su influencia directa en la operación de los modos de transporte público en cada línea, esta hipótesis permite garantizar, de cara a la modelización comparativa o incremental de los costes generalizados de viaje y de la potencial demanda de uso del transporte público, que los tres sistemas sean analizados bajo exactamente las mismas condiciones en cuanto a cobertura zonal de la línea, población servida, centros de generación y atracción de viajes potencialmente atendidos, tiempos de acceso desde el origen de cada viaje hasta la parada de subida, tiempos de dispersión desde la parada de bajada hasta el destino definitivo, etc.<sup>65</sup>

### 3.7.3. Composición del coste generalizado de cada opción modal

Para cuantificar en el modelo el coste generalizado de viaje asociado a cada una de las opciones modales —o, más concretamente, las variaciones del mismo a lo largo del tiempo entre distintos años y las diferencias de dicho coste entre escenarios— se tomarán en consideración una serie de atributos o variables relacionadas con el nivel de servicio que dependerán del tipo de alternativa modal en cuestión.

Así, en el caso de los modos de transporte público se tendrán en cuenta, para la composición del coste generalizado, las variables concernientes al nivel de servicio y a los atributos modales que se indican a continuación, debiendo tenerse presente en todo caso que —debido a las propiedades que las formulaciones incrementales confieren al modelo— solo aquellas variables que varían en el tiempo (a lo largo de los años) o que muestran diferencias entre escenarios necesitan ser incorporadas explícitamente a los cálculos del modelo. Por tanto, la estructura del coste generalizado de viaje en los modos de transporte público queda configurada de acuerdo a las siguientes componentes:

- La tarifa abonada o desembolsada, de media, por cada uso de un determinado tipo de transporte público (autobús convencional, metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT).
- El coste atribuido al tiempo medio transcurrido a bordo del vehículo de transporte público por cada viaje, valorado inicialmente en unas hipotéticas condiciones de ausencia de congestión o aglomeración de pasajeros (*crowding*) en el interior de los vehículos (a estas condiciones se las denominará condiciones base o estándar).
- El potencial incremento del coste del tiempo de viaje a bordo del transporte público generado por los efectos de incomodidad derivados del nivel de congestión o aglomeración de pasajeros que efectivamente tenga lugar en los vehículos del modo de transporte público.
- El coste del tiempo medio de espera en parada o estación por cada usuario, desde la llegada del viajero a la parada hasta la entrada al vehículo de transporte público.
- El coste adicional medio (por cada viaje) relacionado con las posibles deficiencias en la fiabilidad de horarios del modo de transporte público (potenciales retrasos, incertidumbre generada sobre el tiempo de viaje, etc.).
- Para los nuevos modos de capacidad intermedia de posible implantación se incorpora la potencial reducción en el coste generalizado de viaje correspondiente a la valoración del *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto al modo de referencia (es decir, con respecto al autobús convencional en tráfico mixto). Este *bonus* modal tiene en cuenta la valoración del usuario sobre otros atributos o características específicas de cada modo de transporte público no recogidas explícitamente en la formulación del modelo, por ser generalmente más sutiles y de difícil cuantificación numérica objetiva (*'soft factors'*). Entre este tipo de atributos o características se pueden incluir aspectos como el confort y estabilidad de marcha, la seguridad viaria durante la circulación, la comodidad de los asientos, la disponibilidad de servicios complementarios a bordo de los vehículos (conexión inalámbrica a internet, enchufes, etc.), factores ambientales en el interior del vehículo

<sup>65</sup> Es frecuente que esta condición no se cumpla realmente cuando se implanta un nuevo sistema de metro ligero o de BHLS/BRT, pero se ha considerado apropiado incorporarla en el modelo por las razones anteriormente indicadas.



(menor ruido, luminosidad, limpieza, climatización, etc.), la información al viajero y sencillez de uso del sistema de transporte, la facilidad y comodidad de subida y bajada del vehículo mediante acceso a nivel en las estaciones o paradas, etc. También se puede considerar incluso la valoración de aspectos de carácter psicológico, emocional o social (respeto del nuevo modo de transporte público al medio ambiente y al entorno sociourbano, apreciación de la 'imagen de marca' que el nuevo modo de transporte público proyecta hacia la sociedad, etc.).

- Adicionalmente, el coste generalizado de completar cada viaje incluiría, para cualquiera de los tres modos de transporte público contemplados, otros costes como los incurridos en las etapas de acceso de cada viajero a la línea objeto de estudio (origen del viaje – parada de subida) y en la etapa de dispersión hacia el destino (parada de bajada – destino final del viaje), ya sean llevadas a cabo estas etapas en modos no motorizados (o de 'micromovilidad'), en medios de transporte motorizado privado o mediante el uso de otras líneas de transporte público distintas de la analizada (en cuyo caso se podría incluir además una penalización por realización de transbordos). Sin embargo, de cara a la modelización puede asumirse que estos costes complementarios o adicionales resultan iguales entre sí para los tres escenarios, al considerarse independientes del tipo de modo de transporte público implantado en la línea objeto de estudio, gracias a la condición previa de idéntica posición de las paradas en cualquiera de los tres casos. Este hecho permitirá por tanto, debido al uso de formulaciones incrementales y modelos de pivoteo, prescindir de la valoración explícita de todos estos costes de acceso en origen y de dispersión en destino.

En cuanto a las opciones modales pertenecientes al ámbito del transporte motorizado privado (automóvil particular, y por otro lado, moto o ciclomotor), para la estructura de las variaciones o cambios en el coste generalizado de viaje se van a incluir como componentes individuales los cambios o variaciones parciales experimentados en los siguientes elementos del coste:

- El coste medio generado al viajero a causa del tiempo de viaje transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado, incluyendo los posibles incrementos del coste por unidad de tiempo debidos a la realización del desplazamiento en condiciones de elevada congestión viaria, con la percepción de molestias adicionales que ello supone a conductor y acompañantes.
- El coste medio ocasionado al viajero a consecuencia de la irregularidad, variabilidad o incertidumbre (percibida como falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado.
- El coste privado medio producido para el viajero por el consumo energético del vehículo motorizado particular (en forma de combustibles y/o energía eléctrica en el caso de los vehículos híbridos y eléctricos)<sup>66</sup>.
- Otros posibles costes modales de viaje relacionados con la utilización de los modos de transporte motorizado privado que, desde el punto de vista de las capacidades analíticas del modelo, se considerarán aplicados de forma exógena (es decir, como 'inputs' o datos de entrada a proporcionar por el analista). Entre los potenciales orígenes de esta clase de costes podrían subrayarse los precios o costes de aparcamiento, los posibles peajes urbanos o metropolitanos, los efectos de otras restricciones adicionales sobre el uso del automóvil, etc. Se trataría en gran parte de costes relacionados con las futuras políticas de transporte urbano y movilidad.

Por último, por lo que respecta a los modos no motorizados y de 'micromovilidad' (viaje a pie, y bicicleta o vehículo de movilidad personal), las variaciones previstas en el coste generalizado de las respectivas alternativas serán tratadas en el modelo como resultado de acciones exógenas (ajenas a los cálculos

<sup>66</sup> Los cambios o variaciones en otros costes privados vinculados a la posesión y utilización del vehículo motorizado particular (amortización, seguros, desgastes y mantenimiento, etc.) no se incluyen en la formulación del modelo en consideración de que en muchos casos se trata de costes prácticamente fijos, y de que, en aquellos casos en los que exista una pequeña parte variable o marginal, las posibles diferencias generadas entre escenarios serían prácticamente imperceptibles para el usuario medio.

internos del propio modelo), por lo que se tomarán también como ‘inputs’ o datos de entrada con valores previstos por el analista. Como ejemplo del posible origen de estas variaciones de coste generalizado de las opciones modales no motorizadas, puede apuntarse, para el caso de la bicicleta o pequeño vehículo urbano de movilidad personal, que la implantación en un año determinado del horizonte o período de evaluación de carriles-bici en el entorno del corredor, eje o itinerario analizado daría previsiblemente lugar a una reducción relativa del coste generalizado de la opción de bicicleta o vehículo de movilidad personal. Asimismo, la creación de recorridos de preferencia peatonal podría ocasionar una disminución relativa del coste generalizado de los desplazamientos a pie. Similarmente, la posible puesta en práctica de medidas de calmado del tráfico sería una acción que previsiblemente favorecería la reducción del coste generalizado percibido por los usuarios de estas dos alternativas modales. En conclusión, se tratará nuevamente de variaciones ligadas en gran medida a las políticas de movilidad que desarrollen en el futuro las administraciones públicas o autoridades competentes. Además, la hipotética cuantificación de estos efectos en términos de coste generalizado resultaría en general altamente compleja, quedando claramente fuera del objeto de estudio de esta tesis.

Por otra parte, cabe indicar que los valores de las variaciones de coste generalizado tomadas por el modelo como exógenas (ya sean en los modos motorizados privados o en los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’) se van a considerar comunes a los tres escenarios, al objeto de no desvirtuar las condiciones de equilibrio entre escenarios en la estricta comparación entre sistemas de transporte público.

#### **3.7.4. Disponibilidad de información de viajes en transporte público solo a nivel de línea y tratamiento homogeneizado del corredor, eje o itinerario**

De cara al desarrollo efectivo del modelo, se asumirá —como medida simplificadora— que los datos de viajes en transporte público para el año base generalmente se hallarán disponibles solo a nivel agregado de cada línea. Es decir, en relación con la demanda de transporte público se adoptará como variable básica de entrada el volumen de pasajeros (por hora) registrado en cada una de las líneas de transporte público objeto de estudio (siendo estas líneas de autobús convencional en tráfico mixto, al estar referido el dato a las condiciones existentes en el año base). Dicho volumen de pasajeros es entendido como el número total de viajeros que acceden a los vehículos de transporte público por cada hora de servicio a lo largo de toda una línea (en cualquiera de sus paradas), durante un determinado tipo de período horario y en un sentido de viaje en particular. Por tanto, no se considerará en el modelo información relativa a los volúmenes de viajes entre cada posible par de paradas o estaciones (una de origen y otra de destino en la etapa de viaje en transporte público).

Esta hipotética limitación de información, aunque supone una simplificación desde el punto de vista de la zonificación del territorio y condiciona en cierto modo la riqueza teórica del modelo, resulta compatible sin embargo con la situación más habitual en el caso de las actuales redes de autobús convencional. En este tipo de sistemas se dispone generalmente de registros relativos a las paradas de subida de los pasajeros, pero actualmente es muy poco frecuente que se disponga también de la identificación de los puntos de bajada de los usuarios, incluso a nivel de número agregado de bajadas por parada. Esta limitación impide por tanto reconstruir los volúmenes de viajes en la línea de transporte público con origen y destino en cada posible par de paradas o estaciones, salvo que se dispusiese de encuestas *ad hoc* o de otros datos específicos, o que se recurriese a procedimientos complejos de estimación en función de los datos de subidas en viajes posteriores del mismo pasajero. Además, la información que en algunos casos pudiese estar disponible a partir de estudios o encuestas generales de movilidad realizadas a escala de toda un área urbana o metropolitana podría presentar habitualmente tamaños de zona excesivamente grandes como para trasladar los posibles datos a nivel de paradas específicas.

Por consiguiente, se adopta para el modelo la simplificación de tomar el volumen de pasajeros registrado en una determinada línea (sin desagregación de este dato por paradas de origen y destino de

los viajes) como variable o indicador fundamental de la demanda de transporte público en el correspondiente corredor, eje o itinerario. Este tipo de simplificación, además de facilitar en gran medida el desarrollo y aplicación del modelo, se ajusta convenientemente al nivel de información que en general estaría disponible con facilidad en cualquier caso real. No obstante, este tipo de dato deberá ser complementado con otros parámetros específicos del modelo (como el coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda y el coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea), los cuales permitirán obtener variables de dimensionamiento del servicio (como el volumen de diseño en la sección de máxima demanda) y características relevantes de los viajes en transporte público (como la distancia media recorrida a bordo por cada usuario).

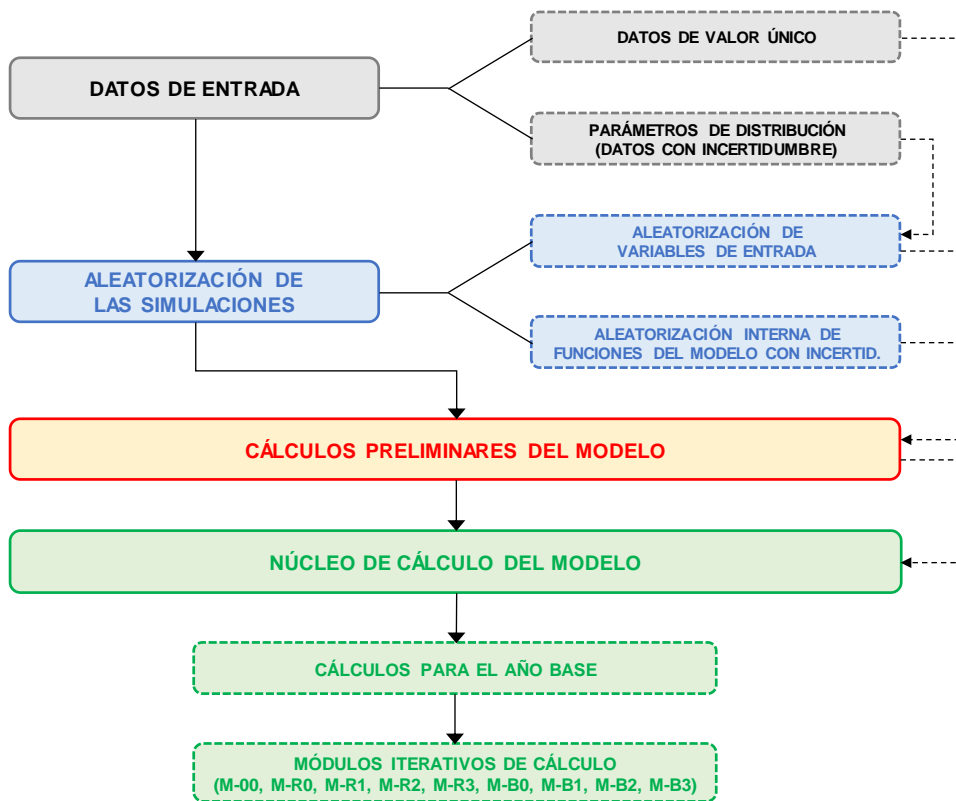
Esta forma simplificada de analizar la demanda en cada línea de transporte público condiciona también el tratamiento que en el modelo reciben los volúmenes de viajes efectuados en el resto de opciones modales a lo largo del correspondiente corredor, eje o itinerario, ya que se transfiere el mismo tipo de simplificación. Así, para cualquiera de las demás alternativas modales, se considera también como variable cuantificadora de su demanda el volumen o número de desplazamientos (por hora) desarrollados sobre el respectivo corredor, eje o itinerario (ya utilicen este parcial o totalmente), sin distinción específica entre puntos o zonas de origen (o de entrada al corredor) ni de destino (o de salida del corredor). En el caso de los viajes realizados en vehículo motorizado privado, el modelo requerirá complementariamente la determinación de la longitud media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario como una de las características relevantes de dichos viajes. A su vez, este tipo de cuantificación simplificada de la demanda resulta acorde con que las características del corredor, eje o itinerario (como su capacidad viaria para el tráfico general) sean tratadas también de forma homogeneizada.

### **3.8. FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL MODELO**

#### **3.8.1. Esquema básico de funcionamiento del modelo**

A continuación se describe a grandes rasgos el proceso de funcionamiento general del modelo desarrollado en la presente tesis, en cuanto a sus sectores o partes principales y el orden de ejecución de las mismas. Para facilitar esta descripción, se incorpora asimismo la Figura 3.1, en la que se representa gráficamente el esquema básico de funcionamiento de dicho modelo.

En primer lugar debe procederse a definir el conjunto de datos utilizados por el modelo como variables de entrada (Capítulo 5). Este conjunto de variables cubre una amplia gama de áreas, tales como datos y parámetros concernientes a las líneas de transporte público, a los vehículos o unidades de transporte, a la operación y explotación del servicio, al rendimiento operativo de los modos de transporte público, a la utilización o demanda actual de las líneas, a los horizontes temporales y la división en fases o etapas, a la caracterización de la movilidad y del reparto modal, a las condiciones de circulación de los vehículos motorizados en el tráfico mixto, a las características de los viajes realizados en vehículo motorizado privado, a los costes unitarios relativos al tiempo de viaje, a los costes unitarios relacionados con el consumo de energía, a los posibles cambios en otros costes modales, a los datos para la obtención de parámetros del modelo de demanda, y a parámetros relacionados con la ejecución numérica del modelo. Pero al margen de su inclusión en una u otra área, es importante tener en cuenta que los tipos de datos incorporados al modelo se dividirán, a efectos prácticos, entre aquellos para los que se establece la definición de un único valor (al entenderse que comúnmente pueden ser conocidos con un nivel adecuado de precisión y certidumbre), y aquellos otros para los que se considera necesario especificar los parámetros estadísticos de su distribución de probabilidad (mínimo, máximo y moda en el caso de las distribuciones triangulares), al entenderse que en general pueden estar sometidos en la práctica a un significativo nivel de incertidumbre y por tanto es más adecuado tratarlos desde un principio como una variable aleatoria.



**Figura 3.1.** Representación gráfica del esquema general de funcionamiento del modelo desarrollado en esta tesis.

Tras la especificación de todo el conjunto de datos o variables de entrada, se deberá dar inicio al proceso de aleatorización estadística de las simulaciones del modelo (Capítulo 6). Para ello resultará conveniente introducir en primer lugar (epígrafe 6.2) algunos conceptos relativos a la obtención de distribuciones triangulares simétricas en base a la suma de dos variables aleatorias independientes con distribución uniforme (incluyendo el análisis de posibles correlaciones cuando una de estas variables aleatorias forma parte de varias sumas), así como definir unas funciones auxiliares de transformación de valores entre distribuciones aleatorias distintas (concretamente desde una distribución uniforme a una distribución triangular, y entre dos distribuciones triangulares de diferentes valores de los parámetros).

En el proceso propiamente dicho de aleatorización estadística de las simulaciones del modelo debe diferenciarse, por una parte, la aleatorización directa de los datos o variables de entrada sujetos a incertidumbre (en base a los parámetros de sus respectivas distribuciones de probabilidad, previamente definidos) y, por otra parte, la aleatorización interna o inicial de aquellas funciones o variables de cálculo del modelo que se consideren sometidas a incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización. En este segundo caso, el proceso de aleatorización se materializa a través de la generación preliminar de variables aleatorias auxiliares, de cara a su posterior empleo por parte de las funciones de cálculo del modelo con incertidumbre metodológica (para lo cual serán de utilidad las funciones de transformación de valores entre distribuciones aleatorias distintas). Además, durante todo este proceso de aleatorización han de preverse e introducirse las probables correlaciones entre variables aleatorias.

A continuación, una vez disponibles todos los valores de las variables de entrada del modelo (ya sean de valor único o con valores aleatorizados para las diferentes simulaciones), se dará paso a la fase de cálculos preliminares (Capítulo 7). En esta etapa se realizan una serie de cálculos preparatorios que pueden ser extraídos fuera del núcleo principal del modelo, y que sin embargo proporcionan datos intermedios (elaborados a partir de variables de entrada) que necesitan ser utilizados por dicho núcleo principal. Se trata en general de resultados relativamente simples, que —al no depender en el modelo de la evolución a lo largo del horizonte de evaluación de cuestiones tales como la demanda de viajes, el

reparto modal, los atributos de la oferta de transporte, etc.— pueden ser obtenidos de forma directa, sin necesidad de recurrir a procedimientos iterativos como sucede en los módulos de cálculo que forman parte del núcleo principal del modelo.

Finalmente se procederá con el núcleo principal o núcleo de cálculo del modelo (Capítulo 8). Es en este bloque donde realmente se modelizan las interacciones cíclicas entre aspectos directamente relacionados con la cuantificación de la demanda (volumen total de viajes, volumen de viajes en cada modo, etc.), con la caracterización de la oferta de transporte (operación del servicio de transporte público, atributos de las alternativas modales, etc.), con la valoración del conjunto de opciones o alternativas (coste generalizado de viaje en cada modo, coste compuesto de viaje del conjunto de opciones disponibles, etc.) y con las elecciones agregadas de los viajeros (reparto modal resultante, influencia del coste compuesto en la distribución de viajes, etc.). Desde el punto de vista del funcionamiento del modelo, debe tenerse en cuenta que, debido al uso de formulaciones incrementales con avances en el tiempo (entre años), es necesario completar en primer lugar el cálculo de todas las variables relativas al año base, puesto que estas constituyen el punto inicial sobre el que pivota el desarrollo de las previsiones referidas a cualquier año posterior. Además, los cálculos relativos al año base presentan la característica —a diferencia de los módulos iterativos de cálculo que se habrán de aplicar sobre cualquier año posterior— de poder ser efectuados de forma directa, al conocerse de antemano (en base a los datos de entrada del modelo) los volúmenes de viajes en cada modo de transporte, que pueden tomarse como punto de partida para la obtención de valores del resto de variables. En cambio, la resolución del conjunto de ecuaciones referidas a cualquiera de los años posteriores (es decir, las previsiones del modelo sobre valores futuros) precisará de la aplicación de procedimientos iterativos, ya que variables fundamentales como los volúmenes de viajes en cada opción modal (o, alternativamente, las variaciones de coste generalizado de viaje para cada una de estas opciones) forman parte evidentemente de las futuras incógnitas del sistema. Por consiguiente, será necesario diseñar y aplicar, tal como se describe a continuación en el siguiente epígrafe, una serie de módulos iterativos de cálculo que forman el núcleo fundamental del modelo.

### **3.8.2. División del núcleo central del modelo en módulos de cálculo**

Tal como se ha ido anticipando en el epígrafe anterior, la resolución por parte del modelo de los cálculos o sistemas de ecuaciones correspondientes a cada uno de los sucesivos años pertenecientes al horizonte o período de evaluación va a requerir la utilización de procedimientos de tipo iterativo mediante aproximaciones sucesivas, ya que en dicha serie de ecuaciones interactúan mutuamente los procesos de cuantificación de la demanda, caracterización dinámica de la oferta, valoración del conjunto de opciones o alternativas modales y estimación de las elecciones agregadas de los viajeros, sin que se conozcan de antemano valores ciertos de las incógnitas que puedan ser tomados como punto de partida para la resolución directa. En general, el conjunto de ecuaciones implicadas se ajusta en su mayor parte a patrones o estructuras comunes a todo el modelo. No obstante, dependiendo del escenario analizado y de la fase o etapa del horizonte o período de evaluación en la que se encuadre el año bajo cálculo, van a aparecer ciertas particularidades en dichas ecuaciones que hacen conveniente dividir o segmentar esta parte del modelo en varios módulos separados.

En la terminología propuesta específicamente para el modelo, estos módulos se van a designar abreviadamente mediante la combinación de 3 caracteres alfanuméricos (separados por un guión entre el primero y segundo de ellos). El primer carácter corresponderá siempre a la letra M, en referencia a la palabra ‘módulo’. El segundo de los caracteres coincidirá con la designación abreviada (O, R o B) utilizada para referirse al escenario en el cual sea de aplicación el módulo en cuestión. El tercer carácter será un número entre 0 y 3 que hace indicación del orden secuencial en el cual deben ejecutarse dichos módulos de cálculo dentro de cada escenario (con la excepción del escenario ‘O’, en el que existe un solo módulo, siendo de aplicación en este escenario únicamente el 0 como tercer carácter). El tercer carácter de la designación de cada módulo también puede ser relacionado, en el caso de los escenarios ‘R’ y ‘B’, con la fase del horizonte o período de evaluación en la que se incluyan los años que son objeto de cálculo

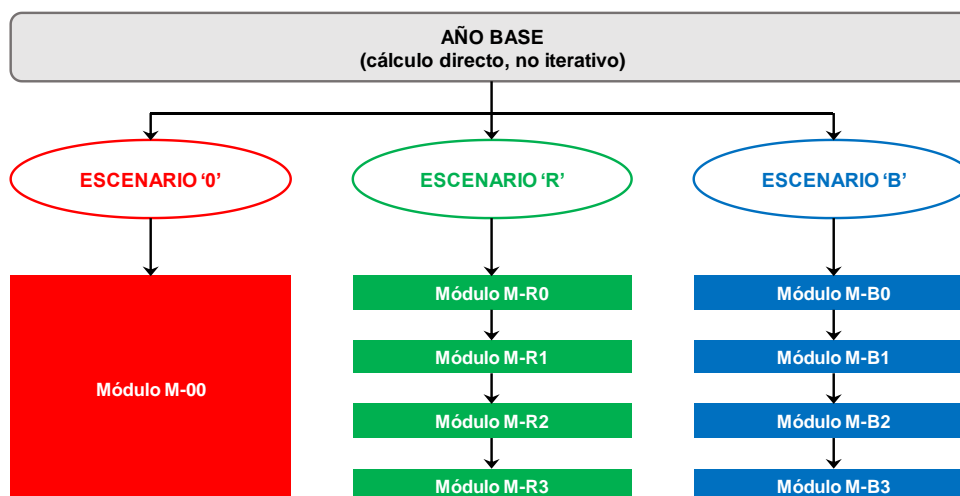
por parte del módulo. Así, a las fases de implantación de los nuevos modos de transporte público les corresponden en estos dos escenarios los módulos que llevan el número 0 como tercer carácter. Durante las fases de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público serán de aplicación los módulos cuyo tercer carácter es el número 2. Por su parte, en las fases de madurez de los escenarios 'R' y 'B' debe distinguirse de manera diferenciada el primer año de dicha fase con respecto al resto de años de la misma debido a las particularidades propias que el modelo asume para el cálculo de la demanda durante la etapa anterior (introducción y consolidación del nuevo servicio). Así pues, a los cálculos relativos al primer año de la fase de madurez de los escenarios 'R' y 'B' les corresponden los módulos que tienen el número 1 por tercer carácter, mientras que a los años restantes de dicha fase les son de aplicación los módulos de cálculo terminados en el número 3.

A modo de síntesis, la Tabla 3.3 indica la designación de los módulos de cálculo del modelo que se aplican a cada escenario y a cada una de las fases del horizonte o período de evaluación en que dichos escenarios se dividen. Nótese que el orden cronológico de las fases en los escenarios 'R' y 'B' no coincide totalmente con el orden en el que deben ser ejecutados los módulos de cálculo, ya que el tipo de formulación planteada para la modelización de la demanda durante la fase de introducción y consolidación de los nuevos servicios de transporte público (módulos M-R2 o M-B2) requiere conocer previamente los volúmenes de viajes, repartos modales y costes generalizados que se alcanzarían no solo en el último año de la fase de implantación (módulos M-R0 o M-B0) sino también en el primer año de la fase de madurez (módulos M-R1 o M-B1).

**Tabla 3.3.** Módulos de cálculo aplicables a cada escenario y a cada una de las fases del horizonte o período de evaluación en que estos se dividen.

Fases / años		Escenarios		
		Escenario '0'	Escenario 'R'	Escenario 'B'
Fase de implantación		No Aplic.	Módulo M-R0	Módulo M-B0
Fase de introducción y consolidación		No Aplic.	Módulo M-R2	Módulo M-B2
Fase de madurez	1 <sup>er</sup> año de la fase	Módulo M-00	Módulo M-R1	Módulo M-B1
	Restantes años		Módulo M-R3	Módulo M-B3

En referencia al orden de ejecución de esta serie de módulos de cálculo, la Figura 3.2 representa gráficamente las posibles secuencias de aplicación de dichos módulos.



**Figura 3.2.** Orden de ejecución de los módulos de cálculo en cada escenario.

En relación con la Figura 3.2, obsérvese que, partiendo siempre del conjunto de operaciones pertenecientes al año base, a continuación sería factible afrontar indistintamente el cálculo de cualquiera de los tres escenarios (en cualquier orden posible), al ser estos independientes entre sí. Sin embargo, dentro de cada escenario es imprescindible, en la aplicación efectiva del modelo, seguir el orden de ejecución de módulos indicado por la Figura 3.2. Así, en el escenario '0' el único módulo existente es el M-00, mientras que en el caso del escenario 'R' y del escenario 'B' han de ejecutarse por orden los módulos cuyo último carácter es sucesivamente 0, 1, 2 y 3.

### 3.8.3. Diferenciación entre bucles iterativos (tipos A y B)

Tal como se señaló anteriormente, el funcionamiento de cada uno de los módulos de cálculo se basará en la aplicación de procedimientos iterativos conducentes a la obtención de una solución de equilibrio que satisfaga simultáneamente las ecuaciones del modelo relacionadas con cada uno de los grupos de procesos implicados (operación del transporte público y caracterización de la oferta en los diferentes modos, cuantificación de la demanda, reparto modal, etc.). Estos procedimientos de resolución se desarrollan a través de aproximaciones sucesivas obtenidas en base a bucles iterativos. En este sentido, cabe indicar que en cada módulo de cálculo se pueden diferenciar al respecto dos tipos de bucles iterativos que se distinguen tan solo en la forma en la que es tratado el intervalo de operación de los modos de transporte público. Estas dos clases de bucles iterativos van a ser denominadas en el desarrollo de la formulación particular del modelo como bucles de tipo A y de tipo B, debiendo tenerse en cuenta, a efectos prácticos, que en cada caso se procederá en primer lugar a obtener la solución del bucle iterativo de tipo A y, sirviéndose de ella, se deberá pasar a continuación a ejecutar el correspondiente bucle iterativo de tipo B.

La diferencia entre estos dos tipos radica en que en el caso de los bucles iterativos de tipo A se permitirá, a lo largo de todos los cálculos, que el intervalo de operación entre vehículos de transporte público pueda tomar cualquier número real comprendido entre unos determinados límites mínimo y máximo previamente establecidos como datos. Tras obtener la solución del problema bajo estas condiciones, se tomará el intervalo resultante y se le aplicará un redondeo inferior hacia una serie de valores preestablecidos o estandarizados que coinciden con los intervalos comúnmente utilizados en la práctica para la operación de los servicios de transporte público. A continuación, los bucles iterativos de tipo B tomarán este intervalo redondeado y lo adoptarán como un valor fijo (sobre el que ya no se itera), procediéndose a recalcular con dicho valor —que supondría el previsiblemente utilizado en la operación real del servicio— todas las demás ecuaciones del bucle iterativo (con la excepción de aquellas dedicadas exclusivamente al cálculo del intervalo), hasta que se alcance de nuevo una solución válida. Esta última solución es por tanto la definitivamente adoptada como previsión más realista del modelo.

El motivo que explica esta distinción entre dos tipos de bucles iterativos para la resolución de un mismo problema está relacionado en la práctica con el aseguramiento de la convergencia de las iteraciones hacia una solución válida. El intervalo redondeado constituye una variable que solo puede tomar ciertos valores discretos (es decir, se producen 'saltos' entre valores sucesivos posibles), por lo que su utilización directa como variable sobre la que iterar es susceptible, en algunos casos, de dar lugar a problemas de estabilidad en la búsqueda de una solución válida que satisfaga simultáneamente el conjunto de ecuaciones implicadas. Para evitar este potencial problema se utiliza en primer lugar, durante los bucles iterativos de tipo A, una variable intervalo en forma de variable continua, hasta alcanzar con ella una solución válida para dicho sistema de ecuaciones. Pero el resultado obtenido de esta forma para la variable intervalo no coincidiría en general con ninguno de los intervalos habitualmente empleados en la práctica para la operación de los servicios de transporte público, por lo que, para una mejor representación de las condiciones reales de operación, debe ser sometido al correspondiente proceso de redondeo hacia un valor estandarizado o preestablecido, siendo este nuevo intervalo (redondeado) el que se tome como parte de la solución definitiva<sup>67</sup>. Sin embargo, tras este cambio en el

<sup>67</sup> En caso de que se tuviese constancia de que en un determinado sistema en estudio no se pretendiese redondear los intervalos de operación, sería viable reformular el modelo de forma que se ejecutasen únicamente los bucles iterativos de

valor del intervalo (que en algunos casos puede llegar a ser relativamente significativo), el resto de valores obtenidos en el bucle iterativo de tipo A para todas las demás variables incógnita del problema ya no seguirían constituyendo una solución válida para el sistema de ecuaciones inicialmente aplicado, puesto que fueron calculadas para un valor diferente del intervalo (aquel sin redondear). Así pues, resulta necesario recurrir a una pequeña reformulación del sistema de ecuaciones (bucle iterativo de tipo B) en la que ya se considere al intervalo redondeado como valor fijo (omitiéndose por tanto las ecuaciones en las que teóricamente se recalcularía el intervalo, que ha dejado de actuar como incógnita), mientras que se recalculan en cambio los valores del resto de variables hasta alcanzar iterativamente una nueva solución (que habitualmente no debería diferir mucho de la inicial).

---

tipo A. Asimismo, si se conociese de antemano que los valores de intervalo redondeado propuestos por un determinado operador fuesen distintos de los adoptados en el modelo desarrollado, también sería factible reajustar este dato adaptándolo a las preferencias o estándares del operador en cuestión.



## 4. Bases adoptadas para la modelización de la demanda de transporte

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, que complementa en cierto sentido al Capítulo 3, se presentan y desarrollan las bases teóricas y principios fundamentales adoptados en esta tesis para la modelización y previsión de la futura demanda de transporte, incluyendo las simplificaciones particulares necesarias.

Así, en primer lugar se describe el tipo general de modelo agregado sintético de distribución y de reparto modal tomado en la presente tesis como marco teórico de referencia para la modelización de la demanda de viajes y del reparto de los mismos entre las distintas opciones modales de transporte, constituyendo por tanto el punto básico de partida para posteriores desarrollos y simplificaciones. En este sentido, se introducirán a continuación las simplificaciones y particularizaciones que permiten llegar a un modelo de demanda de viajes y de reparto modal menos exigente en cuanto al requerimiento de datos necesarios, y por tanto de más fácil aplicación y mejor adaptado a las limitaciones prácticas derivadas de los objetivos de la tesis. Estas simplificaciones se relacionan principalmente con la forma en la que se tratan en el modelo los desplazamientos efectuados por viajeros que deban ser considerados como usuarios cautivos de algún modo de transporte determinado.

A continuación pasa a ser desarrollada la formulación incremental del modelo de demanda previamente presentado, tanto para la parte del reparto modal como para el cálculo de los volúmenes de viajes totales y por modos (en ambos casos incluyendo la influencia de la existencia de viajeros cautivos de alguno de los modos de transporte). La idea que guía este tipo de formulaciones —que constituyen la base de los modelos de pivoteo o de *'pivot-point'*— es la posibilidad que ofrecen de estimar la demanda futura de viajes a partir del conocimiento de los niveles actuales de dicha demanda (incluyendo el reparto modal entre las distintas opciones de transporte) y de los cambios o variaciones que se prevean en los atributos o variables de nivel de servicio de dichas alternativas entre la situación actual y la situación futura.

El capítulo continúa con el desarrollo de las formulaciones para la obtención de valores estimativos de los parámetros del modelo de demanda ( $\lambda$  para la sensibilidad del reparto modal al coste generalizado de las alternativas y  $\theta$  de 'impedancia' o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes, según la notación particular del modelo). De acuerdo a la estructura general de datos planteada para dicho modelo, los valores de estos parámetros deben obtenerse a partir de ciertos datos que se conozcan sobre dos estados o situaciones distintas, entre las cuales hayan mediado cambios en los costes generalizados de las opciones modales y posibles variaciones en las fracciones o proporciones del conjunto de viajes que correspondan a desplazamientos efectuados por usuarios cautivos de cada modo. Adicionalmente, se procederá a particularizar estas formulaciones de acuerdo a los datos específicos de los que se dispondrá en el modelo.

Por último, se incidirá sobre aspectos teóricos relacionados con la especificación del coste generalizado de viaje, planteando ciertos paralelismos con el concepto de utilidad representativa o sistemática, propio de los modelos de elección discreta. Estos paralelismos conducirán finalmente a la interpretación del significado dual desempeñado por el parámetro  $\lambda$  (parámetro de sensibilidad del reparto modal al

coste generalizado de las alternativas) en los modelos agregados de reparto modal, tales como el utilizado como base de partida para el modelo particular de esta tesis.

## 4.2. BASES DEL MODELO DE DEMANDA DE VIAJES Y DE REPARTO MODAL

### 4.2.1. Formulación general

Como punto de partida para el desarrollo del modelo particular de previsión de la demanda de viajes y del reparto de los mismos entre los diferentes modos de transporte se ha tomado, dentro del ámbito de los modelos agregados de transporte, el marco teórico de referencia correspondiente a un modelo sintético de distribución y de reparto modal (véase una descripción general en Ortúzar y Willumsen (2011: pp. 211-214)). La estructura funcional de esta clase de modelos gravitacionales se genera en base a la maximización de una función de entropía sujeta a ciertas restricciones lineales que representan las condiciones e informaciones de las que se dispone acerca del sistema de transportes (Ortúzar y Willumsen, 2011: pp. 184-191).

De acuerdo al marco teórico de este tipo de modelos, el volumen o número de viajes  $T_{ij}^{mh}$  desde una zona  $i$  hasta otra zona  $j$  realizados por individuos del segmento, categoría, grupo o clase  $h$  utilizando la opción modal de transporte  $m$  puede ser modelizado mediante una expresión del siguiente tipo:

$$T_{ij}^{mh} = \underbrace{A_i^h \cdot O_i^h \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\theta_h \cdot K_{ij}^h)}_{\substack{\text{Generación/Atracción \& Distribución} \\ T_{ij}^h = \sum_{m \in S_h} T_{ij}^{mh}}} \cdot \underbrace{\frac{\exp(-\lambda_h \cdot GC_{ij}^m)}{\sum_{n \in S_h} \exp(-\lambda_h \cdot GC_{ij}^n)}}_{\substack{\text{Reparto modal} \\ p_{ij}^{mh} / \sum_{m \in S_h} p_{ij}^{mh} = 1}} ; 0 \leq \theta_h \leq \lambda_h \quad (4.1)$$

donde:

- $O_i^h$  y  $D_j$  son, respectivamente, el número o volumen total de viajes con origen en la zona  $i$  efectuados por individuos del segmento o categoría  $h$  y el número o volumen total de viajes con destino en la zona  $j$ . Obviamente estos valores deben proceder del análisis realizado en la etapa de generación y atracción de viajes. No obstante, en la práctica debe tenerse en cuenta la necesidad de diferenciar entre la matriz de Generación-Atracción de viajes y la matriz de Orígenes-Destinos propiamente dicha, especialmente cuando se analizan separadamente períodos cortos de tiempo (Ortúzar y Willumsen, 2008: pp. 295-296). Por ejemplo, en un viaje diario por motivo de trabajo basado en el hogar (HB, *Home Based*) el punto de generación del viaje se considera siempre el hogar, pero este solo coincide con el origen del viaje en el caso del desplazamiento de ida al lugar de trabajo, mientras que en el viaje de vuelta el punto de atracción (lugar de trabajo) constituye el origen del viaje y el punto de generación (hogar) se convierte en el destino.
- $A_i^h$  y  $B_j$  representan factores de balanceo —interdependientes entre sí— en orígenes y en destinos, resultantes de imponer como condiciones necesarias del modelo:  $\sum_j T_{ij}^h = O_i^h$  y  $\sum_{ih} T_{ij}^h = D_j$ . Estos factores de balanceo procederían de la calibración de un modelo gravitacional doblemente acotado durante la etapa de distribución de viajes.
- $GC_{ij}^m$  es el coste generalizado de transporte desde la zona  $i$  hasta la zona  $j$  al efectuar el viaje mediante la opción modal  $m$ . El coste generalizado de transporte puede definirse como una medida en la que se combinan los principales atributos asociados a la desutilidad del viaje<sup>68</sup>, convirtiendo sus distintos

<sup>68</sup> En este sentido, la desutilidad del viaje, por contraposición al concepto de utilidad, puede entenderse como la combinación del conjunto de desincentivos a los que se enfrenta un individuo para la realización de un determinado viaje.

valores a una magnitud común (que suele expresarse en unidades monetarias o, en ocasiones, en unidades de tiempo). Estos atributos o características del viaje se ponderan mediante coeficientes que reflejan la importancia relativa de tales atributos, atendiendo a cómo dicha importancia sea percibida por los viajeros (Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 177). Se trata por tanto de una medida de coste de tipo eminentemente privado y con un carácter notablemente subjetivo. En el epígrafe 4.5 se analizará con más detalle el concepto de coste generalizado, así como sus posibles analogías o paralelismos con la utilidad representativa o sistemática.

- $K_{ij}^h$  constituye, en el contexto de la ecuación 4.1, un indicador de la dificultad de acceso a la zona  $j$  desde la zona  $i$  (cuantificada dicha dificultad en unidades análogas a las del coste generalizado) para el caso de los individuos pertenecientes al segmento o categoría  $h$ . A esta medida se la denomina habitualmente coste compuesto de viaje (*composite cost*), y depende no solamente del coste generalizado de las opciones modales efectivamente disponibles para los individuos de una determinada categoría o grupo, sino también de la cantidad de dichas opciones. Posteriormente, en este mismo epígrafe, se incidirá de nuevo con mayor detalle sobre el concepto de coste compuesto de viaje, su forma de cálculo y sus propiedades.
- $\lambda_h$  es un parámetro de valor positivo que, a efectos prácticos, controla o regula la sensibilidad del reparto modal efectuado entre los viajeros del segmento o categoría  $h$  ante las diferencias en el coste generalizado de las distintas alternativas modales. En particular, cuando los valores de  $\lambda_h$  son mayores el reparto modal resulta más sensible a las diferencias existentes entre los costes generalizados de las opciones modales (mayor desigualdad de las cuotas de reparto modal), mientras que si los valores de  $\lambda_h$  están más próximos a cero, el reparto modal es menos sensible a los costes generalizados de las alternativas modales (cuotas más próximas entre sí). En el extremo, valores de  $\lambda_h$  tendentes a infinito desembocarían en un reparto de tipo ‘todo o nada’ (la totalidad de los viajes serían acaparados por la opción modal con menor coste generalizado), mientras que valores de  $\lambda_h$  infinitesimalmente próximos a cero conllevarían un reparto modal dominado por la aleatoriedad, sin influencia del coste generalizado de las opciones, de forma que todas las alternativas resultarían equiprobables y recibirían la misma cuota de reparto modal independientemente de sus costes generalizados.

En el valor de  $\lambda_h$  se condensan dos facetas distintas pero interrelacionadas entre sí. Cuando el coste generalizado está expresado en unidades monetarias, dicho parámetro puede asimilarse a la utilidad marginal del ingreso (o, más concretamente en este tipo de aplicaciones, la utilidad marginal para el individuo de evitar el gasto de una unidad monetaria)<sup>69</sup>. Así, el valor de  $\lambda_h$  depende, entre otros importantes factores y características individuales, de la unidad monetaria utilizada para la cuantificación de los costes (por ejemplo, euro). Por otra parte,  $\lambda_h$  es inversamente proporcional a la dispersión de la utilidad percibida por los individuos que conforman el segmento o categoría  $h$ . Esta dispersión es la que permite que viajeros de un cierto segmento o categoría tomen opciones que no minimizan la parte observada de la función de coste generalizado, debido a la existencia de variables o atributos no incluidos en dicha función de coste (Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 216). A su vez, la magnitud de esta dispersión o variabilidad condiciona la escala de la utilidad, de ahí la complementariedad entre ambas visiones o interpretaciones. Esta dualidad del parámetro  $\lambda_h$  como nexo de analogía entre coste generalizado y utilidad representativa o sistemática se estudia más detalladamente en el epígrafe 4.5.

- $\theta_h$  representa, para el grupo de individuos pertenecientes al segmento o categoría  $h$ , un parámetro de resistencia al coste compuesto de desplazamiento en la distribución de viajes, el cual, por analogías

<sup>69</sup> La equivalencia de este parámetro —que actúa a modo de factor de conversión entre unidades monetarias y unidades de utilidad— a la utilidad marginal del ingreso se pone de manifiesto más habitualmente en el contexto de la valoración del bienestar social o excedente del consumidor derivado de una determinada actuación sobre el sistema de transportes. Así, esta interpretación puede inferirse, por ejemplo, en Small y Rosen (1981), Gálvez y Jara-Díaz (1998), Ortúzar y Román (2003), de Jong *et al.* (2007), o en Train (2009: pp. 55-57).

con el campo de la física, suele recibir también nombres como parámetro de ‘impedancia’ o de ‘fricción’. Su valor también ha de ser positivo (de lo contrario estarían indicando una preferencia o afinidad de los individuos hacia los viajes con costes de desplazamiento más elevados) y, además, necesariamente menor o igual al de  $\lambda_h$  por compatibilidad con la teoría del comportamiento de elección racional (Williams, 1977; Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 213).

- $S_h$  indica el conjunto de opciones modales disponibles y válidas para los individuos incluidos en el segmento o categoría  $h$  (es decir, su conjunto de elección).
- $p_{ij}^{mh}$  es la cuota de reparto modal (o probabilidad de elección, entendiendo esta en sentido agregado) de la opción  $m$  entre el grupo de viajeros pertenecientes al segmento o categoría  $h$  (dado su conjunto de elección  $S_h$ ), para los viajes que dichos individuos realizan desde la zona  $i$  hasta la zona  $j$ . Nótese que este modelo de reparto modal conduce a una formulación de tipo logit con una estructura de alternativas independientes. Por consiguiente, el patrón de sustitución entre alternativas que se deriva de este modelo de reparto modal responde a la propiedad conocida como independencia de alternativas irrelevantes o IIA (véase por ejemplo en Train (2009: pp. 45-47)). Conviene por tanto que las opciones modales incluidas en un determinado conjunto de elección sean significativamente diferentes entre sí, con el fin de minimizar, en la medida de lo razonable, la posible existencia de correlaciones entre las mismas.

De acuerdo a Ortúzar y Willumsen (2008: p. 313; 2011: pp. 213-214), el tipo de modelo representado en la ecuación 4.1 constituye la ‘buena práctica’ en el campo de la modelización agregada de la distribución de viajes y el reparto modal, especialmente para áreas urbanas (sin perjuicio de las ventajas y mayor riqueza explicativa de los modelos desagregados o de elección discreta).

Retomando con más detenimiento la cuestión del coste compuesto de viaje, debe añadirse que, en esencia, dicho tipo de coste constituye una medida de la desutilidad –cuantificada en términos monetarios si así lo están también los costes generalizados– asociada a un determinado conjunto de opciones o alternativas (cada una de ellas, a su vez, con su propia desutilidad o coste generalizado). Representa por tanto una medida opuesta a la ‘deseabilidad’ o atractivo integral del conjunto de elección y, como tal, permite comparar cuán favorable o desfavorable resulta para el potencial viajero un conjunto de alternativas de elección con respecto a otros (así como evaluar el mismo conjunto de alternativas nominales pero bajo condiciones o circunstancias distintas que conllevan desutilidades o costes generalizados diferentes de cada alternativa en una u otra situación) <sup>70</sup>. Este tipo de medida tiene en cuenta no solamente el coste generalizado de las alternativas existentes sino también la variedad (cantidad) de dichas alternativas (en consideración de la dispersión o variabilidad existente entre los individuos de un determinado segmento o categoría que dispongan de dichas opciones o alternativas).

En todo caso, la especificación matemática correcta (Williams, 1977; Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 213) para el coste compuesto es la de logaritmo natural del sumatorio de la función exponencial <sup>71</sup> aplicada sucesivamente sobre el coste generalizado de cada una de las alternativas modales disponibles en el conjunto de elección  $S_h$  (multiplicados dichos costes por el parámetro  $\lambda_h$  con signo negativo), y multiplicado todo ello (el logaritmo antedicho) por  $-1/\lambda_h$ . En resumen:

$$K_{ij}^h = \frac{-1}{\lambda_h} \cdot \ln \left( \sum_{m \in S_h} \exp(-\lambda_h \cdot GC_{ij}^m) \right) \quad (4.2)$$

Esta expresión del coste compuesto responde a la esperanza matemática del mínimo coste generalizado de viaje asumido por un individuo del segmento o categoría  $h$ , dados su conjunto de elección  $S_h$  y el

<sup>70</sup> Esto hace además al coste compuesto particularmente útil para evaluar el cambio en el excedente de los consumidores producido por la puesta en servicio de un nuevo proyecto o plan de transporte.

<sup>71</sup> A este tipo de función compuesta (logaritmo natural de la suma de las exponenciales de los argumentos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) se la conoce generalmente como ‘log-sum-exp’ o, más sencillamente, ‘logsum’.

parámetro  $\lambda_h$  inverso a la dispersión. Nótese que este valor esperado es siempre menor o igual que el mínimo de los costes generalizados de las distintas opciones o alternativas incluidas en  $S_h$ , debido a que la dispersión o variabilidad presente dentro de una determinada categoría o segmento hace que ciertos viajeros puedan tomar opciones que desde el punto de vista del analista no minimizarían la parte observada o aparente de la función de coste generalizado, pero que resultan más ventajosas para el individuo y el viaje en cuestión, percibiendo de ellas menor desutilidad. En efecto, el coste compuesto cumple la siguiente propiedad (Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 213):

$$K_{ij}^h \leq \min_{m \in S_h} \{GC_{ij}^m\} \quad (4.3)$$

Obsérvese al respecto que en la desigualdad representada en la ecuación 4.3, el caso de igualdad estricta solo se cumpliría cuando la dispersión o variabilidad fuese nula (lo que implica un valor de  $\lambda_h$  tendiendo a infinito), ya que en ese supuesto el modelo de reparto modal colapsa en una partición de tipo ‘todo o nada’, en la que todos los viajes son atraídos por la opción con menor coste generalizado.

Nótese además que al aumentar el número de opciones disponibles o alternativas incluidas en el conjunto de elección, el coste compuesto de este último siempre disminuye, por elevado que pueda ser el coste generalizado de la opción añadida.

#### 4.2.2. Hacia un modelo particular simplificado

A continuación se introducen, sobre un modelo sintético general como el esquematizado en la ecuación 4.1, el conjunto de simplificaciones y particularizaciones que permiten sentar las bases de un modelo de demanda de viajes y de reparto modal menos exigente en cuanto a requerimiento de datos necesarios, y por tanto más fácilmente aplicable y mejor adaptado a las limitaciones prácticas relacionadas con los objetivos de la tesis.

Supóngase, como punto de partida, que se pretenden obtener las cuotas de reparto modal general o poblacional, entendiendo como tales las calculadas para cada modo con respecto al volumen total de viajes efectuados por individuos de cualquiera de los segmentos o categorías en las que los viajeros hubiesen sido clasificados (es decir, con respecto a  $T_{ij}$ , donde  $T_{ij} = \sum_h T_{ij}^h$ ). Designando como  $s_{ij}^m$  dicha cuota de reparto modal general para el caso de los viajes realizados desde la zona  $i$  hasta la zona  $j$  mediante la opción modal  $m$ , es inmediato concluir que  $s_{ij}^m$  viene dada por la ponderación de las proporciones de elección modal  $p_{ij}^{mh}$  obtenidas dentro de cada uno de los segmentos o categorías, con unos pesos relativos iguales a la fracción que cada una de estas categorías o segmentos represente dentro del volumen total de viajes efectuados desde  $i$  hasta  $j$ . Es decir:

$$s_{ij}^m = \sum_h w_{ij}^h \cdot p_{ij}^{mh} \quad / \quad \sum_m s_{ij}^m = 1 \quad (4.4.a)$$

donde  $w_{ij}^h$  representa precisamente la fracción o proporción que los viajes realizados por individuos pertenecientes al segmento o categoría  $h$  componen con respecto al conjunto total de viajes llevados a cabo desde la zona  $i$  hasta la zona  $j$  (por parte de todos y cada uno de los segmentos o categorías  $l$ ). Estrictamente, estos pesos de ponderación vienen determinados por la siguiente expresión:

$$w_{ij}^h = \frac{T_{ij}^h}{\sum_l T_{ij}^l} = \frac{A_i^h \cdot O_i^h \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\theta_h \cdot K_{ij}^h)}{\sum_l A_i^l \cdot O_i^l \cdot B_j \cdot D_j \cdot \exp(-\theta_l \cdot K_{ij}^l)} = \frac{A_i^h \cdot O_i^h \cdot \exp(-\theta_h \cdot K_{ij}^h)}{\sum_l A_i^l \cdot O_i^l \cdot \exp(-\theta_l \cdot K_{ij}^l)} \quad / \quad \sum_h w_{ij}^h = 1 \quad (4.4.b)$$

De cara al desarrollo del modelo particular que es objetivo de esta tesis, es preciso diferenciar al menos aquellos viajeros que podrían escoger entre cualquiera de las opciones modales incluidas en la modelización de aquellos otros individuos que, por las razones que en cada caso correspondan, deban ser considerados como usuarios cautivos de un determinado modo de transporte, de tal forma que su

conjunto de elección queda reducido a un único elemento (el modo correspondiente). En este sentido, se va a designar como  $c_m$  a la fracción de viajes —con respecto al volumen total de desplazamientos en la relación estudiada— atribuibles a usuarios cautivos del modo de transporte  $m$  (por simplicidad de la notación se omiten en lo sucesivo las referencias a los índices de zona  $i$  y  $j$  al considerar fijado el tipo de relación origen-destino objeto de análisis). Si la segmentación de los viajes realizados se limita, por razones prácticas, a distinguir entre los viajeros considerados cautivos de cada uno de los respectivos modos y el grupo general de individuos (no cautivos) con capacidad efectiva para elegir cualquiera de las opciones modales incluidas dentro del modelo, la fracción o proporción que los viajes realizados por personas de este último grupo representan sobre el total de desplazamientos efectuados por individuos de cualquiera de los grupos definidos está determinada por  $1 - \sum_m c_m$ . Bajo estas condiciones, el cálculo de la cuota de reparto modal general  $s_m$  obtenida por el modo de transporte  $m$  queda reducido, desde la ecuación 4.4.a, a una expresión del siguiente tipo:

$$s_m = c_m + \left(1 - \sum_{n \in A} c_n\right) \cdot \underbrace{\frac{\exp(-\lambda \cdot GC_m)}{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n)}}_{p_m \text{ (dado } S_h=A)} \quad \forall m \in A \quad / \quad \sum_{m \in A} s_m = 1 \quad (4.5)$$

donde  $A$  representa el conjunto total de modos de transporte considerados por el modelo particular a desarrollar<sup>72</sup> (utilizando la notación genérica de los segmentos o categorías, podría definirse el conjunto  $A$  como  $A = \bigcup_h S_h / S_h \subseteq A \forall h$ ). Con respecto a la ecuación 4.5, obsérvese que la probabilidad de elección o cuota de reparto modal del modo  $m$  entre el grupo de viajeros cautivos de dicho modo de transporte es, por definición, igual a 1, al limitarse su conjunto de elección a este único elemento (es decir,  $S_h = \{m\}$  para el segmento de viajeros cautivos de  $m$ ). Por otra parte, obsérvese que bajo estas condiciones el parámetro  $\lambda_h$  que regula la sensibilidad del reparto modal al coste generalizado de las alternativas únicamente afecta al grupo de viajeros con capacidad efectiva para elegir entre las distintas alternativas modales existentes (pero no, de manera práctica, a los grupos de viajeros cautivos), de tal forma que de su posible conjunto de valores para diferentes segmentos o categorías se pasa a un único valor (de ahí que en dicho parámetro se pueda omitir el subíndice  $h$ ).

En relación con la parte de la ecuación 4.1 referida a las etapas de generación/atracción y de distribución de viajes (es decir, aquella que permitiría calcular  $T_{ij}^h$ ), se va a aplicar un enfoque agregado con respecto a los diversos segmentos o categorías de viajeros (cautivos y no cautivos), los cuales serán tratados por tanto de forma conjunta en lo referente a dicho cálculo<sup>73</sup>. Con esta simplificación, el volumen total de viajes en la relación estudiada (para el cual se va a emplear a partir de este momento la notación  $Q$  al objeto de remarcar el carácter simplificado de este enfoque agregado del cálculo de la demanda de viajes en el modelo particular, en lugar del tradicional  $T_{ij}$  de los modelos completos de transporte) quedaría modelizado mediante una expresión como la siguiente:

$$\sum_{mh} T^{mh} = Q = A \cdot O \cdot B \cdot D \cdot \exp(-\theta \cdot K) \quad (4.6)$$

donde, en consonancia con el carácter agregado de este enfoque, se emplea para todo el conjunto de viajes un único valor del parámetro  $\theta$  de ‘impedancia’ o de resistencia al coste compuesto de despla-

<sup>72</sup> Este conjunto  $A$  estará integrado, en el caso del modelo particular de esta tesis, por el correspondiente modo de transporte público (sea este autobús convencional en tráfico mixto, metro ligero o tranvía, o BHLS/BRT, según el escenario y el año), el automóvil particular, la moto o ciclomotor, la bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal, y el modo peatonal.

<sup>73</sup> Esta forma de simplificación es coherente, no obstante, con el criterio de conceder comparativamente una mayor importancia a la etapa de reparto modal, ya que esta se suele considerar clave en las políticas de transporte y, de hecho, la mayor parte de los objetivos de dichas políticas están habitualmente orientados a actuar sobre el reparto modal.

miento, así como un único valor medio  $K$  para dicho coste compuesto de viaje. Para limitar, en la medida de lo posible, el sesgo de agregación generado al considerar un único valor del coste compuesto  $K$ , este debe reflejar de forma ponderada los distintos costes compuestos percibidos por los individuos pertenecientes a cada uno de los grupos o segmentos en los que han sido divididos los viajeros (en este caso, en función de su conjunto de alternativas válidas de elección modal), en lugar de únicamente aplicar la ecuación 4.2 sobre el conjunto completo  $A$  de modos de transporte. Denominando  $K_w$  a dicho coste compuesto ponderado o promediado se tiene por tanto:

$$K = K_w = \sum_h w^h \cdot K^h = \sum_{m \in A} c_m \cdot K_{\{m\}} + \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot K_A \quad (4.7.a)$$

donde  $K_{\{m\}}$  representa el coste compuesto percibido por los viajeros cuyo conjunto de elección se limita al modo  $m$  (es decir, por los usuarios cautivos del modo  $m$ ),  $K_A$  indica el coste compuesto percibido por los individuos con capacidad efectiva para elegir cualquier alternativa de las incluidas en el conjunto completo  $A$  de opciones modales (es decir, por los viajeros no cautivos), y  $c_m$ , como anteriormente, hace referencia a la fracción o proporción del volumen total de viajes en la relación analizada que son atribuibles a usuarios cautivos del modo de transporte  $m$ .

Para los diversos grupos de usuarios cautivos, cuyo conjunto de elección se reduce a una única opción modal realmente disponible, es inmediato deducir que el coste compuesto de viaje por ellos percibido no puede ser otro que el coste generalizado asociado a dicho modo de transporte (es decir,  $K_{\{m\}} = GC_m$ ), lo cual puede corroborarse además mediante la aplicación de la ecuación 4.2 con  $S_h = \{m\}$ . Por su parte, el coste compuesto percibido por los viajeros que disponen del conjunto completo  $A$  de opciones modales como alternativas válidas de elección resulta de aplicar la ecuación 4.2 con  $S_h = A$  y  $\lambda_h = \lambda$ . Incorporando estas consideraciones a la ecuación 4.7.a se obtiene que el coste compuesto promediado o ponderado ( $K_w$ ) se rige en el modelo particular desarrollado por la siguiente forma de cálculo:

$$K_w = \sum_{m \in A} c_m \cdot GC_m - \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m) \right) \quad (4.7.b)$$

A continuación, procede definir matemáticamente el volumen de viajes efectuados en cada uno de los modos de transporte (denotado como  $q_m$ ), el cual viene determinado simplemente por el producto entre el volumen total de viajes en la relación analizada ( $Q$ ) y la cuota de reparto modal general obtenida para el modo  $m$  ( $s_m$ ). Por tanto:

$$q_m = Q \cdot s_m \quad \forall m \in A \quad / \quad \sum_{m \in A} q_m = Q \quad (4.8.a)$$

Reintroduciendo las ecuaciones 4.6 (con  $K = K_w$ ) y 4.5 en la ecuación 4.8.a se obtiene en consecuencia que la expresión general del modelo particular de demanda utilizado como base para el posterior desarrollo de la tesis adopta finalmente la siguiente forma:

$$q_m = \underbrace{A \cdot O \cdot B \cdot D \cdot \exp(-\theta \cdot K_w)}_Q \cdot \underbrace{\left( c_m + \left(1 - \sum_{n \in A} c_n\right) \cdot \frac{\frac{p_m}{\exp(-\lambda \cdot GC_m)}}{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n)} \right)}_{s_m} \quad \forall m \in A \quad (4.8.b)$$

donde  $K_w$  debe calcularse de acuerdo a la ecuación 4.7.b.

### 4.3. FORMULACIÓN INCREMENTAL DEL MODELO DE DEMANDA

Dentro del marco de los modelos simplificados de demanda de transporte, resultan particularmente interesantes aquellos basados en la elaboración de formulaciones incrementales de modelos en principio más complejos. La aplicación de estas formas incrementales conduce al desarrollo de un tipo de modelos denominados modelos de pivoteo o *'pivot-point'* (Ortúzar y Willumsen, 2011: pp. 433-435). La idea general subyacente tanto en las formulaciones incrementales como en los correspondientes modelos de pivoteo es la posibilidad de estimar la demanda futura de viajes a partir del conocimiento de los niveles actuales de dicha demanda (incluyendo normalmente el reparto modal entre las distintas opciones de transporte) y de los cambios o variaciones en los atributos o variables de nivel de servicio de dichas alternativas entre la situación actual y la situación futura prevista, expresándose habitualmente estos cambios en términos o bien de coste generalizado o bien de utilidad. Una de las principales propiedades que se derivan de la forma en que se desarrollan estos métodos es que permiten prescindir del conocimiento de los valores específicos de todos aquellos atributos o variables de nivel de servicio que se supone que no van a cambiar entre una y otra situación. Además, en muchos casos —dependiendo de las propiedades de la forma funcional del modelo de demanda— ni tan siquiera resulta imprescindible conocer los valores específicos de los restantes atributos o variables de nivel de servicio (aquellos que sí experimentan algún cambio), sino solamente la cuantía de dicha variación junto con la situación de partida en cuanto a demanda y reparto modal.

Para el desarrollo de un modelo de pivoteo basado en formulaciones incrementales de la ecuación 4.8.b, considérense como punto de partida dos situaciones o estados distintos de un mismo sistema de transporte (generalmente correspondientes a dos momentos diferentes a lo largo del tiempo), tales que entre ambos estados o situaciones existe un cambio o variación en los costes generalizados de las diversas opciones modales incluidas en el análisis. Admítase también la posibilidad de que las fracciones o proporciones del conjunto general de viajes correspondientes a desplazamientos realizados por usuarios cautivos de cada modo ( $c_m$ ) puedan ser diferentes en uno y otro estado o situación (en ambos casos se consideran conocidas, al entender que responden fundamentalmente a factores exógenos con respecto a las capacidades de análisis del modelo a desarrollar).

Al respecto, se van a denotar con el símbolo 'prima' (') las variables pertenecientes a uno de los estados o situaciones (generalmente considerado como el estado modificado o alterado, o 'nuevo' estado) y sin dicho símbolo las variables correspondientes al otro estado o situación (generalmente asimilado al estado 'original').

Por tanto, las condiciones descritas se podrían resumir del siguiente modo:

$$GC_m \xrightarrow{\text{alteración}} GC'_m \quad \forall m \in A \quad ; \quad \Delta GC_m = GC'_m - GC_m \quad \forall m \in A$$

$$c_m \xrightarrow{\text{alteración}} c'_m \quad \forall m \in A \quad ; \quad 0 \leq \sum_{m \in A} c_m \leq 1 \quad ; \quad 0 \leq \sum_{m \in A} c'_m \leq 1$$

De acuerdo a la situación general planteada para el desarrollo de la formulación incremental, se asume que en el estado original se conocen (para cada una de las opciones modales  $m$ ): (i)  $c_m$ ; (ii) o bien  $s_m$  o bien  $p_m$ ; (iii) o bien  $q_m$  o bien el total  $Q$ . En cambio, no necesariamente se conoce el valor específico de los costes generalizados  $GC_m$ .

En el estado modificado se suponen conocidos los  $c'_m$ , así como el valor de las variaciones o cambios en los costes generalizados de las opciones modales (es decir,  $\Delta GC_m$ ), aunque —en consonancia con lo planteado para el estado original— no necesariamente la cuantía total de dichos costes generalizados ( $GC'_m$ ).

Por su parte, el valor del parámetro  $\lambda$  de sensibilidad al coste generalizado de las alternativas en el reparto modal se presupone conocido de antemano (posteriormente se estudiará cómo obtener posibles valores del mismo cuando alguna de las variables que se conocen como dato es  $s'_m$ ). De la misma forma,



también se asume en este punto que sea conocido el valor del parámetro  $\theta$  de 'impedancia' o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes (al igual que con  $\lambda$ , se estudiará después cómo extraer posibles valores de este parámetro en función de ciertos datos conocidos).

A partir de este conjunto de datos, interesa obtener para el estado modificado en primer lugar  $p'_m$  y  $s'_m$  (reparto modal), y posteriormente  $Q'$  (volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales), que junto con  $s'_m$  permite determinar  $q'_m$  (volumen de viajes en cada modo).

#### 4.3.1. Formulación incremental del reparto modal (con inclusión de viajeros cautivos)

Los primeros desarrollos de formas incrementales para modelos de elección modal de tipo logit suelen atribuirse a Manheim (1979) y a Kumar (1980) en el caso del logit multinomial (MNL), y a Bates *et al.* (1987) para el logit jerárquico o anidado (NL). Nótese por tanto que el núcleo principal del presente epígrafe se basa inexcusablemente en las contribuciones originales debidas a dichos autores (particularmente los dos primeros). En cualquier caso, existe una experiencia relativamente extensa en el desarrollo y utilización de métodos de pivoteo. En este sentido, una interesante retrospectiva del desarrollo de formulaciones incrementales y del uso de modelos de pivoteo de diferentes grados de complejidad se encuentra incluida en Daly *et al.* (2011).

Así pues, de acuerdo a la forma funcional tipo logit del submodelo de reparto modal (obsérvese en las ecuaciones 4.5 o 4.8.b), en el estado modificado las cuotas modales  $p'_m$  para el conjunto de viajeros que no son cautivos de ningún modo de transporte estarían determinadas por la siguiente expresión:

$$p'_m = \frac{\exp(-\lambda \cdot GC'_m)}{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC'_n)} \quad \forall m \in A \quad (4.9.a)$$

Dado que  $GC'_m = GC_m + \Delta GC_m$  y además, por otra parte,  $\exp(a+b) = \exp(a) \cdot \exp(b)$ , la ecuación 4.9.a puede expresarse también del siguiente modo:

$$\begin{aligned} p'_m &= \frac{\exp[-\lambda \cdot (GC_m + \Delta GC_m)]}{\sum_{n \in A} \exp[-\lambda \cdot (GC_n + \Delta GC_n)]} = \frac{\exp[-\lambda \cdot GC_m + (-\lambda) \cdot \Delta GC_m]}{\sum_{n \in A} \exp[-\lambda \cdot GC_n + (-\lambda) \cdot \Delta GC_n]} = \\ &= \frac{\exp(-\lambda \cdot GC_m) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)} \end{aligned} \quad (4.9.b)$$

A continuación se procede a dividir numerador y denominador entre  $\sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}})$ , y recordando además que  $\exp(-\lambda \cdot GC_m) / \sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}}) = p_m$ , es posible obtener la siguiente relación:

$$\begin{aligned} p'_m &= \frac{\frac{\exp(-\lambda \cdot GC_m) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}})}}{\frac{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)}{\sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}})}} = \frac{\frac{\exp(-\lambda \cdot GC_m)}{\sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}})} \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} \frac{\exp(-\lambda \cdot GC_n)}{\sum_{\tilde{n} \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_{\tilde{n}})} \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)} = \\ &= \frac{p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} p_n \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)} \quad \forall m \in A \end{aligned} \quad (4.9.c)$$

La ecuación 4.9.c proporciona las cuotas de reparto modal no cautivo en el estado modificado o alterado a partir de esas mismas cuotas en el estado original y de la cuantía de las variaciones o cambios en los costes generalizados de las opciones modales.

Introduciendo ahora como novedad el hecho de que no todos los viajes del conjunto total son realizados por individuos que efectivamente tienen la posibilidad de elegir entre cualquiera de las opciones modales, sino que también en el estado modificado o alterado existen unas determinadas fracciones o proporciones de dicho total que son atribuibles a viajeros cautivos de cada uno de los modos considerados ( $c'_m$ ), se obtiene finalmente para el reparto modal general en el 'nuevo' estado la siguiente expresión:

$$s'_m = c'_m + \left(1 - \sum_{n \in A} c'_n\right) \cdot p'_m = c'_m + \left(1 - \sum_{n \in A} c'_n\right) \cdot \frac{p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} p_n \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)} \quad \forall m \in A \quad (4.10)$$

donde las cuotas de reparto modal no cautivo  $p_m$  pueden ser expresadas, en caso de que sus valores no hubiesen sido dados explícitamente, mediante la siguiente relación:

$$p_m = \frac{s_m - c_m}{1 - \sum_{n \in A} c_n} \quad \forall m \in A \quad (4.11)$$

### 4.3.2. Formulación incremental de los volúmenes de viajes totales y por modos (con consideración de viajeros cautivos)

A continuación se explora el desarrollo de una formulación de tipo incremental para el cálculo del volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales en el estado modificado ( $Q'$ ), en función de la serie de datos conocidos del estado original y del valor de las variaciones o cambios en los costes generalizados de cada uno de los modos de transporte entre uno y otro estado. Una vez conocido el volumen total  $Q'$ , bastará combinarlo con las cuotas de reparto modal general  $s'_m$  para obtener los nuevos volúmenes de viajes en cada modo ( $q'_m$ ).

Para tal fin, comiencese por obtener la expresión matemática del cociente entre  $Q'$  y el volumen total de viajes  $Q$  en el estado original, donde  $Q$  y  $Q'$  se formularían en base a las ecuaciones 4.6 (con  $K=K_w$ ) o 4.8.b. Teniendo en cuenta además que  $\exp(a)/\exp(b)=\exp(a-b)$  se llega a la siguiente expresión para el cociente  $Q'/Q$ :

$$\left. \begin{array}{l} Q = A \cdot O \cdot B \cdot D \cdot \exp(-\theta \cdot K_w) \\ Q' = A' \cdot O' \cdot B' \cdot D' \cdot \exp(-\theta \cdot K'_w) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{Q'}{Q} = \frac{A' \cdot O' \cdot B' \cdot D'}{A \cdot O \cdot B \cdot D} \cdot \exp\left[-\theta \cdot \underbrace{(K'_w - K_w)}_{\Delta K_w}\right] \quad (4.12)$$

En la ecuación 4.12, el cociente  $A' \cdot O' \cdot B' \cdot D' / A \cdot O \cdot B \cdot D$  puede interpretarse como un factor de crecimiento de carácter estrictamente exógeno con respecto al tipo de modelo desarrollado, ya que es independiente de los cambios de accesibilidad en la relación estudiada, cuantificados a través de la variación del coste compuesto de viaje (la influencia endógena de este último queda aislada en el término exponencial). Este factor de crecimiento exógeno puede reformularse, por motivos de simplicidad en la aplicación práctica del modelo, como  $1 + J_{Q,ex} / 100$ , donde  $J_{Q,ex}$  (%) se definiría como el porcentaje de variación —entre un estado original y otro modificado— del volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales de transporte en la relación analizada, bajo el supuesto de que dicha variación estuviese causada exclusivamente por circunstancias exógenas con respecto a la capacidad de análisis del modelo (es decir, factores sin una dependencia bien definida con los costes de viaje de la propia relación origen-destino)<sup>74</sup>. Así pues, puede definirse matemáticamente la variable exógena  $J_{Q,ex}$  mediante cualquiera de las dos expresiones equivalentes indicadas a continuación:

<sup>74</sup> De acuerdo al balance entre capacidades y limitaciones del modelo, entre las múltiples posibles causas exógenas de la variación en el volumen total de viajes en una determinada relación deben citarse, por una parte, factores de tipo

$$J_{Q,ex} = \left( \frac{A' \cdot O' \cdot B' \cdot D'}{A \cdot O \cdot B \cdot D} - 1 \right) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (4.13.a)$$

$$J_{Q,ex} = \left( \frac{Q'_0}{Q} - 1 \right) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (4.13.b)$$

donde  $Q'_0$  representa el hipotético volumen total de viajes previsible para el estado modificado si entre el estado original y el nuevo estado no tuviese lugar ningún cambio en el coste compuesto de viaje de la relación estudiada (es decir, si  $\Delta K_w = 0$ ).

Por consiguiente, incorporando la redefinición del factor de crecimiento exógeno como  $1 + J_{Q,ex}/100$  a la ecuación 4.12, se obtiene que el volumen total de viajes  $Q'$  en el estado modificado puede modelizarse incrementalmente mediante una expresión del siguiente tipo:

$$Q' = Q \cdot \left( 1 + \frac{J_{Q,ex}}{100} \right) \cdot \exp(-\theta \cdot \Delta K_w) \quad (4.14)$$

donde  $\Delta K_w$  se define como  $K'_w - K_w$ .

Finalmente, el volumen de viajes movilizados por cada opción modal en el estado modificado ( $q'_m$ ) vendrá determinado simplemente por la siguiente ecuación:

$$q'_m = Q' \cdot s'_m \quad \forall m \in A \quad (4.15)$$

No obstante, tal como se desprende de la ecuación 4.14, el volumen total de viajes en el estado modificado depende endógenamente de la variación experimentada, desde el estado original, en el coste compuesto promediado (es decir, ponderado según las proporciones o fracciones de viajes realizados por usuarios cautivos de cada modo y por viajeros con capacidad de elección entre cualquiera de las opciones). De acuerdo a los principios en los que se basan los métodos incrementales, dicha variación ha de poder ser calculada en función de los datos conocidos en el estado original, de los cambios en los costes generalizados de transporte en las distintas opciones modales, y, en este caso en particular, también de las nuevas fracciones o proporciones sobre el volumen total de viajes que correspondan a desplazamientos realizados por usuarios cautivos ( $c'_m$ ), que, en general, son distintas a las del estado original o inicial.

Así pues, a fin de poder expresar finalmente la variación del coste compuesto promediado o ponderado en función del conjunto de datos que se asumen como conocidos, comiencese por analizar cómo variaría el coste compuesto de viaje para los individuos incluidos en cada uno de los grupos o segmentos en los que los viajeros han sido divididos según su conjunto de alternativas efectivamente disponibles.

En primer lugar, el coste compuesto de viaje  $K'_A$  percibido en el estado modificado por los individuos que tienen disponibles, como alternativas factibles, el conjunto completo de opciones modales (es decir, su conjunto de elección es  $A$ ) puede ser expresado de la siguiente forma:

$$K'_A = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC'_m) \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp[-\lambda \cdot (GC_m + \Delta GC_m)] \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp[-\lambda \cdot GC_m + (-\lambda) \cdot \Delta GC_m] \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \right) \quad (4.16)$$

demográfico y socioeconómico (como, por ejemplo, la evolución cuantitativa de la población en el área de influencia, variaciones en la distribución por edades de dicha población, cambios en la renta y en las tasas de empleo, influencia de nuevos desarrollos tecnológicos y estilos de vida sobre las necesidades de movilidad, etc.), así como efectos territoriales vinculados tanto a la planificación urbanística residencial como a las decisiones —ya sean del sector público o del privado— sobre la localización y deslocalización de actividades (centros de atracción de viajes) en las zonas en estudio.

Dado que  $\Delta K_A = K'_A - K_A$ , aplicando la definición matemática del coste compuesto (ecuación 4.2) al estado original y sustrayéndola de la ecuación 4.16 se llega directamente a la siguiente expresión:

$$\Delta K_A = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \right) - \ln \left( \sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n) \right) \right] \quad (4.17.a)$$

A continuación, recordando que  $\ln a - \ln b = \ln(a/b)$  y que  $\exp(-\lambda \cdot GC_m) / \sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n) = p_m$  se puede obtener finalmente la siguiente expresión para la variación en el coste compuesto de viaje percibido por los individuos que disponen del conjunto completo de opciones modales como alternativas factibles:

$$\Delta K_A = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{\sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_n)} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \right) \quad (4.17.b)$$

Por su parte, para los viajeros que disponen de una única opción modal (por tanto, cautivos de dicho modo), resulta inmediato determinar que la variación en el coste compuesto por ellos percibido viene dada directamente por el cambio en el coste generalizado de la opción modal en cuestión. Es decir:

$$\Delta K_{\{m\}} = K'_{\{m\}} - K_{\{m\}} = GC'_m - GC_m = \Delta GC_m \quad \forall m \in A \quad (4.18)$$

Así pues, para el cálculo de la variación en el coste compuesto promediado o ponderado (incluyendo posibles cambios en las fracciones o proporciones de viajes asignables a usuarios cautivos de cada modo) se partiría en general de las siguientes expresiones:

$$\Delta K_w = K'_w - K_w \quad (4.19.a)$$

donde de acuerdo a la ecuación 4.7.a:

$$K_w = \left( 1 - \sum_{m \in A} c_m \right) \cdot K_A + \sum_{m \in A} c_m \cdot K_{\{m\}} \quad (4.19.b)$$

$$K'_w = \left( 1 - \sum_{m \in A} c'_m \right) \cdot K'_A + \sum_{m \in A} c'_m \cdot K'_{\{m\}} = \left( 1 - \sum_{m \in A} c'_m \right) \cdot (K_A + \Delta K_A) + \sum_{m \in A} c'_m \cdot (K_{\{m\}} + \Delta K_{\{m\}}) \quad (4.19.c)$$

En base a las ecuaciones 4.19.a, 4.19.b y 4.19.c se llega fácilmente a la siguiente expresión para el cómputo de la variación en el coste compuesto promediado o ponderado:

$$\Delta K_w = \left( \sum_{m \in A} c_m - \sum_{m \in A} c'_m \right) \cdot K_A + \left( 1 - \sum_{m \in A} c'_m \right) \cdot \Delta K_A + \sum_{m \in A} (c'_m - c_m) \cdot K_{\{m\}} + \sum_{m \in A} c'_m \cdot \Delta K_{\{m\}} \quad (4.20.a)$$

Téngase ahora presente que los datos conocidos permiten calcular  $\Delta K_A$  y  $\Delta K_{\{m\}}$ , pero no los valores concretos de  $K_A$  ni de  $K_{\{m\}}$  (por tanto, tampoco los de  $K'_A$  ni  $K'_{\{m\}}$ ). En conclusión, a la vista de la ecuación 4.20.a se observa que en el caso general planteado (en el que  $c'_m \neq c_m$  al menos para algún valor de  $m$ ) no es posible cancelar los términos en los que intervienen  $K_A$  o  $K_{\{m\}}$ . Solo en el caso simplificado en el que  $c'_m$  fuese igual a  $c_m$  para todos los posibles valores de  $m$  se podría calcular  $\Delta K_w$  aplicando directamente la ecuación 4.20.a. En dicho caso simplificado se tendría:

$$\begin{aligned} \text{Si } c'_m = c_m \quad \forall m \in A \Rightarrow \Delta K_w &= \left( 1 - \sum_{m \in A} c'_m \right) \cdot \Delta K_A + \sum_{m \in A} c'_m \cdot \Delta K_{\{m\}} = \\ &= -\left( 1 - \sum_{m \in A} c_m \right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \right) + \sum_{m \in A} c_m \cdot \Delta GC_m \end{aligned} \quad (4.20.b)$$

Así pues, para dar respuesta al caso general es necesario explorar expresiones alternativas que permitan superar esta aparente limitación. En este sentido, conviene plantear que la diferencia entre el coste generalizado de dos opciones modales cualesquiera  $a$  y  $b$  contenidas en el conjunto de elección puede ser expresada en función de sus cuotas de reparto modal  $p_a$  y  $p_b$  a partir de la siguiente relación:

$$\left. \begin{aligned} p_a &= \frac{\exp(-\lambda \cdot GC_a)}{\sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m)} \\ p_b &= \frac{\exp(-\lambda \cdot GC_b)}{\sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{p_b}{p_a} = \frac{\exp(-\lambda \cdot GC_b)}{\exp(-\lambda \cdot GC_a)} = \exp[-\lambda \cdot (GC_b - GC_a)] \quad \forall a, b \in A \quad (4.21.a)$$

Tomando logaritmos naturales sobre la igualdad obtenida en la ecuación 4.21.a se llega a la siguiente expresión para relacionar los costes generalizados de las dos opciones modales  $a$  y  $b$ :

$$GC_b - GC_a = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{p_b}{p_a} \Rightarrow GC_b = GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{p_b}{p_a} \quad \forall a, b \in A \quad (4.21.b)$$

En base a la relación dada por la ecuación 4.21.b, el coste compuesto  $K_A$  percibido por los individuos que disponen del conjunto completo  $A$  de opciones modales como alternativas válidas de elección puede ser expresado alternativamente por medio del siguiente desarrollo:

$$\begin{aligned} K_A &= -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_m) \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp \left[ -\lambda \cdot \left( GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} \right) \right] \right) = \\ &= -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_a) \cdot \exp \left( \ln \frac{p_m}{p_a} \right) \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A} \exp(-\lambda \cdot GC_a) \cdot \frac{p_m}{p_a} \right) = \\ &= -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \exp(-\lambda \cdot GC_a) \cdot \sum_{m \in A} \frac{p_m}{p_a} \right) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left( \ln [\exp(-\lambda \cdot GC_a)] + \ln \sum_{m \in A} \frac{p_m}{p_a} \right) = \\ &= GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \sum_{m \in A} \frac{p_m}{p_a} \end{aligned} \quad (4.22.a)$$

Dado que además se cumple necesariamente que  $\sum_{m \in A} p_m / p_a = 1 / p_a$  se obtiene finalmente la siguiente igualdad, que se satisface independientemente de cuál sea la opción modal que se tome como elemento  $a$  de referencia en el conjunto completo de elección:

$$K_A = GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1}{p_a} \quad \forall a \in A \quad (4.22.b)$$

Por otra parte, para los múltiples grupos de viajeros cautivos de alguno de los distintos modos que integran el conjunto  $A$  se deduce, aplicando la ecuación 4.21.b, que su contribución total al coste compuesto promediado o ponderado puede calcularse alternativamente de la forma siguiente:

$$\sum_{m \in A} c_m \cdot K_{\{m\}} = \sum_{m \in A} c_m \cdot GC_m = \sum_{m \in A} c_m \cdot \left( GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} \right) = GC_a \cdot \sum_{m \in A} c_m - \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} \quad (4.23)$$

Por tanto, retomando la expresión general en la que se define el coste compuesto promediado o ponderado (véase ecuación 4.7.a), se obtiene que este puede llegar a ser calculado del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 K_w &= \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot \left(GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1}{p_a}\right) + GC_a \cdot \sum_{m \in A} c_m - \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} = \\
 &= GC_a - \cancel{GC_a} \cdot \sum_{m \in A} c_m - \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1}{p_a} + \cancel{GC_a} \cdot \sum_{m \in A} c_m - \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} = \\
 &= GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} + \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot \ln \frac{1}{p_a} \right]
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

A continuación se debe tener en cuenta la siguiente igualdad entre distintas formas del mismo término:

$$\sum_{m \in A} c_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} = \sum_{m \in A} c_m \cdot (\ln p_m - \ln p_a) = \sum_{m \in A} c_m \cdot \left( \ln p_m + \ln \frac{1}{p_a} \right) = \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m + \ln \frac{1}{p_a} \cdot \sum_{m \in A} c_m \tag{4.25}$$

Reintroduciendo la igualdad de la ecuación 4.25 en el cálculo del coste compuesto promediado o ponderado (ecuación 4.24) se puede llegar finalmente a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 K_w &= GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m + \ln \frac{1}{p_a} \cdot \sum_{m \in A} c_m + \left(1 - \sum_{m \in A} c_m\right) \cdot \ln \frac{1}{p_a} \right] = \\
 &= GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m + \ln \frac{1}{p_a} \right) = GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m - \ln p_a \right)
 \end{aligned} \tag{4.26.a}$$

De la misma forma, para el estado modificado o alterado se tendría:

$$K'_w = GC'_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c'_m \cdot \ln p'_m - \ln p'_a \right) \tag{4.26.b}$$

Así pues, sustituyendo las ecuaciones 4.26.a y 4.26.b en 4.19.a es posible obtener la siguiente expresión para el cálculo de la variación en el coste compuesto promediado o ponderado entre los estados original y modificado, incluyendo el efecto de posibles cambios en las fracciones o proporciones de viajes atribuibles a usuarios cautivos de cada modo:

$$\begin{aligned}
 \Delta K_w &= (GC'_a - GC_a) - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c'_m \cdot \ln p'_m - \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m - \ln p'_a + \ln p_a \right) = \\
 &= \Delta GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c'_m \cdot \ln p'_m - \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m - \ln \frac{p'_a}{p_a} \right)
 \end{aligned} \tag{4.27.a}$$

Las diferentes cuotas de reparto modal no cautivo en el estado modificado (es decir,  $p'_m \forall m$ , incluyendo la propia  $p'_a$ ) se pueden obtener en función de dichas cuotas en el estado original y de los cambios en los costes generalizados de las opciones modales (recuérdese la ecuación 4.9.c). Introduciendo explícitamente estas relaciones en la ecuación 4.27.a, la variación en el coste compuesto promediado puede finalmente ser expresada en función del conjunto de datos inicialmente conocidos, de la siguiente forma:

$$\Delta K_w = \Delta GC_a - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c'_m \cdot \ln \frac{p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)}{\sum_{n \in A} p_n \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_n)} - \sum_{m \in A} c_m \cdot \ln p_m - \ln \frac{\exp(-\lambda \cdot \Delta GC_a)}{\sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)} \right) \tag{4.27.b}$$

#### 4.4. OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS $\lambda$ Y $\theta$ A PARTIR DE DATOS CONOCIDOS EN DOS ESTADOS O SITUACIONES DISTINTAS

##### 4.4.1. Obtención de valores del parámetro $\lambda$

En este caso el objetivo que se persigue es obtener un valor estimativo del parámetro  $\lambda$  de sensibilidad del reparto modal al coste generalizado de las alternativas en función de ciertos datos que se conozcan acerca de dos estados o situaciones distintas, entre las cuales hayan mediado cambios en los costes generalizados de las opciones y variaciones en las fracciones o proporciones del conjunto de viajes correspondientes a desplazamientos efectuados por usuarios cautivos de cada modo. En la práctica se trataría normalmente de datos longitudinales, observados en dos momentos distintos en el tiempo. Al respecto, las variables referidas a uno u otro estado o momento se van a diferenciar, en su notación, por el uso o no del símbolo 'prima'.

En concreto, se considera en este caso que se han observado o se conocen como datos las siguientes variables (para cada una de las opciones modales  $m$ ): (i)  $c_m$ ; (ii) o bien  $s_m$  o bien  $p_m$ ; (iii)  $c'_m$ ; (iv)  $\Delta GC_m$ , definiéndose esta variación como la diferencia  $GC'_m - GC_m$ . Además, se conoce también: (v)  $s'_b$  (o bien directamente  $p'_b$ ) para al menos una opción  $b$  de entre las contenidas en el conjunto completo  $A$  de alternativas modales.

Sin más que recurrir a la formulación incremental del reparto modal no cautivo expresada en la ecuación 4.9.c, se comprueba que el valor del parámetro  $\lambda$  debe cumplir las siguientes relaciones:

$$p'_b = \frac{p_b \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_b)}{\sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)} \Rightarrow \frac{\exp(-\lambda \cdot \Delta GC_b)}{\sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)} - \frac{p'_b}{p_b} = 0 \quad ; \quad \lambda > 0 \quad (4.28.a)$$

Nótese que la igualdad representada en la segunda parte de la ecuación 4.28.a no admite en general solución explícita, por lo que ha de ser resuelta numéricamente para encontrar el valor de  $\lambda$  que satisfaga dicha igualdad (debiendo restringirse el campo de posibles soluciones a valores positivos).

Por otra parte, en el caso de que las cuotas de reparto modal no cautivo  $p_m$  y  $p'_b$  no se presenten directamente como datos —o no se hayan calculado explícitamente a partir de los datos disponibles  $c_m$ ,  $s_m$ ,  $c'_m$  y  $s'_b$ — bastaría con introducir el tipo de relación dado por la ecuación 4.11 para obtener la siguiente forma extendida de la segunda parte de la ecuación 4.28.a:

$$\frac{\exp(-\lambda \cdot \Delta GC_b)}{\sum_{m \in A} \frac{s_m - c_m}{1 - \sum_{n \in A} c_n} \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m)} - \frac{s'_b - c'_b}{s_b - c_b} \cdot \frac{1 - \sum_{m \in A} c_m}{1 - \sum_{m \in A} c'_m} = 0 \quad ; \quad \lambda > 0 \quad (4.28.b)$$

Obsérvese que como las ecuaciones 4.28.a o 4.28.b se pueden plantear para cada posible elemento  $b$  perteneciente al conjunto  $A$  de opciones modales, sería posible formar tantas ecuaciones como elementos contenga dicho conjunto (siempre y cuando se conociesen todos los datos  $s'_m$  o  $p'_m$ ). Desde el punto de vista del modelo puramente teórico, todas estas posibles ecuaciones resultarían compatibles entre sí (es decir, deberían conducir a un mismo valor del parámetro  $\lambda$ ). No obstante, en la práctica sería normal que inexactitudes en la cuantificación o valoración de los datos —junto con las propias limitaciones del modelo para reflejar fielmente la realidad— condujesen a distintos valores de  $\lambda$  según la opción modal utilizada para plantear cada una de estas posibles ecuaciones.

En aquellos casos prácticos en los que se manejase un conjunto de ecuaciones no compatibles, un posible enfoque alternativo —aunque no va a ser utilizado posteriormente en el modelo desarrollado— consistiría en ajustar el valor de  $\lambda$  a través de una regresión lineal simple aplicada de manera iterativa. En este sentido, obsérvese que la ecuación 4.28.a puede ser reformulada del siguiente modo:

$$\exp(-\lambda \cdot \Delta GC_b) = \frac{p'_b}{p_b} \cdot \sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \quad \forall b \in A \quad (4.29.a)$$

A continuación, tomando logaritmos naturales a ambos lados de la igualdad mostrada en la ecuación 4.29.a se obtiene la siguiente expresión:

$$\lambda \cdot \Delta GC_b = -\ln \underbrace{\left[ \frac{p'_b}{p_b} \cdot \sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta GC_m) \right]}_{y_b} \quad \forall b \in A \quad (4.29.b)$$

Cada punto de la regresión lineal (con intercepto nulo) estaría dado por el par  $(x_b, y_b)$  calculado de acuerdo a la ecuación 4.29.b, siendo  $b$  cada una de las opciones modales para las cuales haya sido posible determinar su cuota de reparto modal no cautivo  $p'_b$  (recuérdese que  $p_m$  y  $\Delta GC_m$  se asumen conocidas para todas las opciones modales incluidas en el conjunto  $A$ ). Dado que el cálculo del término englobado como  $y_b$  depende a su vez del valor del parámetro  $\lambda$ , que es la incógnita que se pretende estimar mediante la regresión, es necesario proceder de forma iterativa, partiendo de un valor inicial  $\lambda^0$  (que podría proceder, por ejemplo, de resolver numéricamente la ecuación 4.28.a para la opción modal que, entre todas aquellas cuya cuota  $p'_b$  sea conocida, presente un mayor valor absoluto en la variación  $\Delta GC_b$  de su coste generalizado). A continuación se aplicaría sucesivamente el algoritmo de avance entre las iteraciones  $n$  y  $n+1$  que se resume en la ecuación 4.30, hasta alcanzar la convergencia en el valor estimado de  $\lambda$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_b = \Delta GC_b \\ y_b^n = -\ln \left[ \frac{p'_b}{p_b} \cdot \sum_{m \in A} p_m \cdot \exp(-\lambda^n \cdot \Delta GC_m) \right] \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{SLR}} y = \lambda \cdot x \xrightarrow{\text{OLS}} \lambda^{n+1} = \frac{\sum_b x_b \cdot y_b^n}{\sum_b (x_b)^2} \quad (4.30)$$

Otra forma alternativa —completamente distinta— de obtener el valor del parámetro  $\lambda$  pasaría por estimar, para el caso estudiado, un modelo de elección discreta de tipo logit multinomial (MNL) cuya especificación lineal de la utilidad representativa o sistemática fuese análoga a la empleada para el coste generalizado. Bajo dichas condiciones, el valor de  $\lambda$  se extrae del coeficiente que multiplica a la variable indicativa del precio o coste puramente monetario del viaje, sin más que cambiar de signo dicho coeficiente (de modo que represente la utilidad marginal del ingreso). Los fundamentos teóricos en los que se sustenta esta equivalencia se estudian con detalle dentro del epígrafe 4.5. No obstante, este método podría resultar mucho más costoso de llevar a la práctica debido a la necesidad de un amplio conjunto de encuestas, si bien puede haber situaciones en las que resulte fiable transferir resultados de otros casos similares.

#### 4.4.2. Obtención de valores del parámetro $\theta$

A continuación se presenta el procedimiento de obtención del valor del parámetro  $\theta$  de ‘impedancia’ o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes que se derivaría de un determinado conjunto de datos referidos a dos estados o situaciones diferentes. No obstante, se advierte ya ahora que este tipo de procedimiento es aquí planteado a efectos meramente teóricos, ya que en el desarrollo e implementación práctica del modelo particular se optará por un enfoque más simple en el cual los valores estimativos del parámetro  $\theta$  se obtendrán en cada caso como una parte fraccional (comprendida entre 0 y 1) del valor respectivo del parámetro  $\lambda$ , donde dicha parte fraccional, sometida en el modelo a incertidumbre, responde a una distribución estadística triangular cuyos parámetros característicos (mínimo, máximo y moda) son considerados como datos a introducir por el analista.

Para este procedimiento teórico se asume que son conocidos los mismos datos que en el caso de la obtención de valores del parámetro  $\lambda$ , pero además se dispone ahora también del valor de la variable



$J_{Q,ex}$  (variación porcentual, entre ambos estados, del volumen total de viajes debido a factores exógenos a los costes de transporte), así como de los volúmenes totales de viajes en el conjunto de opciones modales en uno y otro estado, es decir,  $Q$  y  $Q'$  (o al menos  $q_c$  y  $q'_c$  para alguna opción modal  $c$  que esté contenida dentro del conjunto  $A$ ). En este último caso, resultaría inmediato calcular  $Q=q_c/s_c$  y  $Q'=q'_c/s'_c$ .

Para la situación planteada, se puede despejar explícitamente el valor del parámetro  $\theta$  en base a la ecuación 4.14, resultando la siguiente expresión:

$$\theta = -\frac{1}{\Delta K_w} \cdot \ln \frac{Q'}{\left(1 + \frac{J_{Q,ex}}{100}\right) \cdot Q} ; 0 < \theta \leq \lambda \quad (4.31)$$

donde  $\Delta K_w$  se puede calcular de acuerdo a la ecuación 4.27.b o según 4.27.a (en este último caso se requiere calcular explícitamente los valores  $p'_m \forall m \in A$ , para lo que se aplicaría simplemente la ecuación 4.9.c). Por su parte, el valor del parámetro  $\lambda$ , también necesario, se habrá obtenido según alguno de los procedimientos descritos anteriormente, mientras que las cuotas de reparto modal no cautivo  $p_m$ , si no se presentan directamente como datos, se calcularían en función de  $s_m$  y  $c_m$  según la ecuación 4.11.

#### 4.4.3. Particularización: Obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ según los datos característicos del modelo

En el desarrollo e implementación efectiva del tipo de modelo general de demanda de viajes y de reparto modal planteado como una de las bases teóricas de esta tesis, los valores a utilizar para los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  podrían hipotéticamente ser calculados en base a dos grupos de datos, referido cada uno de estos grupos o conjuntos a un determinado momento en el tiempo. Este procedimiento teórico será efectivamente llevado a la práctica en el caso del cálculo estimativo de los valores del parámetro  $\lambda$ , mientras que en el caso de la obtención de valores del parámetro  $\theta$  se sustituirá dicho procedimiento por una alternativa más simple y estable, que garantice en todo caso que  $0 < (\theta/\lambda) \leq 1$ , por lo que la aplicabilidad del desarrollo presentado en el epígrafe 4.4.3.2 quedará reducida —en lo que al resto de la tesis se refiere— a un nivel solamente teórico.

En todo caso, en el modelo se deberá disponer, por una parte, de un conjunto de datos relativos al año base, entendiéndose este como representativo de la situación actual. Las variables referidas al año base se denotan en el modelo particular con un asterisco (por ejemplo  $x^*$ , siendo  $x$  cualquier variable genérica).

Por otra parte, la obtención de valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$ , de acuerdo a este enfoque teórico, requeriría adicionalmente el uso de un pequeño conjunto de datos que hagan referencia a un año (o, más genéricamente, a cualquier momento en el tiempo) anterior al propio año base, del cual se conozcan con una adecuada precisión los valores de las variables necesarias para el cálculo de  $\lambda$  y  $\theta$ . A lo largo del desarrollo del modelo particular o aplicado, dicho año va a ser denominado como 'año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda' (o expresiones similares). Las variables pertenecientes al año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros se denotan en el modelo particular mediante la adición de un símbolo de acento circunflejo (por ejemplo  $x^\wedge$ ).

El conjunto completo  $A$  de opciones modales  $m$  consideradas en el modelo particular o aplicado está formado, en los casos del año base y del año previo de referencia empleado para la calibración de parámetros de demanda, por las siguientes alternativas: autobús convencional en tráfico mixto ( $m=0$ ) como modo de transporte público existente, automóvil particular ( $m=C$ ), moto o ciclomotor ( $m=M$ ),

bicicleta u otros pequeños vehículos de movilidad personal ( $m=V$ ), y modo peatonal ( $m=P$ ). Por tanto,  $A=\{0,C,M,V,P\}$ .

Así pues, en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros se asumiría que son conocidas como datos, al menos, las siguientes variables: (i) fracciones o proporciones del volumen total de viajes correspondientes a desplazamientos realizados por usuarios cautivos de cada modo ( $c_m^\wedge \forall m \in A$ ); (ii) cuota de reparto modal general del modo de transporte público ( $s_0^\wedge$ ); (iii) volumen  $q_0^\wedge$  de viajes en el modo de transporte público disponible, es decir, autobús convencional (nótese que esta última variable solo resultaría indispensable para el cálculo teórico del parámetro  $\theta$ , por lo que posteriormente se prescindirá de la misma en la implementación práctica del modelo).

Por su parte, en el caso del año base se considera que entre los datos disponibles se encuentran, entre otros, los siguientes: (i)  $c_m^* \forall m \in A$ ; (ii)  $s_m^* \forall m \in A$  (obsérvese que, a diferencia del año previo de referencia, es necesario utilizar en el cálculo las cuotas de reparto modal de todas las alternativas); (iii)  $q_0^*$  (aunque es un dato fundamental en el modelo desarrollado, su intervención en la obtención de valores para los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  se limitaría al cálculo teórico de este último).

En cuanto a los datos que hacen alusión a los cambios producidos entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, se asume inicialmente que se dispondría de una valoración de las siguientes variables: (i) variaciones en los costes generalizados de todas las opciones modales ( $\Delta GC_m^{\wedge*} \forall m \in A$ , donde  $\Delta GC_m^{\wedge*}$  se define como  $GC_m^* - GC_m^\wedge$ ); (ii) variación porcentual, desde el año previo de referencia hasta el año base, del volumen total de viajes debido a factores exógenos a los costes de desplazamiento ( $J_{Q,ex}^{\wedge*}$ ), si bien el valor de esta variable solo sería necesario conocerlo para un posible cálculo teórico del parámetro  $\theta$  (por tanto, resultará prescindible en la implementación práctica del modelo aplicado). Obsérvese que  $J_{Q,ex}^{\wedge*}$  (%) se podría definir como el hipotético resultado de  $(Q^*/Q^\wedge - 1) \cdot 100$  (%) en el supuesto de que no se hubiesen producido variaciones en el coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los dos años analizados.

A efectos de particularización de las ecuaciones anteriormente desarrolladas, se adopta, por conveniencia, el año base –del cual se conocen un conjunto más completo de datos– como estado o situación original, mientras que el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros se toma como si fuese el estado modificado o alterado, indiferentemente del orden con el que estos dos momentos transcurran en el tiempo. Nótese que con este criterio la variación del coste generalizado de una opción modal desde el estado original al estado modificado o alterado (es decir,  $GC_m^\wedge - GC_m^*$ ) no es igual al dato  $\Delta GC_m^{\wedge*}$ , sino a este mismo valor cambiado de signo ( $-\Delta GC_m^{\wedge*}$ ).

#### 4.4.3.1. Parámetro $\lambda$

Para la determinación del valor del parámetro  $\lambda$ , de forma auxiliar se deben calcular en primer lugar las cuotas de reparto modal no cautivo en el año base  $p_m^*$  para cada una de las alternativas contenidas en el conjunto  $A$ , sin más que basarse para ello en la ecuación 4.11. Se obtiene por consiguiente:

$$p_m^* = \frac{s_m^* - c_m^*}{1 - \sum_{n \in A} c_n^*} \quad \forall m \in A \quad (4.32.a)$$

Adicionalmente se ha de calcular también la cuota de reparto modal no cautivo  $p_0^\wedge$  correspondiente al modo de transporte público (autobús convencional) en el año previo de referencia empleado para la calibración de parámetros:

$$p_0^\wedge = \frac{s_0^\wedge - c_0^\wedge}{1 - \sum_{m \in A} c_m^\wedge} \quad (4.32.b)$$

A continuación procede aplicar la igualdad representada en la segunda parte de la ecuación 4.28.a, teniendo en cuenta al respecto el criterio adoptado para la definición del estado original y el estado modificado o alterado. Esto conduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\exp[-\lambda \cdot (GC_0^\wedge - GC_0^{*\wedge})]}{\sum_{m \in A} p_m^* \cdot \exp[-\lambda \cdot (GC_m^\wedge - GC_m^{*\wedge})]} - \frac{p_0^\wedge}{p_0^{*\wedge}} = 0 \Rightarrow \frac{\exp[-\lambda \cdot (-\Delta GC_0^{*\wedge})]}{\sum_{m \in A} p_m^* \cdot \exp[-\lambda \cdot (-\Delta GC_m^{*\wedge})]} - \frac{p_0^\wedge}{p_0^{*\wedge}} = 0 \quad (4.33.a)$$

En conclusión, la ecuación que en el modelo particular o aplicado permite obtener el correspondiente valor del parámetro  $\lambda$  adopta la siguiente forma:

$$\frac{\exp(\lambda \cdot \Delta GC_0^{*\wedge})}{\sum_{m \in A} p_m^* \cdot \exp(\lambda \cdot \Delta GC_m^{*\wedge})} - \frac{p_0^\wedge}{p_0^{*\wedge}} = 0 ; \lambda > 0 \quad (4.33.b)$$

#### 4.4.3.2. Parámetro $\theta$

A tenor de los datos concretos que se asumen como conocidos en el enfoque teórico planteado para el cálculo del parámetro  $\theta$ , resultaría necesario obtener primeramente los volúmenes totales de viajes en el conjunto de opciones modales tanto en el año base ( $Q^*$ ) como en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda ( $Q^\wedge$ ). Dichos volúmenes se pueden calcular de manera inmediata a partir de los datos aportados mediante las siguientes expresiones:

$$Q^* = \frac{q_0^*}{s_0^*} \quad (4.34.a)$$

$$Q^\wedge = \frac{q_0^\wedge}{s_0^\wedge} \quad (4.34.b)$$

A continuación, acudiendo a la estructura general de la expresión que guía la obtención del parámetro  $\theta$  bajo dicho enfoque teórico (ecuación 4.31) y tomando en consideración el criterio adoptado para la definición del estado original y el estado modificado o alterado, puede comprobarse que, con los datos característicos del modelo desarrollado, dicha ecuación debe tomar la siguiente forma:

$$\theta = - \frac{1}{\underbrace{K_w^\wedge - K_w^*}_{-\Delta K_w^{*\wedge}}} \cdot \ln \frac{Q^\wedge}{\left(1 + \frac{J_{Q,ex}^{*\wedge}}{100}\right) \cdot Q^*} \quad (4.35)$$

$$\left(1 + J_{Q,ex}^{*\wedge} / 100\right)^{-1}$$

En relación con la ecuación 4.35, obsérvese que a partir de la definición de la variable dato  $J_{Q,ex}^{*\wedge}$  (variación porcentual, desde el año previo de referencia hasta el año base, del volumen total de viajes debido a factores exógenos a los costes de transporte) es posible definir una variable auxiliar  $J_{Q,ex}^{*\wedge}$  que tiene el mismo tipo de significado, pero en sentido inverso (es decir, porcentaje de variación, tomando como 'origen' el año base y como 'final' el año previo de referencia, del volumen total de viajes debido a factores exógenos). La relación entre estas dos variables puede deducirse en base a la aplicación, en los dos sentidos posibles, de la ecuación 4.14:

$$\left. \begin{aligned} Q^* &= Q^\wedge \cdot \left( 1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100} \right) \cdot \exp[-\theta \cdot (K_w^* - K_w^\wedge)] \\ Q^\wedge &= Q^* \cdot \left( 1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100} \right) \cdot \exp[-\theta \cdot (K_w^\wedge - K_w^*)] \\ &= Q^* \cdot \left( 1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100} \right) \cdot \exp[\theta \cdot (K_w^* - K_w^\wedge)] \end{aligned} \right\} \Rightarrow 1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100} = \frac{1}{1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100}} \quad (4.36)$$

Por otra parte, es preciso aplicar la ecuación 4.27.b para el cálculo de la variación del coste compuesto promediado o ponderado desde el estado adoptado como original (año base) hasta el estado modificado (año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros). Es decir:

$$K_w^\wedge - K_w^* = -\Delta K_w^{\wedge*} = \overbrace{(GC_0^\wedge - GC_0^*)}^{-\Delta GC_0^{\wedge*}} - \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c_m^\wedge \cdot \ln \frac{p_m^* \cdot \exp[-\lambda \cdot (GC_m^\wedge - GC_m^*)]}{\sum_{n \in A} p_n^* \cdot \exp[-\lambda \cdot (GC_n^\wedge - GC_n^*)]} - \sum_{m \in A} c_m^* \cdot \ln p_m^* - \ln \frac{\exp[-\lambda \cdot (GC_0^\wedge - GC_0^*)]}{\sum_{m \in A} p_m^* \cdot \exp[-\lambda \cdot (GC_m^\wedge - GC_m^*)]} \right) \quad (4.37.a)$$

A partir de la ecuación 4.37.a se deduce directamente que la variación  $\Delta K_w^{\wedge*}$  en el coste compuesto promediado o ponderado desde el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros hasta el año base vendría dada, con los datos característicos del modelo desarrollado, por la siguiente expresión:

$$\Delta K_w^{\wedge*} = K_w^* - K_w^\wedge = \Delta GC_0^{\wedge*} + \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \sum_{m \in A} c_m^\wedge \cdot \ln \frac{p_m^* \cdot \exp(\lambda \cdot \Delta GC_m^{\wedge*})}{\sum_{n \in A} p_n^* \cdot \exp(\lambda \cdot \Delta GC_n^{\wedge*})} - \sum_{m \in A} c_m^* \cdot \ln p_m^* - \ln \frac{\exp(\lambda \cdot \Delta GC_0^{\wedge*})}{\sum_{m \in A} p_m^* \cdot \exp(\lambda \cdot \Delta GC_m^{\wedge*})} \right) \quad (4.37.b)$$

Recapitulando, se obtiene finalmente a partir de la ecuación 4.35 que en el enfoque teórico planteado para el cálculo del parámetro  $\theta$  el valor del mismo estaría determinado por la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{1}{\Delta K_w^{\wedge*}} \cdot \ln \left[ \frac{Q^\wedge}{Q^*} \cdot \left( 1 + \frac{J_{Q,ex}^{\wedge*}}{100} \right) \right] ; \quad 0 < \theta \leq \lambda \quad (4.38)$$

No obstante, se recuerda que el planteamiento teórico que desemboca en la ecuación 4.38 no será finalmente el puesto en uso en el desarrollo del modelo aplicado, sino que por conveniencia práctica se recurrirá a un enfoque alternativo de mayor simplicidad. En el contexto del modelo aplicado, y una vez introducida la aleatoriedad de ciertas variables, la utilización del procedimiento teórico sintetizado en la ecuación 4.38 es susceptible de conducir a importantes problemas prácticos. Estos problemas se manifiestan de forma más grave cuando la variación  $\Delta K_w^{\wedge*}$  en el coste compuesto promediado o ponderado resultante de los cambios experimentados en los costes generalizados de las distintas alternativas modales presenta valores muy pequeños en valor absoluto (es decir, muy cercanos a cero). Dado que dicha variable  $\Delta K_w^{\wedge*}$  constituye el denominador de la ecuación 4.38, esos valores muy próximos a cero provocan que el procedimiento sea muy sensible a pequeñas diferencias en los datos (y por tanto muy sensible a pequeños errores en los mismos), lo cual hace que el método resulte muy inestable bajo dichas condiciones, pudiendo conducir tanto a valores resultantes de  $\theta$  mucho mayores que  $\lambda$  como a valores negativos. Esta circunstancia se produciría, por ejemplo, cuando la distribución

aleatoria obtenida para la variable  $\Delta K_w^{\wedge*}$  (a partir de los cambios en los costes generalizados de las opciones modales) presenta un valor mínimo negativo y un valor máximo positivo, lo cual implica la existencia de valores intermedios muy cercanos a cero.

Para evitar estos graves inconvenientes, se recurre a un enfoque más conservador o robusto (aunque menos sofisticado) en el que los valores estimativos del parámetro  $\theta$  serán obtenidos en cada caso como una parte fraccional (comprendida entre 0 y 1) del valor respectivo del parámetro  $\lambda$ . Estas partes fraccionales, sujetas a aleatoriedad en el desarrollo del modelo aplicado, se acomodan a una distribución estadística triangular cuyos parámetros característicos (mínimo, máximo y moda) son considerados como datos introducidos a criterio del analista. Este planteamiento simplificado garantiza en todo caso que se cumpla la restricción  $0 < \theta \leq \lambda$ .

#### 4.5. COSTE GENERALIZADO Y PARALELISMOS CON LA UTILIDAD REPRESENTATIVA O SISTEMÁTICA

Tal como se anticipó en el epígrafe 4.2.1, el coste generalizado de viaje o de transporte (Ortúzar y Willumsen, 2011: pp. 177-178) es una variable cuantitativa destinada a condensar, en una sola magnitud, los valores de los principales atributos —de distinta naturaleza y por tanto medidos en diferentes unidades— que contribuyen a conformar la desutilidad total experimentada o percibida por el viajero al desplazarse entre un punto de origen y un punto de destino mediante un determinado modo de transporte (o, en su caso, mediante una combinación de varios). Estos atributos o características del viaje han de ser ponderados mediante unos coeficientes que, por un lado, reflejen la importancia relativa de tales atributos, atendiendo a cómo esa importancia sea percibida por los viajeros, y, por otra parte, conviertan u homogeneicen las variables utilizadas para representar dichos atributos a una unidad de medida común. Dado que el coste generalizado trata de reflejar una medida de la desutilidad experimentada o percibida personalmente por el individuo, se trata de un coste de tipo predominantemente privado y de carácter notablemente subjetivo.

Supónganse dos alternativas  $i$  y  $j$  (pertenecientes en general a un conjunto más amplio de posibles opciones) que se presentan como disponibles para un individuo incluido en un determinado segmento o categoría  $h$ . Bajo la adopción de una especificación lineal en los parámetros o coeficientes (que es, con amplia diferencia, la más habitual para caracterizar el coste generalizado), una formulación genérica del coste generalizado de las alternativas  $i$  y  $j$  estaría representada por expresiones matemáticas del siguiente tipo:

$$\begin{aligned} GC_i^h &= \alpha_1^h \cdot x_{i1} + \alpha_2^h \cdot x_{i2} + \dots + \alpha_N^h \cdot x_{iN} + \delta_i^h \\ GC_j^h &= \alpha_1^h \cdot x_{j1} + \alpha_2^h \cdot x_{j2} + \dots + \alpha_N^h \cdot x_{jN} \\ GC_i^h - GC_j^h &= \alpha_1^h \cdot (x_{i1} - x_{j1}) + \alpha_2^h \cdot (x_{i2} - x_{j2}) + \dots + \alpha_N^h \cdot (x_{iN} - x_{jN}) + \delta_i^h \end{aligned} \quad (4.39)$$

donde  $x_{in}$  denota el valor numérico de la variable correspondiente al atributo  $n$ -ésimo (el orden es totalmente arbitrario) en el caso de la alternativa u opción  $i$  (análogamente con  $x_{jn}$  para la alternativa  $j$ ),  $\delta_i^h$  es una penalización modal (o 'bonus' en el caso de que su valor resultase menor que cero) asociada a la alternativa  $i$  (expresada con relación a la alternativa  $j$ , que en este caso se toma como referencia arbitraria con  $\delta_j^h=0$ ) según la percepción de los individuos del segmento o categoría  $h$ , y  $\alpha_n^h$  es el coeficiente que indica la importancia o influencia relativa de la variable o atributo  $n$ -ésimo de acuerdo a cómo dicha importancia sea apreciada por los individuos del segmento o categoría  $h$ .

El vector de atributos  $\mathbf{x}$  de cada alternativa ha de incluir generalmente, como mínimo, variables que expresen el precio o coste monetario desembolsado por el individuo para llevar a cabo su viaje (tarifa de uso del transporte público, costes de aparcamiento, peajes y consumo de combustible en el caso de vehículo privado, etc.) y variables que indiquen los tiempos empleados en las distintas etapas del viaje

(tales como el tiempo a bordo del vehículo, el tiempo caminando a/desde la parada de transporte público o bien a/desde el punto de estacionamiento de un vehículo privado, el tiempo medio de espera en parada en el caso del transporte público, etc.), ya que cada uno de estos tiempos son valorados de forma diferente por parte de los viajeros. Además, puede ser necesario añadir algunas variables o atributos adicionales, como la existencia de transbordos y su número en el caso de viajes combinados en transporte público, medidas de la fiabilidad de horarios y de la hora de llegada a destino, etc., así como incluso atributos concernientes al confort o comodidad del viaje, a la seguridad, o a las preferencias o gustos personales de los viajeros. Este último grupo de atributos, que con frecuencia son denominados como '*soft factors*', suelen incorporarse implícitamente dentro del valor atribuido a la penalización o '*bonus*' modal debido a las dificultades de su definición cuantitativa.

En base a las dos clases de variables o atributos predominantes, el coste generalizado de transporte se expresa habitualmente o bien en unidades monetarias (por ejemplo, euros generalizados) o bien en unidades de tiempo (por ejemplo, minutos generalizados), en cuyo caso conviene especificar el 'tipo' de tiempo tomado como unidad de referencia para la homogeneización (siendo este generalmente el tiempo a bordo del vehículo).

En el primero de los casos (coste generalizado en unidades monetarias, que es probablemente la forma más habitual), el parámetro o coeficiente que multiplica a la(s) variable(s) de coste monetario está fijado, por definición, a un valor unitario y adimensional (es decir,  $\alpha_M^h = 1$ , donde  $\alpha_M^h$  representa dicho coeficiente en particular y  $x_{iM}$  o  $x_{jM}$  simbolizan la correspondiente variable de coste monetario). En este caso, el parámetro o coeficiente  $\alpha_T^h$  que multiplica a una variable indicativa del tiempo consumido en unas determinadas condiciones o etapa del viaje (representada por  $x_{iT}$  o  $x_{jT}$ ) constituye directamente el valor o coste subjetivo del tiempo en dichas condiciones (por ejemplo, el valor del tiempo a bordo de un determinado tipo de vehículo).

En el caso contrario (coste generalizado expresado en unidades de tiempo), sería el respectivo coeficiente  $\alpha_T^h$  el que quedaría fijado en un valor adimensional igual a 1, mientras que el coeficiente  $\alpha_M^h$  correspondería al inverso del valor o coste del tiempo (pudiendo interpretarse el valor numérico de dicho coeficiente como la cantidad de tiempo de viaje que es necesario reducir para compensar al viajero por un aumento de una unidad monetaria en el precio o coste del viaje).

Con carácter general, las respectivas unidades de los coeficientes  $\alpha$  corresponden a la unidad de la variable adoptada para la generalización u homogeneización de costes (monetaria o temporal, según el caso) dividida entre la unidad propia del atributo o variable  $x_{in}$  (o  $x_{jn}$ , en el caso de la alternativa  $j$ ). Por su parte, la penalización modal  $\delta_i^h$  ha de cuantificarse finalmente en las mismas unidades —ya sean monetarias o de tiempo— que el propio coste generalizado.

En el caso del modelo particular desarrollado, la generalización u homogeneización de costes se efectúa a unidades monetarias.

Por otra parte, considérese una especificación del mismo tipo que la del coste generalizado (es decir, lineal en los coeficientes o parámetros) para configurar la utilidad representativa o sistemática de estas dos alternativas  $i$  y  $j$ , adoptando el enfoque característico de los modelos de elección discreta. Recuérdese que en esta clase de modelos la utilidad  $U_k^h$  realmente percibida por un individuo del segmento o categoría  $h$  ante cualquier alternativa genérica  $k$  necesita ser separada, desde el punto de vista del analista, en dos componentes, quedando definida matemáticamente de la siguiente forma:

$$U_k^h = V_k^h + \varepsilon_k^h \quad (4.40)$$

donde  $V_k^h$  denota la utilidad representativa o sistemática de la alternativa  $k$  para un individuo del segmento o categoría  $h$ , es decir, aquella parte de la utilidad percibida por el individuo que resulta medible o calculable para el analista (a través de la estimación de una función matemática que en general incorporaría atributos del nivel de servicio de la alternativa, del individuo y del viaje). Por su

parte,  $\varepsilon_k^h$  se define como la componente no observable de la utilidad (también llamada término de error) de la alternativa  $k$  para el individuo  $h$ . Esta componente, cuyo valor particular no puede ser determinado por el analista, representa los efectos de todos aquellos atributos y factores que no se han incluido en la función que define la utilidad representativa o sistemática pero que sin embargo sí afectan al comportamiento individual del viajero ante una determinada elección, así como los efectos de la propia variabilidad entre individuos y sus elecciones (existente incluso aunque estos hayan sido clasificados dentro de un mismo segmento o categoría). En consecuencia, se asume en los modelos de elección discreta una naturaleza aleatoria para esta componente  $\varepsilon_k^h$ , adoptando para la misma ciertas hipótesis y determinados tipos de distribuciones estadísticas según la clase de modelo en cuestión. En particular, una hipótesis fundamental de los modelos logit multinomial (MNL) es que los valores aleatorios de  $\varepsilon_k^h$  son independientes entre sí y están idénticamente distribuidos (abreviadamente i.i.d.).

Así pues, con una especificación análoga a la utilizada para el coste generalizado en la ecuación 4.39, la utilidad representativa o sistemática de esas dos mismas alternativas se modelizaría mediante las siguientes funciones:

$$\begin{aligned} V_i^h &= \beta_1^h \cdot x_{i1} + \beta_2^h \cdot x_{i2} + \dots + \beta_N^h \cdot x_{iN} + \gamma_i^h \\ V_j^h &= \beta_1^h \cdot x_{j1} + \beta_2^h \cdot x_{j2} + \dots + \beta_N^h \cdot x_{jN} \\ V_i^h - V_j^h &= \beta_1^h \cdot (x_{i1} - x_{j1}) + \beta_2^h \cdot (x_{i2} - x_{j2}) + \dots + \beta_N^h \cdot (x_{iN} - x_{jN}) + \gamma_i^h \end{aligned} \quad (4.41)$$

donde  $x_{in}$  y  $x_{jn}$  son las mismas variables representativas de atributos que en el caso de la ecuación 4.39,  $\beta_n^h$  son coeficientes (de valor genérico entre alternativas) que indican la contribución que el atributo o variable  $n$ -ésima aporta a la utilidad total percibida de cada alternativa por los individuos del segmento o categoría  $h$ , y  $\gamma_i^h$  representa una constante específica asociada a la alternativa  $i$  (cuantificada como diferencia con respecto a la alternativa  $j$ , que se adopta como referencia arbitraria con  $\gamma_j^h=0$ ) por parte de los individuos del segmento o categoría  $h$ . Estas constantes específicas suelen utilizarse para incorporar al modelo las diferencias de utilidad entre distintas alternativas debidas a aquellas características o atributos —ya sean de la alternativa o del individuo— que no se encuentran explícitamente incluidas entre las variables  $\mathbf{x}$  (generalmente por la dificultad de definir las cuantitativamente o de medirlas u observarlas).

Debido a la adimensionalidad del concepto de utilidad, los distintos coeficientes  $\beta_n^h$  presentan unidades inversas a aquella en la que se mida la correspondiente variable  $x_{in}$  o  $x_{jn}$  (aunque en la práctica se suele prescindir de indicar expresamente dichas unidades por mera simplicidad y por considerarlas sobreentendidas), mientras que el valor de la constante específica de alternativa  $\gamma_i^h$  es también adimensional (en concordancia con la propia utilidad).

Es preciso hacer notar que tanto estos coeficientes  $\beta_n^h$  como la constante específica  $\gamma_i^h$  incorporan implícitamente un factor de escala  $\kappa$ , puesto que el modelo de utilidad aleatoria  $U_k^h = V_k^h + \varepsilon_k^h$  es en realidad equivalente a cualquier otro de la forma  $U_k^h = \kappa \cdot V_k^h + \kappa \cdot \varepsilon_k^h$  con la única condición de que  $\kappa$  sea mayor que cero ( $\kappa > 0$ ). En consecuencia, este factor de escala es de valor indistinguible o inidentificable con respecto a los propios parámetros, pero aun así conviene tener en cuenta, de cara a la interpretación de los modelos, que conceptualmente está inversamente relacionado con la varianza de la componente no observable o término de error  $\varepsilon_k^h$ . Atendiendo a la existencia implícita de dicho factor de escala, se puede definir alternativamente  $\beta_n^h$  como  $\beta_n^h = \kappa \cdot \beta_n^{\circ h}$  y  $\gamma_i^h$  como  $\gamma_i^h = \kappa \cdot \gamma_i^{\circ h}$ , donde tanto  $\kappa$  y  $\beta_n^{\circ h}$  como  $\kappa$  y  $\gamma_i^{\circ h}$  son inidentificables o indistinguibles entre sí, es decir, en la práctica es posible solamente estimar el valor de su producto, pero no cada valor por separado.

De hecho, la escala de la utilidad está ligada por definición a la varianza de los términos de error (Train, 2009: p. 23), aunque en la práctica es necesario —debido al problema de inidentificabilidad— fijar arbitrariamente (normalizar) el valor del factor de escala (generalmente haciendo  $\kappa=1$  en el caso de los

modelos de tipo logit multinomial). En esta clase de modelos, además de la hipótesis de términos de error independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.), se asume como principio básico que dichos términos  $\varepsilon_k^h$  se distribuyen aleatoriamente según una distribución de tipo Gumbel (también llamada distribución de Valor Extremo Generalizado de tipo I). La varianza de esta clase de distribución es igual a  $\pi^2/(6 \cdot \kappa^2)$ , donde  $\kappa$  es precisamente el parámetro de escala de la distribución. Se tendría por tanto en el caso de estos modelos:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \text{Var}(\varepsilon_k^h) = \frac{\pi^2}{6 \cdot \kappa^2} \Rightarrow \kappa = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \quad (4.42.a)$$

Obsérvese que fijar  $\kappa=1$  es equivalente a escalar la varianza del término de error de tal forma que dicha varianza quede arbitrariamente establecida en  $\pi^2/6$ , que es precisamente la varianza de la distribución Gumbel estándar. Si a continuación se denomina  $\tilde{\sigma}_\varepsilon^2$  al ratio entre la hipotética varianza no normalizada del término de error (cualquiera que esta sea) y la varianza de la distribución Gumbel estándar, de modo que la primera pudiese ser expresada como  $\tilde{\sigma}_\varepsilon^2$  veces la segunda, es posible concluir que el factor de escala que implícitamente afecta a los parámetros de la función lineal de utilidad representativa o sistemática es inversamente proporcional a  $\tilde{\sigma}_\varepsilon$  (es decir, inversamente proporcional al ratio o cociente entre las respectivas desviaciones típicas). En resumen:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_\varepsilon^2 &= \frac{\text{Var}(\varepsilon_k^h)}{\pi^2/6} \Rightarrow \tilde{\sigma}_\varepsilon = \frac{\sigma_\varepsilon}{\pi/\sqrt{6}} \\ \kappa &= \frac{\pi/\sqrt{6}}{\sigma_\varepsilon} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \kappa = \frac{1}{\tilde{\sigma}_\varepsilon} \quad (4.42.b)$$

En conclusión, los coeficientes  $\beta_n^h$ , así como la constante específica  $\gamma_i^h$ , pueden ser conceptualmente reformulados mediante el siguiente tipo de expresiones:

$$\beta_n^h = \kappa \cdot \beta_n^{\circ h} = \frac{\beta_n^{\circ h}}{\tilde{\sigma}_\varepsilon} \quad (4.43.a)$$

$$\gamma_i^h = \kappa \cdot \gamma_i^{\circ h} = \frac{\gamma_i^{\circ h}}{\tilde{\sigma}_\varepsilon} \quad (4.43.b)$$

En las igualdades de las ecuaciones 4.43.a y 4.43.b se pone de manifiesto que el valor absoluto de los coeficientes estimados  $\beta_n^h$  y de la constante específica  $\gamma_i^h$  (es decir, cuán alejados están de 0) resulta inversamente proporcional a la desviación típica del término de error o componente no observable de la utilidad  $\varepsilon_k^h$ . De hecho, los coeficientes y constantes estimados ‘midan’ el efecto de cada una de las variables o atributos que componen la utilidad representativa o sistemática en una escala de unidades relativa a la importancia que los factores no observados adquieren en el comportamiento decisional de los individuos. Cuando la capacidad explicativa de la utilidad representativa o sistemática para reproducir dicho comportamiento es notablemente elevada, la componente aleatoria  $\varepsilon_k^h$  pierde peso relativo (el tamaño de su varianza se reduce) y, consecuentemente, la magnitud o valor absoluto de los coeficientes y constantes específicas resulta mayor. Inversamente, si la capacidad explicativa de la utilidad representativa o sistemática para reproducir fielmente las elecciones tomadas es relativamente baja, es necesario que la componente aleatoria  $\varepsilon_k^h$  reciba un mayor peso relativo (el tamaño de su varianza aumenta) y la magnitud o valor absoluto del conjunto de parámetros se reduce<sup>75</sup>.

<sup>75</sup> Una interpretación bastante similar de la relación entre la magnitud de los parámetros  $\beta$  (es decir, la escala de la utilidad en último término) y el grado de aleatoriedad en el comportamiento decisional de los individuos también puede encontrarse en Small y Verhoef (2007: p. 23), donde además se apuntan someramente ciertos paralelismos entre la



Para una comprensión más profunda de las cuestiones relativas a la escala de la utilidad y al rol del factor de escala en los modelos de tipo logit resulta recomendable la lectura de las respectivas secciones en el clásico texto de Kenneth Train sobre modelos de elección discreta (Train, 2009: pp. 23-29, 40-42).

Ya sea bajo la óptica del coste generalizado de viaje o de la utilidad representativa o sistemática, los distintos coeficientes  $\alpha_n^h$  y  $\beta_n^h$  (o en general cualquier  $\beta_n^{\circ h}$ ) también están dando muestra del valor o importancia relativa de cada una de las variables o atributos con respecto a cualquiera de las demás, siempre desde el punto de vista subjetivo de los individuos del segmento o categoría  $h$ . En concreto, los ratios o tasas marginales de sustitución<sup>76</sup> entre cada par de atributos han de ser los mismos independientemente de que aquellos se planteen en términos de utilidad (coeficientes  $\beta_n^h$  o  $\beta_n^{\circ h}$ ) o en términos de coste generalizado (coeficientes  $\alpha_n^h$ ), al menos dentro de un marco de trabajo puramente teórico. En la práctica, y dadas las especificaciones lineales mostradas en las ecuaciones 4.39 y 4.41, esto se traduce en el cumplimiento de las siguientes igualdades entre cocientes de parámetros (partiendo del caso de la alternativa  $i$ , aunque el mismo planteamiento puede aplicarse a cualquier otra):

$$\frac{\partial U_i^h / \partial x_{ik}}{\partial U_i^h / \partial x_{il}} = \frac{\partial V_i^h / \partial x_{ik}}{\partial V_i^h / \partial x_{il}} = \frac{\partial GC_i^h / \partial x_{ik}}{\partial GC_i^h / \partial x_{il}} \quad \forall k, l = 1, 2, \dots, N \Rightarrow \frac{\beta_k^h}{\beta_l^h} = \frac{\beta_k^{\circ h}}{\beta_l^{\circ h}} = \frac{\alpha_k^h}{\alpha_l^h} \quad \forall k, l = 1, 2, \dots, N \quad (4.44.a)$$

Similarmente, entre la especificación del coste generalizado de transporte y la función análoga de utilidad representativa o sistemática ha de conservarse una misma razón de proporcionalidad entre la penalización o 'bonus' modal de una alternativa  $i$  (constante específica de la alternativa en el caso de los modelos de utilidad aleatoria) y los coeficientes que valoran la importancia o influencia relativa de cada una de las variables incluidas en  $\mathbf{x}$  ( $\alpha_n^h$  en el caso del coste generalizado;  $\beta_n^h$  en la utilidad representativa o sistemática). Es decir, en un marco teórico debe cumplirse también la siguiente igualdad entre cocientes:

$$\frac{\gamma_i^h}{\beta_n^h} = \frac{\delta_i^h}{\alpha_n^h} \quad \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (4.44.b)$$

Si a continuación se pretendiese 'normalizar' arbitrariamente el valor del coeficiente que multiplica a las variables de precio o coste monetario  $x_{iM}$  y  $x_{jM}$  en las funciones de utilidad representadas en la ecuación 4.41 (de modo que se obtenga para dicho coeficiente un valor 1 al igual que en el caso del coste generalizado expresado en unidades monetarias, donde  $\alpha_M^h = 1$ ), deberían dividirse los dos lados de las igualdades contenidas en la ecuación 4.41 entre el coeficiente  $\beta_M^h$ . De esta forma se obtendría, para el caso de la diferencia de utilidad entre las dos alternativas  $i$  y  $j$ , la siguiente expresión:

$$\frac{V_i^h - V_j^h}{\beta_M^h} = \frac{\beta_1^h}{\beta_M^h} \cdot (x_{i1} - x_{j1}) + \frac{\beta_2^h}{\beta_M^h} \cdot (x_{i2} - x_{j2}) + \dots + \frac{\beta_M^h}{\beta_M^h} \cdot (x_{iM} - x_{jM}) + \dots + \frac{\beta_N^h}{\beta_M^h} \cdot (x_{iN} - x_{jN}) + \frac{\gamma_i^h}{\beta_M^h} \quad (4.45.a)$$

En base a la igualdad entre cocientes de parámetros puesta de manifiesto en las ecuaciones 4.44.a y 4.44.b, la expresión anterior puede ser reformulada del siguiente modo:

---

aleatoriedad en el comportamiento individual o desagregado y la entropía (o 'apetencia' por la variedad) en el análisis agregado.

<sup>76</sup> En este contexto, el ratio o tasa marginal de sustitución entre dos atributos de nivel de servicio puede definirse como el número de unidades de un atributo que es necesario reducir/aumentar para compensar plenamente al viajero por un aumento/reducción unitario en el otro atributo, de forma que se mantenga invariable el nivel de utilidad (o, en su caso, de coste generalizado). Indica por tanto la tasa de intercambio entre esos dos atributos que no altera la utilidad del viajero. Puede interpretarse también como la valoración subjetiva de un determinado atributo expresada en términos de un segundo atributo. En general el concepto de ratio o tasa marginal de sustitución se aplica más comúnmente al consumo de bienes, pero es extensible también a la valoración de los atributos o características de un bien o servicio (en este caso, de una alternativa de viaje).

$$\frac{V_i^h - V_j^h}{\beta_M^h} = \frac{\alpha_1^h}{\alpha_M^h} \cdot (x_{i1} - x_{j1}) + \frac{\alpha_2^h}{\alpha_M^h} \cdot (x_{i2} - x_{j2}) + \dots + 1 \cdot (x_{iM} - x_{jM}) + \dots + \frac{\alpha_N^h}{\alpha_M^h} \cdot (x_{iN} - x_{jN}) + \frac{\delta_i^h}{\alpha_M^h} \quad (4.45.b)$$

Dado que en la formulación general del coste generalizado expresado en unidades monetarias el coeficiente  $\alpha_M^h$  es por definición igual a 1, se obtiene:

$$\frac{V_i^h - V_j^h}{\beta_M^h} = \alpha_1^h \cdot (x_{i1} - x_{j1}) + \alpha_2^h \cdot (x_{i2} - x_{j2}) + \dots + 1 \cdot (x_{iM} - x_{jM}) + \dots + \alpha_N^h \cdot (x_{iN} - x_{jN}) + \delta_i^h \quad (4.45.c)$$

Comparando los términos situados en la parte derecha de la ecuación 4.45.c con la especificación del coste generalizado expresado en unidades monetarias (ecuación 4.39 con  $\alpha_M^h = 1$ ), puede observarse que es posible identificar una relación de proporcionalidad entre la diferencia de utilidad representativa o sistemática de dos alternativas cualesquiera y su diferencia de coste generalizado si las especificaciones funcionales de ambos conceptos son consistentes entre sí. Así pues, la relación entre ambas magnitudes vendría dada por:

$$\frac{V_i^h - V_j^h}{\beta_M^h} = GC_i^h - GC_j^h \Rightarrow V_i^h - V_j^h = \beta_M^h \cdot (GC_i^h - GC_j^h) \quad (4.46)$$

Recuérdese al respecto que el coeficiente  $\beta_M^h$  es aquel que en la especificación de la función de utilidad representativa o sistemática multiplica a la variable que indica el precio o coste puramente monetario del viaje ( $x_{iM}$  o  $x_{jM}$ ). De acuerdo a un comportamiento económico racional del individuo, su valor debe ser siempre menor que cero ( $\beta_M^h < 0$ ).

Por consiguiente, el coeficiente  $\beta_M^h$  cambiado de signo (es decir,  $-\beta_M^h$ , tal que  $-\beta_M^h > 0$ ) representa en una función del tipo de las mostradas en la ecuación 4.41 la utilidad marginal de evitar el gasto de una unidad monetaria (o, en otras palabras, la utilidad marginal de reducir el precio o coste monetario del viaje). Bajo condiciones de linealidad de la utilidad con respecto a pequeñas variaciones en el ingreso o en el gasto, la utilidad marginal de reducir el coste monetario puede considerarse plenamente equivalente a la utilidad marginal del ingreso (*MUI, Marginal Utility of Income*). Así pues, representando como  $c$  el precio o coste monetario del viaje (es decir, la variable que anteriormente se simbolizaba como  $x_{iM}$  o  $x_{jM}$ ), denotando como  $I$  el ingreso, y prescindiendo por simplicidad de los índices relativos a la alternativa y al tipo de individuo, se puede sintetizar esta idea en las siguientes equivalencias<sup>77</sup>:

$$\beta_M = \frac{\partial V}{\partial c} \Rightarrow -\beta_M = -\frac{\partial V}{\partial c} = \frac{\partial V}{\partial I} \Rightarrow -\beta_M = MUI \quad (4.47)$$

Por otra parte, en base a la equifinalidad entre las cuotas de reparto modal de un modelo sintético como el representado inicialmente en la ecuación 4.1, formuladas en términos de coste generalizado, y las probabilidades de elección de alternativas en un modelo de elección discreta de tipo logit multinomial (MNL), formuladas en términos de utilidad, puede plantearse la siguiente equivalencia:

$$\left[ p_m^h \right]_{\text{Sint.}} = \left[ p_m^h \right]_{\text{MNL}} \Leftrightarrow \frac{\exp[-\lambda_h \cdot (GC_m - GC_k)]}{\sum_{n \in S_h} \exp[-\lambda_h \cdot (GC_n - GC_k)]} = \frac{\exp(V_m^h - V_k^h)}{\sum_{n \in S_h} \exp(V_n^h - V_k^h)} \quad \forall m, k \in S_h \quad (4.48.a)$$

Nótese que la parte derecha de la ecuación 4.48.a está formulada utilizando expresamente el principio de “solo las diferencias de utilidad importan” (véase en Train (2009: pp. 19-23)), el cual es transferible también al caso del coste generalizado.

<sup>77</sup> Pueden encontrarse expresiones de similares significados por ejemplo en Gálvez y Jara-Díaz (1998) y en Ortúzar y Román (2003).

Así pues, continuando con las equivalencias mostradas en la ecuación 4.48.a puede derivarse la siguiente condición:

$$\left[ p_m^h \right]_{\text{Sint.}} = \left[ p_m^h \right]_{\text{MNL}} \Leftrightarrow V_m^h - V_k^h = -\lambda_h \cdot (GC_m - GC_k) \quad \forall m, k \in S_h \quad (4.48.b)$$

Finalmente, comparando las ecuaciones 4.46 y 4.48.b puede plantearse la equivalencia funcional entre el parámetro  $\lambda_h$  y el coeficiente  $\beta_M^h$  cambiado de signo, el cual es indicativo –tal como se mostró en la ecuación 4.47– de la utilidad marginal del ingreso para los individuos del segmento o categoría  $h$ . No obstante, no debe olvidarse que el valor estimado del coeficiente  $\beta_M^h$  es inversamente proporcional a la desviación típica del término de error o componente no observable de la utilidad (véase ecuación 4.43.a), ya que dicha medida de variabilidad o dispersión condiciona la escala en la que se cuantifica la utilidad. En síntesis:

$$\lambda_h = -\beta_M^h = -\frac{\beta_M^{\circ h}}{\tilde{\sigma}_\varepsilon} \quad (4.49)$$

En conclusión, las interpretaciones del parámetro  $\lambda_h$  como utilidad marginal del ingreso, expresado este último en una determinada unidad monetaria, y como parámetro inverso a la dispersión o variabilidad, son, además de compatibles, complementarias entre sí. De hecho, ambas facetas, interrelacionadas e inseparables en la práctica, se fusionan en un único valor.



## 5. Definición de los datos o variables de entrada del modelo

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta, de forma estructurada, el conjunto de datos o variables de entrada que son requeridos por el modelo desarrollado en la tesis como *'inputs'* necesarios para su ejecución, dando inicio a la serie de capítulos (5, 6, 7 y 8) en los que se especifica detalladamente el funcionamiento particularizado de dicho modelo.

Una primera cuestión a resaltar con respecto a la especificación de las variables de entrada del modelo es la relativa al tratamiento del nivel de incertidumbre previsiblemente asociado a cada tipo de dato. Atendiendo a este previsible nivel de incertidumbre, los tipos de datos incorporados al modelo podrían ser clasificados, a efectos prácticos, entre aquellos para los que se propone la definición de un único valor o valor fijo (al entenderse que habitualmente pueden ser conocidos con un nivel adecuado de precisión y certidumbre) y aquellos otros para los que se considera que en general podrían estar sometidos en la práctica a un notable nivel de incertidumbre y que por tanto es más apropiado tratarlos desde un principio como una variable aleatoria. Para este segundo tipo de datos es necesario especificar los parámetros estadísticos de su distribución de probabilidad. Al haberse planteado en el modelo distribuciones triangulares, estos parámetros estadísticos serán los valores del mínimo, del máximo y de la moda.

Por otra parte, ha de considerarse que la especificación de gran parte de los datos de entrada debe permitir la posibilidad de definir —según sea el caso— distintos valores particulares por cada corredor, eje o itinerario (línea en el caso del transporte público), por cada período horario, por cada sentido de viaje, por cada opción modal de transporte, etc. En cambio, en algunos casos puntuales podrá considerarse —dependiendo de la naturaleza y significado del dato en cuestión— que es suficiente un solo valor aplicable con generalidad a todo el ámbito de estudio del modelo.

Desde el punto de vista de su contenido, los datos o variables de entrada del modelo se van a presentar en el capítulo agrupados en distintas áreas temáticas, según se relacionen con la configuración de las líneas de transporte público, con los vehículos o unidades de transporte, con la operación y explotación del servicio, con el rendimiento operativo de los modos de transporte público, con la utilización o demanda actual de las líneas, con los horizontes temporales y la división en fases o etapas, con la caracterización de la movilidad y del reparto modal, con las condiciones de circulación de los vehículos motorizados en el tráfico mixto, con las características de los viajes realizados en vehículo motorizado privado, con los costes unitarios relativos al tiempo de viaje, con los costes unitarios relacionados con el consumo de energía en vehículos particulares, con los posibles cambios en otros costes modales, con la obtención de parámetros del modelo de demanda, o con la ejecución numérica del modelo. Para cada una de las variables de entrada incluidas en estas áreas se definirá y describirá el dato al que hacen referencia y, siempre que sea factible, se procurará aportar valores orientativos o aproximados que, en ausencia de información particular más precisa, pudiesen ser considerados de uso común o genérico.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

### 5.2.1. Número de líneas a analizar

La variable  $NL$  se define como la cardinalidad (número de elementos) del subconjunto de líneas de la actual red de transporte público urbano y/o metropolitano (operada mediante autobús convencional en tráfico mixto) que van a ser analizadas o estudiadas conjuntamente, al objeto de evaluar la conveniencia de su posible transformación a líneas de metro ligero o tranvía o de BHLS/BRT.

Cada una de estas líneas se codifica, a nivel interno del modelo desarrollado, con un número natural entre 1 y  $NL$ , independientemente de su denominación comercial dentro de la red.

### 5.2.2. Tipología de las líneas

La variable  $TypL_i$  indica el tipo de línea de transporte público en el que se encuadra la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ) según su configuración espacial y esquema de operación. En este sentido, se distinguen las tres siguientes clases principales de líneas:

- *Línea convencional o longitudinal de doble sentido.* Se trata de aquellas líneas cuyos extremos (terminales o cabeceras) están situados en dos puntos distantes en el espacio, unidos mediante un trayecto que es recorrido sucesivamente en los sentidos de ida y vuelta, utilizándose generalmente los mismos viales de circulación o corredores en ambos sentidos (si bien puede haber pequeñas variantes de recorrido en algunos tramos de la ruta). Desde el punto de vista de la infraestructura necesaria para la posible implantación de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada, se asume por defecto la dotación de vía doble (una por sentido) en el caso de metro ligero o tranvía, y de doble carril o vial (también uno por sentido) en el caso de implantación de BHLS o BRT<sup>78</sup>. Para designar abreviadamente este tipo de línea, se utilizará la codificación  $TypL_i = LT$  (*Longitudinal, Two directions*).
- *Línea circular de doble sentido.* En las líneas de tipo circular, su trazado discurre por diferentes puntos del territorio hasta llegar de nuevo hasta la terminal de inicio, que se convierte así en terminal de cierre, formando con ello una figura cerrada que, a modo de circuito, puede ser recorrida en sentido horario o antihorario. Suele tratarse de líneas perimetrales o periféricas. En el caso particular de las líneas circulares de doble sentido, se produce simultáneamente la prestación de servicio en ambos sentidos, con circulación de unos vehículos o unidades de transporte en sentido horario y otros en sentido antihorario. Para ello, se asume en el caso de la eventual implantación de los nuevos modos en plataforma reservada que estas líneas estarán dotadas de vía doble (para metro ligero o tranvía) o de doble carril o vial (para BHLS o BRT). Las líneas de este tipo se designarán abreviadamente mediante la codificación  $TypL_i = RT$  (*Ring, Two directions*).
- *Línea circular de sentido único.* Su configuración espacial es la propia de una línea circular, pero la operación o prestación de servicio se lleva a cabo en solo uno de los dos sentidos teóricamente posibles, ya sea el horario o el antihorario. Por tanto, no se produce el cruce entre vehículos o unidades de transporte circulando en sentidos opuestos, con lo que para los nuevos modos en plataforma reservada resultaría suficiente la dotación de vía única (en el caso de metro ligero o tranvía) o bien de carril o vial único (para BHLS o BRT). A efectos de notación abreviada, se empleará para este tipo de líneas la codificación  $TypL_i = RO$  (*Ring, One direction*).

<sup>78</sup> Sin embargo, ha de reconocerse que en algunas implantaciones reales, tanto en uno como en otro caso, puede llegar a ser necesario recurrir a pequeños tramos de vía o carril único en ciertas secciones singulares en las que la anchura disponible del viario público sea especialmente restrictiva. No obstante, las posibles limitaciones operativas derivadas de esta circunstancia, por la complejidad adicional de su sistematización, no se han recogido explícitamente en la modelización de las operaciones de estos modos de transporte público.

### 5.2.3. Longitud de las líneas

La variable  $L_i$  corresponde a la longitud de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), expresada en kilómetros [km]. La longitud de una línea es aquella que se recorre en un viaje en un solo sentido entre las dos terminales extremas de su trazado, o alternativamente para las líneas de configuración circular, la distancia que se recorre entre dos pasos consecutivos por la terminal de cierre. Esto implica que la longitud de ciclo coincide directamente con la longitud de la línea en el caso de líneas circulares, mientras que es igual al doble de  $L_i$  para líneas convencionales (longitudinales de doble sentido).

### 5.2.4. Número de paradas o estaciones en cada línea

La variable  $Nst_i$  representa el número de paradas o estaciones existentes en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), incluyendo terminales y/o cabeceras. No obstante, téngase presente que en líneas de configuración circular ( $TypL_i = RT$  o  $TypL_i = RO$ ), la terminal de cierre (inicio/final de línea) se contabiliza una única vez.

### 5.2.5. Localización (coordenada longitudinal) de las paradas o estaciones a lo largo de cada línea

Se define la variable  $s_{in}$  como la posición longitudinal, medida desde el origen de la línea, de la parada o estación  $n$  en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ). Dicha posición longitudinal se expresa en kilómetros [km].

No se incluye en ningún caso, por innecesario, el dato que correspondería a la terminal de inicio u origen de línea (terminal de cierre en el caso de líneas circulares), ya que su coordenada longitudinal será siempre 0, ni tampoco, en el caso de líneas convencionales o longitudinales, el dato de la terminal de final de línea, puesto que dicha coordenada longitudinal ha de coincidir con la longitud de la línea ( $L_i$ ).

De este modo, el número de valores a definir para cada tipo de línea es:

- Si  $TypL_i = LT$  (líneas convencionales o longitudinales):  $n = 1, 2, \dots, Nst_i - 2$  (donde  $n=1$  corresponde a la primera parada o estación tras la terminal de origen y  $n=Nst_i - 2$  a la última antes de la terminal opuesta).
- Si  $TypL_i = RT \vee TypL_i = RO$  (líneas de configuración circular):  $n = 1, 2, \dots, Nst_i - 1$  ( $n=1$  corresponde a la primera parada o estación tras la terminal de cierre y  $n=Nst_i - 1$  a la última antes de la acceder de nuevo a la terminal de cierre).

En uno u otro caso, el sentido de circulación tomado como referencia para la codificación numérica de las paradas puede ser arbitrario<sup>79</sup>, pero necesariamente ha de ser consistente con el que se utilice posteriormente para definir la máxima velocidad programada u objetivo para cada segmento o tramo entre paradas o estaciones (variable de entrada  $Vg_{ink}^m$ , aplicable a los nuevos modos de transporte público de posible implantación, con operación en plataforma reservada y priorización semafórica).

### 5.2.6. Proporción de paradas entrantes o en bahía (en autobús convencional en tráfico mixto)

La variable  $ols_{ik}$  indica la fracción o proporción de paradas o estaciones (del modo de transporte público inicialmente existente, es decir, autobús convencional en tráfico mixto) que son de tipo entrante o en bahía en el caso de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), cuando esta es recorrida en el sentido  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Se trata de una variable adimensional que es expresada numéricamente en el modelo en forma de proporción decimal (no en formato porcentual).

<sup>79</sup> No obstante, en el caso particular de líneas circulares de sentido único resulta mucho más coherente que se haga coincidir con el sentido en el que realmente se opera la línea.

En función de su posición con respecto a los carriles de circulación, se consideran paradas de autobús entrantes o en bahía aquellas en las que el vehículo de transporte público ha de abandonar temporalmente dichos carriles de circulación general para posicionarse en un espacio reservado al borde de la calzada donde dar servicio a la entrada y salida de pasajeros. Este concepto coincide con el de ‘*off-line stop*’, definido por el ‘*Transit Capacity and Quality of Service Manual*’ de EE.UU. (TCRP, 2013: pp. 6.9, 3.38). En este tipo de paradas de autobús, la circulación de los vehículos que componen el tráfico mixto no se ve afectada por la permanencia del autobús en la parada. En cambio, la reincorporación a la circulación de los propios autobuses sí que está condicionada por el tráfico de vehículos en el carril de circulación contiguo a la parada (es decir, el ubicado más a la derecha según el sentido de avance). La espera del autobús por un espacio libre entre el flujo de vehículos que permita realizar la maniobra en condiciones de seguridad da lugar al concepto de demora de reincorporación o ‘*reentry delay*’ (TCRP, 2013: pp. 6.71-6.72).

Por el contrario, se definen como paradas ‘en línea’ (*on-line stops*) aquellas en las que la detención del autobús para la subida y bajada de pasajeros se realiza directamente sobre uno de los carriles de circulación general (aquel contiguo al emplazamiento de la parada<sup>80</sup>). Esta clase de parada supone una ventaja para la operación del transporte público, al eliminar cualquier tipo de demora de reincorporación, pero obliga a los usuarios del resto de vehículos que circulen por el mismo carril a permanecer detenidos detrás del autobús hasta que este reemprenda la marcha o bien a cambiarse al carril adyacente si ello es posible.

Nótese que la variable  $ols_{ik}$ , que va a ser empleada por el modelo para el cálculo de la demora de reincorporación acumulada a lo largo de las paradas de un trayecto completo entre terminales, solo es de aplicación al sistema de autobús convencional en tráfico mixto, ya que es el único de los tres sistemas analizados que se vería afectado por dicho fenómeno.

Por otra parte, en el cálculo del valor numérico de esta variable como ratio entre el número de paradas o estaciones de tipo entrante o en bahía y el número total de paradas, debe tenerse en cuenta que en el caso de líneas longitudinales de doble sentido se excluye de dichos cálculos, para un determinado sentido, la cabecera o terminal situada al final del recorrido, ya que la reincorporación a la circulación desde dicha parada o estación corresponde ya al viaje a realizar en el sentido opuesto.

### 5.3. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LOS VEHÍCULOS O UNIDADES DE TRANSPORTE PÚBLICO

En relación con la clase de vehículos o unidades de transporte planteada para cada modo de transporte público, debe comenzarse aclarando que la modelización desarrollada permite definir varios tipos diferentes de vehículos o unidades para cada uno de los modos (autobús convencional, metro ligero o tranvía y BHLS o BRT), pero con la restricción en el modelo de que, dentro de un determinado modo, a cada línea solo es posible asignarle la operación de un único subtipo de vehículo (es decir, no sería posible incorporar, por ejemplo, autobuses rígidos y autobuses articulados operando sobre una misma línea, pero sí en líneas diferentes).

Al respecto, se utilizará la variable  $Nvt^m$  para representar el número de tipos o clases diferentes de vehículos o unidades de transporte que se definen para el modo  $m$  de transporte público (por tanto, con  $m \in \{0, R, B\}$ ) al efecto de su asignación a distintas líneas.

<sup>80</sup> Por tanto, en el lado derecho de la calzada cuando se trata de sistemas sin plataforma reservada, como es el caso del autobús convencional en tráfico mixto al que se refiere este epígrafe.



### 5.3.1. Capacidad estática de las unidades de transporte, dada una densidad de pasajeros de pie de referencia

A efectos de la formulación desarrollada, se define la capacidad de las unidades de transporte (o de un vehículo, en el caso de que ambos conceptos sean coincidentes) como el número de plazas de asiento del que disponen más el número de personas que pueden ocupar los espacios destinados a albergar pasajeros de pie hasta alcanzar una determinada densidad, la cual, por tanto, se adopta como referencia para determinar dicha capacidad. Esta densidad de pasajeros de pie de referencia se representará mediante la variable  $Dref$  (en personas por metro cuadrado), siendo relativamente habitual que se tome un estándar de 4 prs/m<sup>2</sup>, relacionado con las condiciones mínimas de confort. No obstante, también es bastante frecuente que los datos de capacidad de unidades de transporte o vehículos facilitados por los propios fabricantes estén calculados para densidades superiores, tales como 6 prs/m<sup>2</sup> u 8 prs/m<sup>2</sup> (esta última cifra es particularmente habitual en el caso de autobuses urbanos<sup>81</sup>).

Así pues, la variable  $CAPu_n^m$  indica, para cada modo  $m$  de transporte público (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ), la capacidad de las unidades de transporte o vehículos de su subtipo  $n$  (con  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$ ), dada una densidad de pasajeros de pie igual a  $Dref$ . Se trata de una capacidad unitaria de tipo estático.

En relación con los valores típicos de esta variable, en la Tabla 5.1 se presentan rangos aproximados de la capacidad (con 4 y 6 prs/m<sup>2</sup>) de los vehículos de ambos grupos generales (autobuses o, en su caso, trolebuses, y tranvías o vehículos de metro ligero), para distintas longitudes habituales de los mismos. En dicha tabla se incluyen también intervalos usuales del número de plazas de asiento en cada tipo de vehículo. Los valores contenidos en esta tabla han sido configurados en base a datos extraídos de documentación técnica sobre vehículos de varios fabricantes y modelos (Mercedes-Benz/EvoBus, 2015; Van Hool, n.d.; Van Hool, 2013; Alstom, 2012; Alstom, 2014; Alstom, 2016; Bombardier Transportation, 2006). No obstante, la variedad de modelos y las posibilidades de configuración de los mismos son muy amplias, por lo que no puede descartarse que en el mercado existan vehículos cuya capacidad o número de asientos se sitúe fuera de los rangos orientativos indicados.

**Tabla 5.1.** Rangos aproximados de capacidad y número de asientos para autobuses o trolebuses y tranvías o vehículos de metro ligero de diferentes longitudes típicas.

Tipo de vehículo	Longitud aproximada	Nº de asientos	Capacidad total (sentados + de pie)	
			4 prs/m <sup>2</sup>	6 prs/m <sup>2</sup>
Autobuses y trolebuses	12 m (rígido)	26-34	64-68	82-86
	18 m (articulado)	35-46	98-115	126-155
	24-28 m (biartic.)	42-70	120-150	160-200
Tranvías y vehículos de metro ligero (LRVs)	22-24 m	27-41	120-142	162-195
	32-37 m	42-70	200-238	275-330
	43-45 m	57-82	271-319	379-437

### 5.3.2. Número de plazas de asiento en las unidades de transporte

Paralelamente a la determinación de la capacidad estática, la variable  $Nse_n^m$  especifica, para cada modo  $m$  de transporte público (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ), el número de plazas de asiento con el que están equipadas las unidades de transporte o vehículos de su subtipo  $n$  (con  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$ ).

<sup>81</sup> Para los autobuses de Clase I (aquellos con áreas para viajeros de pie y diseñados para el frecuente movimiento de pasajeros) la capacidad máxima se establece, normativamente, para un espacio ocupado de 0.125 m<sup>2</sup>/prs (es decir, una densidad de 8 prs/m<sup>2</sup>). Esta cifra se aplica a efectos de calcular la masa máxima permisible del vehículo y la carga máxima por eje o grupo de ejes (UNECE, 2011: Anexo 11), pero su aplicación en la operación real conduciría a unas condiciones de confort consideradas inaceptables por la mayoría de viajeros.

En la Tabla 5.1 (incluida en el epígrafe anterior) se glosan los rangos habituales del número de plazas de asiento para vehículos de distintas longitudes típicas, tanto de autobús o trolebús como de tranvías o vehículos de metro ligero.

### 5.3.3. Número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) en las unidades de transporte

La variable  $Ndc_n^m$  indica, para cada modo  $m$  de transporte público (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ), el número más limitante de canales de paso (*door channels*), ya sean de entrada o de salida, existente en las unidades de transporte o vehículos de su subtipo  $n$  (con  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$ ).

En este sentido, se define cada canal de paso como aquella apertura practicable en el lateral de los vehículos que permite el flujo simultáneo de una única fila o hilera de pasajeros, ya sea en sentido de entrada o de salida del vehículo. Así pues, materialmente puede asimilarse este concepto a cada puerta individual (de tal forma que una puerta doble se contabilizaría como dos canales, pudiendo ser ambos de entrada, ambos de salida, o uno de entrada y el otro de salida). Ahora bien, la variable  $Ndc_n^m$  debe indicar la cuantía más restrictiva o limitante entre el número de canales de entrada y el número de canales de salida de una unidad de transporte. Al respecto, se considera que el proceso más limitante entre el de entrada y el de salida es aquel que, dado un mismo volumen de usuarios accediendo y apeándose del vehículo y establecido un determinado reparto entre canales de entrada y de salida, consume un mayor tiempo<sup>82</sup>. El número de canales de paso dedicados a ese proceso constituirá por tanto el valor de la variable  $Ndc_n^m$ .

Nótese que este número de canales de paso se empleará únicamente a efectos de obtener una estimación del tiempo de servicio a pasajeros (uno de los principales componentes del tiempo de permanencia en paradas o estaciones) acumulado o agregado a lo largo de cada trayecto entre las terminales extremas de la línea (o entre cada dos pasos por la terminal de cierre en el caso de líneas circulares), pero no permite calcular el tiempo de servicio a pasajeros a nivel de cada parada individual, ya que para este último propósito sería necesario disponer —entre otros factores— de datos específicos de los volúmenes de pasajeros que suben y que bajan en cada una de las paradas o estaciones (no contemplado en el tipo de modelización planteada). Así, mientras que en cada uno de estos trayectos completos entre terminales extremas o entre dos circulaciones por la terminal de cierre se puede considerar que —salvo pequeñas desviaciones singulares— el número total de viajeros que acceden al vehículo debe ser igual al de pasajeros que se apean, es evidente que no ocurre lo mismo a nivel de cada estación o parada individual. En estas, el número de pasajeros que suben al vehículo de transporte público es generalmente distinto del número de bajadas, con lo que el proceso que emplea mayor tiempo en cada parada o estación puede ser diferente de aquel que se considera más restrictivo a nivel del trayecto completo. Como se verá posteriormente a lo largo del desarrollo del modelo, los efectos de esta disparidad tratan de corregirse mediante la introducción de un índice (variable  $bas_{rijk}$ ) representativo del mayor o menor grado de simultaneidad entre los procesos de subida y bajada de viajeros en los vehículos de transporte público que operan una determinada línea.

### 5.3.4. Aceleración de las unidades de transporte o vehículos

La variable  $a_n^m$  indica, para los modos metro ligero o tranvía (caso  $m=R$ ) y BHLS o BRT (caso  $m=B$ ), la aceleración media en servicio (en  $m/s^2$ ) de las unidades de transporte o vehículos de su subtipo  $n$  (donde  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$ ). Obsérvese que esta variable solo es necesario definirla para los modos de transporte público que dispondrían de circulación en plataforma reservada y priorización semafórica.

<sup>82</sup> Bajo la hipótesis de que los tiempos unitarios de entrada y de salida (por cada pasajero y canal) sean iguales (o muy similares entre sí), el proceso más limitante coincidiría directamente con aquel que tenga asignados un menor número de canales de paso.

A título orientativo, se señala que el vehículo de metro ligero Bombardier Flexity Swift utilizado en la red de Croydon Tramlink (Londres Sur) cuenta con una aceleración media, a dos tercios de su carga, de  $1.2 \text{ m/s}^2$  (Bombardier Transportation, 2006).

Respecto a los vehículos de autobús, en Cambridge Systematics Inc. *et al.* (1992: Tabla 3-15) —citando a su vez como fuente a Fuhs (1990)— se indican como valores típicos de aceleración  $1.49 \text{ m/s}^2$  en el rango entre 0 y 16 km/h,  $0.99 \text{ m/s}^2$  en el intervalo entre 16 y 48 km/h y  $0.42 \text{ m/s}^2$  entre 48 y 80 km/h. Estos datos proporcionan una aceleración media, desde 0 a 50 km/h, de  $1.05 \text{ m/s}^2$ .

### 5.3.5. Deceleración de las unidades de transporte o vehículos

La variable  $b_n^m$  representa, para los modos metro ligero o tranvía (caso  $m=R$ ) y BHLS o BRT (caso  $m=B$ ), la deceleración en servicio (en  $\text{m/s}^2$ ) de las unidades de transporte o vehículos de su subtipo  $n$  (donde  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$ ). De nuevo, esta variable solo es preciso definirla para los modos que se benefician de circulación en plataforma reservada y priorización semafórica.

Como referencia representativa de los vehículos de metro ligero, se señala que el Bombardier Flexity Swift de Croydon Tramlink presenta una deceleración máxima (en aplicación del freno de servicio y en condiciones de máxima carga) de  $1.3 \text{ m/s}^2$  (Bombardier Transportation, 2006). Por su parte, la deceleración en caso de aplicación del freno de emergencia ascendería a  $2.73 \text{ m/s}^2$ .

Para los vehículos de autobús, la deceleración en condiciones de frenado normal se sitúa, según Cambridge Systematics Inc. *et al.* (1992: Tabla 3-15), entre  $0.89$  y  $1.33 \text{ m/s}^2$ .

### 5.3.6. Para cada sistema de transporte público, índice identificativo del tipo de vehículo o unidad de transporte asignado a cada línea

La variable  $TypV_i^m$  señala, para cada modo  $m$  de transporte público (con  $m \in \{0, R, B\}$ ), el índice numérico característico del subtipo de unidad de transporte o vehículo destinado a operar en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ). Se trata simplemente de un valor identificativo que relaciona cada línea con el tipo de vehículo o unidad de transporte que operaría sobre ella, para cada uno de los posibles modos de transporte público.

Por definición ha de cumplirse:  $1 \leq TypV_i^m \leq Nvt^m \quad \forall m \in \{0, R, B\}; \quad \forall i = 1, 2, \dots, NL$ .

Para clarificar el uso de esta variable se propone el siguiente ejemplo, planteado sobre un subconjunto de 3 líneas. Supóngase que, para el modo autobús convencional en tráfico mixto ( $m=0$ ), se hubiesen definido previamente dos tipos de vehículos (tales como “tipo 1: autobús convencional rígido de 12 m” y “tipo 2: autobús convencional articulado de 18 m”), con los autobuses articulados (tipo 2) destinados a operar sobre las líneas 1 y 2, y los rígidos (tipo 1) sobre la línea 3. En este caso se asignarían los siguientes valores a la variable  $TypV_i^m$ :  $TypV_1^0 = 2$ ;  $TypV_2^0 = 2$ ;  $TypV_3^0 = 1$ . Análogamente, supóngase que en el caso del modo metro ligero o tranvía ( $m=R$ ) se hayan especificado otros dos tipos de unidades de transporte (por ejemplo, “tipo 1: tranvía de 32 m de longitud” y “tipo 2: tranvía corto de 22 m”), proponiéndose los tranvías de 32 m de largo para operar en la línea 1 y los tranvías cortos de 22 m para las líneas 2 y 3. Por consiguiente, la variable  $TypV_i^m$  habría de adoptar los siguientes valores:  $TypV_1^R = 1$ ;  $TypV_2^R = 2$ ;  $TypV_3^R = 2$ . Finalmente, considérese que para el modo BHLS o BRT ( $m=B$ ) se propusiese un único tipo de vehículo (por ejemplo, “tipo 1: autobús BRT articulado de 18 m”), el cual, lógicamente, estaría destinado a operar en las 3 líneas bajo análisis. Los correspondientes valores de la variable  $TypV_i^m$  serían por tanto:  $TypV_1^B = 1$ ;  $TypV_2^B = 1$ ;  $TypV_3^B = 1$ .

Siguiendo con este ejemplo, supóngase ahora que se quiere aludir a una determinada característica (por ejemplo, la capacidad estática  $CAPu_n^m$ ) del tipo de unidad de transporte que se emplearía en la línea 1 en

el caso de operación mediante autobús convencional en tráfico mixto. Dicha característica vendría dada por la variable  $CAPu_{typV_i}^m$  (con  $m=0$  e  $i=1$ ), es decir,  $CAPu_{typV_1}^0$ , que a su vez remite a  $CAPu_2^0$ .

Evidentemente, en todo este procedimiento ha de asegurarse la consistencia del orden (subíndice  $n$ ) utilizado para definir las diversas características (capacidad, número de plazas de asiento, número limitante de canales de paso, etc.) de los diferentes tipos de vehículos o unidades de transporte pertenecientes a cada uno de los modos (superíndice  $m$ ).

### 5.3.7. Porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación

Para el dimensionamiento del tamaño de la flota de vehículos o unidades de transporte de los modos públicos, será necesario establecer el porcentaje de unidades destinadas a servir de reserva o a permanecer previsiblemente fuera de servicio por estar sometidas a labores de mantenimiento o reparación, definido sobre el número de unidades que en cada caso resultasen estrictamente necesarias para la prestación del servicio. Este porcentaje se designará genéricamente mediante el coeficiente o parámetro  $\rho$ .

Se opta por modelizar este coeficiente como una variable de naturaleza aleatoria, pues puede existir cierta incertidumbre sobre la mayor o menor necesidad de este tipo de unidades adicionales en función de la fiabilidad de funcionamiento que los modelos de vehículo a utilizar presenten una vez en operación (propensión a sufrir averías, necesidad de labores de mantenimiento cada cierto número de kilómetros recorridos, etc.). En cualquier caso, este porcentaje suele estar en la práctica contenido dentro de unos intervalos no muy amplios.

Así pues, se adoptarán para la extracción aleatoria de los valores de esta variable distribuciones de probabilidad de tipo triangular, caracterizadas por su mínimo, moda y máximo. Por tanto, se debe definir como datos de entrada el siguiente grupo de valores:

$$\langle \rho_{min}^m, \rho_{max}^m, \rho_{mod}^m \rangle; \quad m \in \{0, R, B\}$$

donde  $\rho_{min}^m$ ,  $\rho_{max}^m$  y  $\rho_{mod}^m$  representan respectivamente el mínimo, el máximo y la moda de la distribución triangular de probabilidad adoptada para el porcentaje de unidades de transporte del modo  $m$  (de transporte público) que se destinarían a servir de reserva o a permanecer previsiblemente fuera de servicio por estar ocupadas en labores de mantenimiento o reparación, definido dicho porcentaje con respecto al número de unidades que en cada caso resulten estrictamente necesarias para la prestación del servicio.

En relación con los sistemas de autobuses, Pierce y Moser (1995) llevaron a cabo un conjunto de consultas a agencias de transporte de EE.UU. y determinaron que el ratio de vehículos para reserva y mantenimiento o reparación (*spare ratio*) presentaba una media del 19% entre las flotas pequeñas (menos de 200 vehículos), del 22% en las flotas medianas (entre 200 y 500 vehículos), del 21% en las flotas grandes (entre 500 y 1,000 vehículos) y del 17% en las flotas muy grandes (más de 1,000 vehículos). Mucho más recientemente, este mismo tipo de estudio recibió una actualización (Minkoff y Martin, 2014), encontrándose que el ratio de autobuses para reserva y mantenimiento o reparación se distribuía de tal forma que para el 11.9% de los operadores que respondieron se situaba entre 11–15%, para el 35.7% estaba comprendido entre 16–20%, para el 23.8% pertenecía al intervalo 21–25%, para el 16.7% se situaba entre 26–30%, para el 9.5% estaba comprendido entre 30–39% y, finalmente, para el 2.4% de operadores que respondieron era mayor o igual al 40%. Sin embargo, nótese que la *Federal Transit Administration* de EE.UU. recomienda (al menos para el caso de programas de inversión financiados por dicha entidad) que el ratio de autobuses para reserva y mantenimiento o reparación no debiera sobrepasar el 20% cuando el parque de vehículos en operación sea mayor o igual a 50 (Federal Transit Administration, 2012: pp. IV.19-20). No obstante, se reconoce también la conveniencia de tener en cuenta las circunstancias locales.

Por su parte, en España, el '*Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades*' (MFOM, 1996: p. 137) recomendaba, sin especificar ninguna tipología concreta de material móvil (autobuses, tranvías o metro ligero, metros, etc.), que la reserva se estableciese entre el 5% y el 10% de las unidades estrictamente necesarias para operación, en función de la dimensión de la explotación y de la edad del material. No obstante, al objeto de obtener dicho ratio de reserva para alguna explotación real, se han podido calcular valores del 13% para la flota de autobuses de 12 m del Servicio de Transporte Urbano de Santander (TUS)<sup>83</sup> y del 14% para la flota de autobuses del servicio de transporte público colectivo urbano de Bilbao (Bilbobús)<sup>84</sup>.

Con respecto a las redes de transporte metropolitano basadas en tecnologías ferroviarias, Pierce (1995) desarrolló un estudio análogo al anteriormente citado (Pierce y Moser, 1995), en el cual encuentra, para los sistemas de tipo *Light Rail Transit* (LRT), valores del ratio de vehículos de reserva y mantenimiento o reparación comprendidos entre el 12% y el 31%, con una media del 23% (calculada sobre únicamente 5 explotaciones diferentes).

Como ejemplo reciente en España, se puede citar el caso del metro ligero de Granada, que cuenta con una flota total de 15 unidades. De ellas, 13 se destinan a la prestación del servicio en horas punta (AOPJA, 2017), mientras que otras 2 unidades permanecen en las instalaciones de talleres y cocheras como reserva ante posibles averías<sup>85</sup>. Estos datos proporcionan un ratio de reserva del 15.4%.

Por otra parte, se puede apuntar que un estudio de viabilidad de un sistema de tránsito rápido para la ciudad canadiense de Hamilton (McCormick Rankin Corp., 2008) señala que los sistemas LRT tienen típicamente un ratio de vehículos para reserva y mantenimiento o reparación de aproximadamente el 10%. Este mismo estudio asume, para los sistemas de tipo *Bus Rapid Transit* (BRT), un ratio del 20%.

Ante la falta de criterios más homogéneos y estandarizados, y si no se dispusiese de información más particularizada, se podrían proponer como posibles ratios a emplear por defecto en una ejecución genérica del modelo los siguientes valores aproximados:

- Para autobús convencional en tráfico mixto ( $m=0$ ):  $\rho_{min}^0 \approx 12\%$ ;  $\rho_{mod}^0 \approx 18.5\%$ ;  $\rho_{max}^0 \approx 25\%$ .
- Para metro ligero o tranvía ( $m=R$ ):  $\rho_{min}^R \approx 8\%$ ;  $\rho_{mod}^R \approx 13\%$ ;  $\rho_{max}^R \approx 18\%$ .
- Para BHLS o BRT ( $m=B$ ):  $\rho_{min}^B \approx 12\%$ ;  $\rho_{mod}^B \approx 17\%$ ;  $\rho_{max}^B \approx 22\%$ .

## 5.4. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA OPERACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO

### 5.4.1. Número de períodos horarios diferenciados

La variable  $N_{per_i}$  indica el número total de períodos o franjas horarias que se diferencian para la operación del servicio de transporte público en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ). La inclusión de esta variable responde a la necesaria distinción entre horas-punta, horas-valle, hora llana, y cualesquiera otros períodos, que a su vez pueden presentar diferentes características según el tipo de día (días laborables, fines de semana, festivos) o la época del año (curso escolar, vacaciones estivales, período navideño, etc.). La necesidad de estas diferenciaciones procede fundamentalmente del distinto comportamiento y características de la demanda (tanto de la del transporte público como de la del privado o individual) a lo largo de estas diferentes franjas horarias y períodos del año.

<sup>83</sup> Flota de 65 autobuses de 12 m para un máximo de 57 en operación (año 2014). Datos extraídos de: <http://www.tusantander.es/tusantander/noticias/20030-el-tus-llevara-publicidad-en-sus-autobuses> [Acceso: 2016]

<sup>84</sup> Flota total de 139 vehículos para un máximo de 123 unidades en operación (año 2013). Datos extraídos de: <http://www.bilbobus.com/en/documents/PliegopublicidadBilbobus.pdf> [Acceso: 2016]

<sup>85</sup> Revista Vía Libre: <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=21923&cs=oper> [Último acceso: 24/01/2020]

Así pues, la modelización planteada permite definir el nivel de discretización horaria que se considere oportuno en cada caso, con la conveniencia de que cada uno de los períodos horarios definidos sea sensiblemente homogéneo. Idealmente, esta definición de razonable homogeneidad debe concernir no solamente a la demanda del propio transporte público, sino también a la del resto de alternativas modales consideradas (modos motorizados privados, y modos no motorizados y de ‘micromovilidad’).

Cada uno de los períodos horarios definidos para una determinada línea  $i$  se codifica mediante un número natural entre 1 y  $Nper_i$ , pudiendo ser totalmente arbitrario el orden de asignación (siempre y cuando se respete, lógicamente, la consistencia interna de dicho orden a lo largo del modelo). Tampoco es necesario que exista una correspondencia real entre los períodos horarios definidos para distintas líneas (por ejemplo, el período horario 1 de la línea 1 no tendría por qué ser coincidente con el período horario 1 de la línea 2).

#### 5.4.2. Horas anuales asignadas a cada período horario de operación

La variable  $NH_{ij}$  define el número de horas al año [h/a] durante las cuales la línea  $i$  (donde  $i = 1, 2, \dots, NL$ ) es operada de acuerdo a las condiciones de su período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ).

#### 5.4.3. Intervalo mínimo de diseño

La variable  $Hmin_{ij}^m$  indica el límite mínimo de diseño establecido para el intervalo de operación entre unidades de transporte público del modo  $m$  (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ) que —por limitaciones de capacidad de la línea y eficacia operativa— es posible alcanzar en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ) durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ).

A lo largo de la modelización desarrollada, la variable  $Hmin_{ij}^m$  se expresará en minutos [min].

A grandes rasgos (Vuchic, 2005: pp. 10-11), el intervalo mínimo de una línea de transporte público puede estar condicionado tanto por las características físicas del sistema de circulación implantado (tecnología, entorno operativo o categoría de la infraestructura de circulación, método de conducción o guiado, tipo de control del tráfico, nivel de seguridad requerido, etc.) como por las operaciones a realizar en las paradas o estaciones (procesos de subida y bajada de pasajeros, número de unidades de transporte que tienen cabida simultáneamente en la parada, control de expediciones, etc.). Los factores del primer grupo supeditan el intervalo mínimo aceptable en los tramos o segmentos de la infraestructura de circulación comprendidos entre paradas o estaciones, mientras que los del segundo grupo influyen en el intervalo mínimo con el que es viable operar las propias estaciones o paradas. En general, el intervalo mínimo de la línea está restringido por el mayor de ambos valores. Este corresponde habitualmente al intervalo relacionado con la operación de las paradas o estaciones<sup>86</sup>, de modo que el intervalo requerido en aquella estación o parada con una menor capacidad (número de unidades de transporte que pueden ser servidas en una hora) suele ser el que se utiliza para determinar el intervalo mínimo de operación de la línea. A dicha parada o estación se la denomina parada crítica.

Uno de los aspectos importantes en la definición del intervalo mínimo de diseño es que este ha de proporcionar un adecuado nivel de fiabilidad, que permita que la operación de la línea sea suficientemente estable y regular (TCRP, 2013: p. 3.6). Esto implica que sobre el tiempo mínimo de separación entre unidades de transporte teóricamente posible se debe añadir un cierto margen operativo (*operating margin*) que permita absorber las irregularidades que se producen en la operación de la

<sup>86</sup> Esta afirmación resulta particularmente apropiada para el caso de sistemas basados en el uso de autobuses, pero tiene una validez no tan general para sistemas de tecnología ferroviaria, donde factores relativos a la infraestructura de circulación y a sus sistemas de señalización y control también suelen tener un peso importante en la determinación del intervalo mínimo. Además, en algunas ocasiones pueden existir segmentos o secciones singulares en la infraestructura de circulación (como tramos de vía única con circulaciones en ambos sentidos) que resulten más restrictivos en la determinación del intervalo mínimo de diseño.

línea, particularmente en lo relativo a la posible ocurrencia de tiempos de permanencia en parada o estación (*dwell time*) más prolongados que el tiempo promedio establecido para la parada o estación crítica (debido principalmente a la variabilidad del tiempo de servicio a pasajeros entre los distintos vehículos que pasan por una misma parada o estación).

Con carácter general, el intervalo mínimo de diseño es el inverso de la capacidad de tránsito de una línea o infraestructura de transporte público (entendida dicha capacidad como el máximo número de unidades de transporte por hora que pueden ser operadas con la adecuada fiabilidad y seguridad, y con el intervalo mínimo resultante expresado en horas). Ahora bien, la determinación de dicha capacidad de tránsito constituye un proceso de notable complejidad. En el caso de sistemas basados en la utilización de autobuses, este proceso se detalla pormenorizadamente en la Sección 6.5 del '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' de EE.UU. (TCRP, 2013: pp. 6.60-6.85). Dicho procedimiento general es aplicable a todo tipo de sistemas de autobuses, desde aquellos que operan en tráfico mixto hasta sistemas BRT con infraestructura a distinto nivel. Los principales factores a partir de los cuales se determina la capacidad de tránsito de una línea o infraestructura utilizada para la circulación de autobuses pueden ser agrupados en tres grandes clases (TCRP, 2013: pp. 6.61-6.63):

- Factores relacionados con la demanda en las paradas o estaciones de autobús: valor medio y variabilidad del tiempo de permanencia de los autobuses en las paradas o estaciones; valor de diseño para la tasa de fallo (*failure rate*) de las paradas (es decir, porcentaje de autobuses que al llegar a una parada se encuentran con que todos los espacios o áreas de embarque/desembarque están ya ocupados por otros autobuses); y un factor de pico para el volumen de pasajeros haciendo uso de las paradas.
- Factores relacionados con la localización y entorno de las paradas o estaciones: posición respecto de los carriles de circulación; posición relativa a las intersecciones; tipo de diseño de la parada; número de espacios o áreas de embarque/desembarque; tipo de infraestructura de circulación en relación con la posibilidad de los autobuses de cambiarse a otros carriles adyacentes en las secciones de ubicación de las paradas; temporización de los ciclos de señalización semafórica; volumen de tráfico en el carril contiguo al borde derecho de la calzada; volumen y capacidad del tráfico que efectúa giros a la derecha; y volumen de peatones que interfieren con dichos giros.
- En su caso, factores relativos a la operación mediante paradas alternadas (*skip-stop operation*): número de paradas o estaciones en cada patrón de operación de paradas; tipo de pauta de las llegadas de autobuses a las paradas (aleatoria, típica o en pelotones); y volumen y capacidad de tráfico en el carril adyacente a aquel situado junto al borde derecho de la calzada.

Como capacidades aproximadas representativas de situaciones típicas, el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' ofrece varios valores y relaciones que pueden servir de orientación para su uso a nivel de planificación general (TCRP, 2013: pp. 6.20-6.23). En particular, los *Exhibits* 6.18 y 6.19 muestran la capacidad (autobuses/hora) de una parada con una única área de embarque/desembarque bajo unas determinadas condiciones, para los casos de un carril-bus en viario urbano y para circulación en tráfico mixto, respectivamente. En el primer caso, los resultados se presentan en función del volumen de tráfico que realiza giros a la derecha y del volumen de uso del paso de peatones que interfiere con dicho giro. Para el segundo caso, la capacidad de la parada se representa en función del volumen de tráfico en el carril contiguo al borde derecho de la calzada y del ratio entre el tiempo de verde disponible para el paso de los autobuses y el ciclo semafórico completo (*g/C ratio*). Obsérvese que bajo los supuestos especificados en dichas figuras, muy difícilmente se podrían mantener intervalos inferiores a 2 minutos si se dispone de paradas con una única área de embarque/desembarque, incluso en condiciones de tráfico muy favorables. Para paradas con mayor número de áreas de embarque/desembarque, los valores obtenidos de dichos gráficos pueden ser multiplicados por el correspondiente factor de efectividad acumulada de múltiples áreas, el cual se detalla en el *Exhibit* 6.63 (TCRP, 2013: p. 6.78). En este sentido, también resulta de interés el *Exhibit* 6.14 (TCRP, 2013: p. 6.18), en el que se muestran las capacidades máximas de paradas de autobús de tipo '*on-line*' (es decir, posicionadas sobre el carril

derecho de circulación) para distintos números de espacios o áreas de embarque/desembarque, dispuestos linealmente. Como variables adicionales de entrada se consideran varios valores del tiempo medio de permanencia en parada (30, 60 y 120 s) y del ratio entre tiempo de verde y tiempo de ciclo semafórico (0.5 y 1.0). Nótese, en cualquier caso, que dicha figura está basada en una tasa de fallo de la parada crítica muy elevada (25%).

Por su parte, en Vuchic (2005: pp. 93-95) se indica —a modo orientativo— que para sistemas de autobuses estándar (rígidos de 12 m) con carril único y paradas con capacidad para un solo vehículo muy difícilmente se pueden llegar a alcanzar intervalos mínimos inferiores a 60 s, si bien se advierte que este nivel de frecuencia llevará en muchos casos a bajas velocidades de operación y escasa fiabilidad del servicio (particularmente donde existan afecciones del tráfico mixto). Para autobuses articulados en las mismas condiciones se indican intervalos mínimos similares o ligeramente mayores, a condición de que dispongan de al menos tres puertas de doble canal y preferentemente sistemas de pago sin intervención del conductor. En cualquier caso, estos intervalos mínimos parecen bastante reducidos en comparación tanto con los que se derivan del *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* como con los observados en la práctica habitual de la gran mayoría de explotaciones europeas (lo que permite suponer que dichos valores corresponderían a márgenes operativos prácticamente nulos y, consecuentemente, tasas de fallo de las paradas muy altas). Adicionalmente, desde el punto de vista de la demanda, el volumen de pasajeros que sirven los sistemas convencionales de autobús muy raramente llega en Europa a ser tan elevado como para que sea necesario recurrir a intervalos tan bajos, ya que habitualmente se habrá dotado ya al corredor, eje o itinerario servido de sistemas de transporte público de mayor capacidad y mejores prestaciones.

Este mismo autor (Vuchic, 2005: pp. 94-95) indica, para lo que denomina líneas de autobús de gran capacidad (se refiere particularmente a sistemas de tipo BRT en Latinoamérica, concebidos para maximizar la capacidad mediante infraestructuras segregadas exclusivamente dedicadas al sistema), intervalos mínimos tan bajos como entre 30 y 12 segundos<sup>87</sup>. Debido a las características especiales de los sistemas citados, estos intervalos no resultan extrapolables a sistemas BHLS en Europa, donde límites mínimos de diseño en el entorno de 90–150 s (1.5–2.5 min) se podrían considerar asumibles en caso de dotación de plataforma reservada y priorización semafórica en intersecciones.

Por otra parte, la metodología general de cálculo de la capacidad de las líneas e infraestructuras de transporte público de tipo ferroviario se analiza detalladamente en la Sección 8.5 del *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* (TCRP, 2013: pp. 8.44-8.67), que es de aplicación (con las adaptaciones indicadas por el documento) a distintas categorías de sistemas ferroviarios de ámbito metropolitano y/o urbano (ferrocarril convencional o de cercanías, metro, metro ligero, tranvía, etc.).

En el caso de líneas de nuevo proyecto sin limitaciones adicionales, el intervalo mínimo de diseño suele estar típicamente determinado por la suma de tres componentes: el tiempo medio de permanencia en la estación o parada crítica; el tiempo mínimo de separación entre unidades que permita el sistema de señalización y control de la circulación por motivos de seguridad<sup>88</sup>; y, por último, un margen operativo adecuado que permita recuperar pequeños retrasos de una unidad sin que interfiera en la circulación de las siguientes unidades. El intervalo correspondiente a la suma de estas tres componentes se denomina 'intervalo de no interferencia' o *'non-interference headway'* (TCRP, 2013: p. 8.54).

No obstante, pueden existir también —sobre todo en sistemas preexistentes relativamente antiguos o en aquellos diseñados para minimizar la inversión inicial— otros factores que resulten más restrictivos a la hora de imponer el intervalo mínimo entre unidades que puede ser regularmente operado. Entre estos factores destacan especialmente aquellos relacionados con las características de la infraestructura de circulación (TCRP, 2013: pp. 8.54-8.59), tales como la posible existencia de tramos de vía única con

<sup>87</sup> El BRT TransMilenio de Bogotá llega a operar hasta 280 autobuses por hora y sentido en los tramos más cargados, durante la hora punta (Cain *et al.*, 2006).

<sup>88</sup> En este sentido, el *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* (TCRP, 2013: pp. 8.45-8.51) distingue entre sistemas de cantón fijo, sistemas de señalización en cabina multicomando y sistemas de cantón móvil, que a su vez se pueden subdividir entre aquellos con distancia de seguridad fija y los dotados de distancia de seguridad variable.



circulaciones en ambos sentidos, tramos con operación sobre el viario urbano con circulación sometida a la regulación semafórica del tráfico general, o puntos de salida desde estaciones o paradas que estén situadas justo antes de una intersección a nivel. Otros factores que en ocasiones pueden restringir la capacidad están relacionados con la presencia de desvíos (TCRP, 2013: pp. 8.60-8.61), con limitaciones por insuficiencia de la potencia eléctrica suministrada desde las subestaciones (TCRP, 2013: p. 8.61), o con el tiempo adicional necesario en las terminales para operaciones tales como la inversión de la marcha (TCRP, 2013: pp. 8.61-8.64).

De forma orientativa, en la Sección 8.6 del *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* se indican, para algunas situaciones características, rangos de capacidades de diseño que pueden servir de referencia aproximada a nivel de análisis de planificación (TCRP, 2013: pp. 8.81-8.88). En particular, en los *Exhibits* 8.55 (TCRP, 2013: p. 8.84) y 8.57 (TCRP, 2013: p. 8.85) se muestran rangos de la capacidad de tránsito (trenes/h) de líneas con infraestructura segregada sin intersecciones a nivel, para sistemas dotados con señalización en cabina en el primer caso y con cantón móvil en el segundo. En ambos casos se utiliza como premisa para configurar dichos gráficos una suma del tiempo de permanencia en la estación o parada crítica y del margen operativo comprendida entre 55 y 70 s. Como variable de entrada adicional se considera la longitud de las unidades (en número de coches). Para los sistemas de ferrocarril ligero (LRT) que cumplan estas premisas, los intervalos mínimos de diseño que se derivan de las capacidades indicadas varían aproximadamente entre 90 y 110 s en el caso correspondiente a señalización en cabina y entre 80 y 100 s para los sistemas dotados de cantón móvil.

Para sistemas de tipo LRT sin infraestructura segregada a distinto nivel en los cuales el factor limitante de capacidad esté impuesto por la existencia de un tramo de vía única con circulaciones en ambos sentidos, se puede tomar como referencia orientativa el *Exhibit* 8.59 (TCRP, 2013: p. 8.86). La capacidad de la línea varía en función de la longitud del tramo de vía única y del número de paradas o estaciones ubicadas en dicho tramo. Se deben tener también en cuenta, en cualquier caso, las condiciones específicas que se han establecido para la realización de dicho gráfico (velocidad máxima de 55 km/h, tren de 55 m de longitud, 20 s de tiempo de permanencia en las posibles paradas intermedias del tramo y 20 s de margen operativo). Se puede apreciar, por ejemplo, que para un tramo de vía única de 600 m de longitud con una parada o estación intermedia la capacidad de la línea cae por debajo de los 15 trenes por hora y sentido, lo que equivale a un intervalo mínimo claramente superior a 4 minutos.

El *Exhibit* 8.61 (TCRP, 2013: p. 8.87) resulta de utilidad para líneas de tipo LRT que operen sobre el viario urbano con circulación en un carril reservado de uso exclusivo, pero sin sistemas de priorización semafórica. En estas condiciones suele asumirse que el intervalo mínimo es aproximadamente igual al doble del ciclo semafórico de mayor duración. Así, por ejemplo, a un ciclo semafórico máximo de 120 s le correspondería un intervalo mínimo de 4 minutos (capacidad de 15 trenes/h).

Finalmente, se indica (TCRP, 2013: p. 8.88) que para los sistemas de tipo LRT con plataforma de uso reservado pero con intersecciones a nivel con el tráfico general se pueden recurrir, como referencia orientativa, a los mismos gráficos que en el caso de líneas con infraestructura segregada sin intersecciones a nivel (*Exhibits* 8.55 y 8.57), siempre y cuando el sistema de regulación semafórica conceda una total preferencia al paso de las unidades de transporte público (este caso se aproxima bastante al tipo de sistemas de metro ligero y de tranvía moderno que son objeto de análisis en la presente tesis). No obstante, también se señala que cuando las salidas de las paradas o estaciones se sitúan próximas a intersecciones a nivel y la prioridad de paso no puede ser otorgada hasta que el vehículo esté totalmente preparado para partir de dicha parada o estación puede ser necesario añadir un tiempo adicional al tiempo normal de permanencia en la parada o estación, lo que incrementaría moderadamente el intervalo mínimo de diseño y, consecuentemente, disminuiría la capacidad de la línea. En el caso de que no exista prioridad de paso para la línea de transporte público sobre el tráfico privado (o que dicha prioridad resulte insuficiente) debe recurrirse en cambio al *Exhibit* 6.61.

Para sistemas de LRT o metro ligero, Vuchic (2005: pp. 94-96) indica por su parte un rango de intervalos mínimos entre 150 s (2.5 min) y 75 s (1.25 min), que coincide bastante bien con los rangos señalados por el *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* para líneas con infraestructura segregada sin

intersecciones a nivel y, en la parte alta del rango (2–2.5 min), con aquellos intervalos mínimos que cabe inferir para sistemas con plataforma reservada e intersecciones a nivel con priorización semafórica para el transporte público. Estos valores (en torno a 2–2.5 min) también parecen bastante congruentes con los límites mínimos aplicados habitualmente en explotaciones europeas.

Para concluir, nótese que, a grandes rasgos, las capacidades de tránsito (trenes por hora) típicas de líneas de LRT o metro ligero suelen ser algo inferiores a las de sistemas similares basados en el uso de autobuses debido a la necesidad de proporcionar un tiempo adicional de separación entre unidades por motivos de seguridad (TCRP, 2013: p. 3.33).

#### 5.4.4. Intervalo máximo (intervalo de servicio)

La variable  $Hmax_{ij}^m$  define el intervalo máximo admisible o intervalo de servicio impuesto para la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ) durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ), cuando la prestación del servicio de transporte público sea efectuada mediante el modo  $m$  (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ).

El intervalo  $Hmax_{ij}^m$ , al igual que  $Hmin_{ij}^m$ , será expresado en minutos [min] en el contexto del modelo desarrollado.

La imposición de este intervalo máximo está relacionada con el mantenimiento de un nivel de servicio mínimamente aceptable en períodos de baja o muy baja demanda, aun cuando la frecuencia de servicio correspondiente a dicho intervalo no esté respaldada (a nivel cuantitativo) por el volumen de pasajeros existente. Se trata así de mantener un servicio público básico, de especial utilidad para aquellos viajeros que no disponen de otras alternativas al uso del transporte público. A dicho intervalo máximo se le denomina intervalo de servicio (Molinero y Sánchez, 2005: p. 410) o ‘*policy headway*’ (Vuchic, 2005: p. 10), y es normalmente fijado por las administraciones o autoridades con competencias sobre el transporte público. De acuerdo a Molinero y Sánchez (2005: p. 410), no debe sobrepasar nunca 1 hora en zonas urbanas, debiendo ser preferentemente no mayor de 30 minutos.

Asimismo, también en períodos o líneas con demandas más elevadas puede darse la situación de que se fijen, por razones de mantenimiento de una política de fomento del transporte público, intervalos máximos o de servicio inferiores a los que se determinarían estrictamente en función del volumen de pasajeros.

En conclusión, el intervalo de operación utilizado por el modelo estará siempre confinado en el intervalo cerrado  $[Hmin_{ij}^m, Hmax_{ij}^m]$ , aun cuando el intervalo de operación calculado en función del volumen de pasajeros pudiese conducir hipotéticamente a un valor menor o mayor que dicho rango de variación.

#### 5.4.5. Coeficiente de utilización de la capacidad programada

Se define la variable  $LF_{ijk}^m$  como el límite superior del coeficiente de utilización de la capacidad programada (en la sección de máxima demanda) a considerar para el dimensionamiento del servicio de transporte público prestado por el modo  $m$  (donde  $m \in \{0, R, B\}$ ) en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido  $k$  ( $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ).

El coeficiente o factor de utilización de capacidad —también denominado factor de ocupación, factor de carga o ‘*load factor*’<sup>89</sup>— se puede definir (Vuchic, 2005: p. 11), para una determinada sección, como el cociente entre la capacidad utilizada (volumen de pasajeros realmente transportados en dicha sección)

<sup>89</sup> El coeficiente o factor de utilización de capacidad o factor de carga se suele representar típicamente como  $\alpha$ , pero en la presente tesis se ha preferido utilizar en su lugar  $LF$  (*load factor*) para evitar posibles duplicidades con otro tipo de variables que también se representan habitualmente mediante dicho carácter (por ejemplo, el parámetro  $\alpha$  de la clásica fórmula del BPR o *Bureau of Public Roads* para relacionar velocidad de circulación con el ratio Volumen/Capacidad).

y la capacidad bruta ofertada o programada (el producto de la capacidad estática de una unidad de transporte por la frecuencia de operación del servicio). Se trata de un valor adimensional, que, en relación con su significado, representa el ratio de pasajeros por plaza (prs/plz, incluyendo espacios de pie).

Nótese que, en este caso, a efectos de definir el límite superior del coeficiente de utilización de la capacidad programada, la capacidad utilizada o volumen de pasajeros se considera referida a la sección de máxima demanda, de modo que en cualquier otra sección de la línea el citado coeficiente tomará valores inferiores a dicho límite superior.

De acuerdo a Molinero y Sánchez (2005: pp. 410-412), es recomendable que este coeficiente no exceda en casi ningún caso de 0.9, pudiendo alcanzarse dicho valor solo en horas punta y si la sección de máxima demanda es de reducida longitud.

En el dimensionamiento del servicio de transporte público para una determinada demanda, la imposición, como parámetro de diseño, de valores relativamente bajos del coeficiente de utilización de capacidad repercute favorablemente en el nivel de servicio prestado al usuario (mayor probabilidad de encontrar un asiento libre y, en su defecto, mayor espacio disponible para viajar de pie, así como menores tiempos de espera por una mayor frecuencia del servicio), mientras que valores altos de este factor (próximos a 1) permiten generalmente reducir los costes de operación (menor número de unidades en servicio para transportar un determinado volumen de viajeros) a costa de degradar, en mayor o menor medida, los atributos de nivel de servicio.

#### 5.4.6. Máxima velocidad programada u objetivo para cada tramo (en plataforma reservada)

La variable  $Vg_{ink}^m$  indica, para cada modo  $m$  de transporte público con circulación en plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, con  $m \in \{R, B\}$ ), la máxima velocidad programada o velocidad objetivo admisible para el tramo  $n$  de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), recorrida esta en el sentido  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Los tramos de cada línea se definen como los segmentos entre paradas o estaciones, de tal forma que el subíndice  $n$  tomará en este caso los siguientes valores<sup>90</sup>:

$$n = \begin{cases} = 1, 2, \dots, Nst_i - 1 & \text{si } TypL_i = LT \\ = 1, 2, \dots, Nst_i & \text{si } TypL_i = RT \vee TypL_i = RO \end{cases}$$

Las unidades de medida utilizadas en la modelización para manifestar el valor numérico de la variable  $Vg_{ink}^m$  son kilómetros por hora [km/h].

La velocidad programada o velocidad objetivo de un tramo se establece como la máxima velocidad a la que los vehículos de transporte público pueden circular en dicho tramo satisfaciendo unos determinados estándares de seguridad (tanto del propio vehículo como del resto de usuarios de las vías públicas), confort de marcha, costes de operación, y rendimiento de los vehículos (Vuchic, 2005: p. 19). La velocidad programada u objetivo ha de ser menor o igual a la velocidad legal (máxima velocidad a la que a los vehículos de transporte público se les permitiría reglamentariamente operar en un determinado tramo o segmento), y esta, a su vez, debe ser necesariamente menor o igual que la velocidad de diseño de la línea o infraestructura (máxima velocidad que se podría alcanzar en un tramo o segmento en condiciones de adecuada seguridad de circulación y confort si el movimiento de los vehículos solo

<sup>90</sup> Nótese que, para una determinada línea de doble sentido (ya sea convencional o circular), a cada tramo o segmento le corresponde una misma numeración independientemente del sentido de circulación en que se realice cada viaje (es decir, el 'tramo 1' es el primero en el sentido de referencia, pero el último en el sentido opuesto). Además, recuérdese que el sentido de circulación adoptado como referencia ha de ser consistente con el utilizado para definir la posición longitudinal de las paradas o estaciones.

estuviese condicionado por la geometría de la alineación, la inclinación de rampas o pendientes, y otros factores físicos).

Obsérvese que la velocidad programada u objetivo puede ser diferente en los dos sentidos de circulación de un mismo tramo, debido por ejemplo al distinto signo de las rampas y pendientes al ser recorridas en sentidos opuestos o a diferentes condiciones de integración de la línea en el viario urbano en uno u otro sentido (Vuchic, 2005: p. 19).

Habitualmente esta velocidad estará condicionada principalmente por razones de seguridad global (es decir, de todos los usuarios del espacio público) en diferentes entornos urbanísticos y tipos de vía pública, especialmente ante posibles interacciones con el tránsito peatonal, con la circulación de ciclistas, con el cruce de tráfico mixto, etc. Así, como posibles valores habituales o de referencia pueden proponerse, de modo aproximado, los siguientes:

- Tramos urbanos (generales):  $Vg \approx 50$  km/h.
- Tramos periféricos (en grandes arterias), metropolitanos o interurbanos:  $Vg \approx 70-80$  km/h.
- Tramos en el centro histórico de las ciudades y en áreas de preferencia peatonal o con calmado del tráfico:  $Vg \approx 20-30$  km/h.

#### 5.4.7. Precios de las diferentes modalidades de tarifa

La variable  $far_n^m$  se define como el precio monetario a abonar por cada uso del modo  $m$  de transporte público (con  $m \in \{0, R, B\}$ ) según la modalidad tarifaria  $n$  (con  $n = 1, 2, \dots, Nfar$ ; siendo  $Nfar$  el número de modalidades de tarifa que se deban considerar).

La formulación permite establecer diferentes precios para los distintos modos de transporte público (autobús convencional, BHLS/BRT y metro ligero o tranvía), pero, tal como está desarrollada, se debe definir el mismo número de modalidades tarifarias para los tres casos (es decir,  $Nfar^0 = Nfar^R = Nfar^B = Nfar$ ).

Cada modalidad tarifaria se codifica mediante un número natural entre 1 y  $Nfar$ . Simplemente a modo ilustrativo sobre las posibles modalidades de tarifa, se podrían considerar, por ejemplo:  $n=1$ : billete sencillo;  $n=2$ : bono de 10 viajes;  $n=3$ : abono mensual general;  $n=4$ : abono con descuento social;  $n=5$ : transbordo (gratuito o con precio reducido).

Para expresar numéricamente los valores de la variable  $far_n^m$ , al igual que para cualquier otra de naturaleza monetaria, se utilizarán en la modelización desarrollada unidades monetarias<sup>91</sup> constantes (referenciadas al nivel general de precios de un año específico).

#### 5.4.8. Proporción de viajes en transporte público que son abonados mediante cada modalidad tarifaria

La variable  $Pfar_{ijk}$  indica la fracción o proporción de los viajes en transporte público realizados en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ) que son abonados mediante la modalidad tarifaria  $n$  (con  $n = 1, 2, \dots, Nfar$ ). Se trata nuevamente de una variable adimensional.

Estos datos se introducen en el modelo en forma de proporción decimal, de tal modo que para cualquier posible combinación de índices  $i, j, k$  se ha de verificar:  $\sum_{n=1}^{Nfar} Pfar_{ijk} = 1$ .

<sup>91</sup> Abreviadas genéricamente en lo sucesivo como CU (currency unit).

## 5.5. DEFINICIÓN BÁSICA DE PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL RENDIMIENTO OPERATIVO DE LOS MODOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

### 5.5.1. Tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior

En la operación del transporte público, el componente principal del tiempo de parada o estación (*dwell time*)<sup>92</sup> suele estar constituido por el tiempo de servicio a pasajeros, entendiendo como tal aquella parte del tiempo de parada o estación durante la cual se producen los flujos de entrada (subida) y/o salida (bajada) de viajeros a través de las puertas del vehículo. Uno de los factores básicos para determinar la duración de este tiempo de servicio a pasajeros es la velocidad a la cual se desarrollan dichos procesos de subida y bajada o, inversamente, el tiempo medio consumido en dicha acción por cada pasajero que accede o sale de los vehículos. La cuantía de este tiempo medio por persona estará generalmente sometida a un cierto nivel de incertidumbre, especialmente si no están disponibles o no es posible desarrollar mediciones específicas *in situ* (lo cual sucede para aquellos nuevos modos que están en fase de evaluación, estudio o planificación y por tanto no han sido todavía implementados), siendo necesario entonces adoptar valores de cálculo propuestos por defecto. En cualquier caso, estos tiempos por pasajero están también sujetos a un razonable nivel de variabilidad, puesto que, además de depender de características propias de las infraestructuras, vehículos y sistemas de pago implantados, están influenciados también por características personales de los usuarios (edad, posibles dificultades de movilidad, grado de familiaridad con el uso del sistema de transporte público, etc.). Por todo ello, un enfoque adecuado para la modelización del tiempo de servicio a pasajeros consiste en la consideración de este tiempo medio por pasajero como una variable aleatoria, para la cual se proponen distribuciones triangulares de probabilidad, que deben ser definidas mediante sus valores de mínimo, máximo y moda. En consecuencia, han de especificarse como datos de entrada del modelo los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle pstnmin_{ijk}^m, pstnmax_{ijk}^m, pstnmod_{ijk}^m \rangle$$

$$\text{con: } m \in \{0, R, B\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $pstnmin_{ijk}^m$ ,  $pstnmax_{ijk}^m$  y  $pstnmod_{ijk}^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público del modo  $m$  (en condiciones de ausencia de congestión en el interior del mismo), dadas las características de los pasajeros que hacen uso de la línea  $i$  durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Las unidades utilizadas para expresar numéricamente estas variables de entrada en el modelo son segundos por persona [s/prs].

Con respecto a la definición anterior, deben ponerse de relieve algunas puntualizaciones en relación con las condiciones en las que dicho tiempo medio por persona entra a formar parte del modelo:

- Dado que la estructura de datos desarrollada para el modelo no incorpora explícitamente los volúmenes de pasajeros de una determinada línea que entran y que salen de los vehículos de transporte público en cada una de las paradas o estaciones (sino que se emplea el volumen total de subidas registradas a lo largo de la línea, junto con una serie de coeficientes que sintetizan aspectos

<sup>92</sup> El tiempo de parada o estación (*dwell time*) se define como el tiempo que un vehículo o unidad de transporte público ha de permanecer detenido en una parada o estación para permitir que se completen las operaciones de entrada y salida de pasajeros, incluyendo los tiempos de apertura y cierre de puertas y, en su caso (paradas o estaciones con más de un único espacio o zona de embarque y desembarque), el tiempo perdido en el comienzo del acceso de pasajeros o '*boarding lost time*' (TCRP, 2013: pp. 3.23, 6.6; Vuchic, 2005: p. 14). Pueden existir no obstante otros tiempos adicionales durante los cuales el vehículo o unidad de transporte deba permanecer ocupando la parada (como por ejemplo la demora de reincorporación) que estrictamente no forman parte del '*dwell time*'.

fundamentales de la forma del perfil de volúmenes de pasajeros existente a lo largo de la longitud de dicha línea), no resulta pertinente introducir una distinción específica entre tiempos por persona en movimientos de entrada y en movimientos de salida (a pesar de que estos en general son diferentes entre sí). En su lugar se utiliza como variable un único valor medio por persona y movimiento (ya sea de entrada o de salida), que en la práctica puede asimilarse a la semisuma de los tiempos unitarios específicamente propuestos para movimientos de subida y de bajada de pasajeros.

- Los tiempos medios por persona a introducir como datos de partida se refieren a los tiempos empleados en cada canal de paso (de entrada o de salida) que permita el flujo simultáneo de una única fila o hilera de pasajeros. Sin embargo, dependiendo de las características de las unidades de transporte, será habitual que la subida y/o bajada de viajeros se produzca simultáneamente a través de varios canales de paso, reduciendo así el tiempo total empleado en completar dichas operaciones. Los efectos de la posible existencia de múltiples canales de paso (variable  $Ndc_n^m$ ) son incorporados posteriormente en la propia formulación del modelo, por lo que los datos de entrada aquí definidos han de estar referidos a los tiempos observados por cada canal de paso.
- La presencia de pasajeros de pie en el interior de los vehículos (especialmente en las inmediaciones de las puertas) es un factor que suele ralentizar los procesos de acceso y salida de pasajeros (TCRP, 2013: pp. 3.23-3.24, 6.6), de tal modo que el tiempo medio empleado por persona puede considerarse influenciado por la densidad de pasajeros de pie existente en el vehículo cuando esta es sensiblemente mayor que cero. Por tanto, deben establecerse unas condiciones homogéneas o estandarizadas para las cuales se determinen los valores de los tiempos medios por persona. Lo más sencillo y habitual en este sentido es definir unas condiciones en las que la influencia de la presencia de pasajeros de pie no llegue a producirse, ya sea porque no haya pasajeros de pie o porque la densidad media de los mismos sea suficientemente baja como para no entorpecer en absoluto los procesos de subida y bajada de viajeros. A estos efectos, se ha denominado 'condiciones de ausencia de congestión' en la definición de los datos de entrada  $pstnmin_{ijk}^m$ ,  $pstnmax_{ijk}^m$  y  $pstnmod_{ijk}^m$  a aquellas en las que la densidad media de pasajeros de pie en el interior del vehículo sea inferior a 0.5 personas por metro cuadrado<sup>93</sup>. En aquellos casos en los que la densidad media existente o prevista durante la operación del servicio sea mayor a 0.5 prs/m<sup>2</sup>, será la propia formulación del modelo la que añada un incremento adicional de tiempo cuya cuantía se calcule en función de la densidad media obtenida.

En general, los tiempos por persona por cada movimiento de entrada o salida y por cada canal de paso disponible están influenciados por factores tales como los métodos o sistemas implantados para el pago/cobro de las tarifas (así como por el porcentaje de uso de cada uno de los métodos disponibles), el posible desnivel entre el andén de la parada y el piso del vehículo, la anchura de los pasillos interiores de circulación, o las características personales de los usuarios.

En cuanto a posibles valores típicos del tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida, una referencia de indudable trascendencia puede encontrarse en el *Exhibit 6.4* del '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: p. 6.7), que por su gran interés se reproduce en la Tabla 5.2 de la presente tesis. Dicha tabla indica rangos observados (mínimo y máximo) y valores típicos por defecto de los tiempos medios por persona empleados tanto en movimientos de subida como de bajada de pasajeros ('tiempos individuales de servicio al pasajero' o '*individual passenger service times*'). Estos valores se refieren en principio a sistemas de autobuses (independientemente de que sean convencionales o de tipo BHLS/BRT<sup>94</sup>), pero los datos proporcionados por la tabla resultan también de

<sup>93</sup> Con densidades medias inferiores a este valor, se puede suponer que los pasajeros de pie (en caso de existir) disponen de suficiente espacio en el interior del vehículo para situarse en puntos del mismo que no afecten significativamente a los procesos de entrada y salida de viajeros.

<sup>94</sup> Una diferencia habitual es que los sistemas BRT y BHLS están generalmente dotados de acceso a nivel entre andén y piso del vehículo (en los sistemas europeos normalmente mediante la utilización de vehículos de piso bajo y la construcción de paradas con andenes algo elevados). En el caso de los sistemas de autobús convencional, cada vez es mayor la implantación de vehículos de piso bajo (hasta el punto de convertirse prácticamente en un estándar en la mayoría de explotaciones), pero la falta de andenes elevados en las paradas hace que persista un cierto desnivel vertical en la subida y bajada de los vehículos.

notable utilidad para sistemas ferroviarios de tipo LRT y tranviarios en la medida en que características fundamentales como el tipo de sistema de pago o validación del título de viaje y el desnivel entre andén y piso del vehículo sean coincidentes en ambos tipos de modos. En relación con este último aspecto, debe tenerse presente que los tiempos incluidos en la tabla están referidos a condiciones de subida/bajada al mismo nivel entre andén y vehículo. En aquellos casos en los que el andén y el piso del vehículo están a distinto nivel para el acceso y salida de viajeros, se recomienda (TCRP, 2013: p. 6.7) incrementar los tiempos indicados en la tabla en 0.5 s/prs para escalones estándar (este incremento se ampliaría a 1.0 s/prs para el caso de autocares del estilo de los empleados en transporte interurbano). Por otra parte, recuérdese que, a diferencia de la Tabla 5.2, el tiempo medio por persona y por movimiento utilizado en el modelo no distingue explícitamente entre movimientos de subida y de bajada, por lo que una razonable aproximación a este valor, como se ha indicado anteriormente, sería la semisuma de los tiempos unitarios de subida y de bajada que correspondan a unas determinadas condiciones. Además, para una mayor precisión, los tiempos indicados en la tabla deberían ponderarse según los porcentajes de utilización por parte de los pasajeros de cada uno de los métodos disponibles de pago/cobro de las tarifas.

**Tabla 5.2.** Tiempos individuales de servicio al pasajero en movimientos de entrada y salida de viajeros en sistemas de autobuses con subida/bajada a nivel.

Situación (tipo de movimiento y sistema de pago)	Rango observado [s/prs]	Tiempo propuesto por defecto [s/prs]
<b>Subida de pasajeros</b>		
Acceso sin cobro de tarifa	1.75 – 2.5	1.75
Solo inspección visual	1.6 – 2.6	2.0
Ticket sencillo o bono en la caja de cobro	2.9 – 5.1	3.0
Cambio exacto en la caja de cobro	3.1 – 8.4	4.5
Validación mecánica de ticket	3.5 – 4.0	4.0
Tarjeta de banda magnética	3.7 – 6.5	5.0
Tarjeta inteligente	2.5 – 3.2	2.75
<b>Bajada de pasajeros</b>		
Puertas delanteras	1.4 – 3.6	2.5
Puertas traseras	1.2 – 2.2	1.75
Puertas traseras con validación de salida mediante tarjeta inteligente	3.4 – 4.0	3.5

Fuente: TCRP (2013: p. 6.7, *Exhibit 6.4*).

En relación específicamente con los modos basados en tecnologías ferroviarias, el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: p. 8.24-8.27) también incluye información sobre los tiempos por persona de entrada y salida de pasajeros. En este caso utiliza el concepto de tiempo de flujo (*flow time*), definido como el tiempo consumido por cada pasajero entrante o saliente para cruzar las puertas del vehículo, por cada fila o hilera de flujo que la anchura de aquellas permita (*time per passenger per single stream*). Este concepto no deja de ser prácticamente equivalente a los anteriormente expuestos, si se tiene en cuenta que cada canal de paso (de entrada o de salida) se define precisamente como aquel que permite el flujo simultáneo de una única fila o hilera de pasajeros. Dicha referencia incluye tiempos observados en diversos sistemas ferroviarios de Estados Unidos y Canadá (TCRP, 2013: p. 8.25, *Exhibit 6.12*), muchos de ellos correspondientes a modos ferroviarios de alta capacidad con infraestructuras segregadas, como ferrocarril de cercanías, '*commuter rail*', o metro subterráneo. A modo de síntesis, el *Exhibit 6.13* (TCRP, 2013: p. 8.26) señala tiempos medios para distintos tipos de modos ferroviarios. Así, para sistemas LRT con vehículos de piso bajo se indican tiempos de 2.3–2.5 s/prs, sin apenas diferencia entre movimientos de entrada y de salida. Para sistemas LRT con desnivel de subida/bajada, se señalan tiempos de 3.7 s/prs para los flujos de entrada, 3.2 s/prs para flujos de salida, y 5.25 s/prs para canales de paso con flujos mixtos de subida y de bajada. Además, en el caso de sistemas LRT con desnivel de subida/bajada y pago de la tarifa a bordo, los tiempos de los flujos de entrada se elevan a 4.25 s/prs (el

tiempo de los flujos de salida no se vería afectado por este hecho). Los sistemas manuales de cobro de tarifas añadirían entre 1 y 3 s por pasajero (TCRP, 2013: p. 8.26).

Otra referencia donde se pueden consultar tiempos por persona propuestos para cada tipo de movimiento de entrada o salida de los vehículos de transporte público se encuentra en Ceder (2007: p. 531-533). En este caso, dichos tiempos aparecen recogidos bajo el concepto de tiempo marginal de parada o estación por cada pasajero embarcado o apeado (*marginal dwell time per boarding/alighting passenger*), que es de nuevo equivalente a los anteriores a efectos prácticos.

### 5.5.2. Factor de eficacia unitaria de los canales de paso

Dado un determinado tipo de movimiento (o bien de entrada o bien de salida del vehículo de transporte público) para el cual estén habilitados más de un único canal de paso, el reparto del número de pasajeros entrantes o salientes entre los distintos canales de paso disponibles no suele ser totalmente uniforme, sino que unos canales reciben un mayor volumen de usuarios que otros. Esto provoca, a su vez, que el tiempo necesario para servir a todos los pasajeros que utilizan un mismo canal de paso sea distinto en cada uno de los canales<sup>95</sup>, siendo el mayor de todos ellos el que condiciona la duración de la parada. Así pues, por ejemplo, el tiempo que un vehículo con 2 canales de entrada debería permanecer detenido en una determinada parada mientras sirve un cierto volumen de pasajeros entrantes no es igual a la mitad ( $\frac{1}{2}$ ) del tiempo que, *ceteris paribus*, se habría empleado si solo tuviese un único canal de entrada, sino que es un poco mayor que dicha mitad. Esta misma idea se aplicaría sucesivamente para tres, cuatro, o más canales de entrada. Se produce, en resumen, un efecto de rendimiento marginal decreciente al añadir canales de paso adicionales, ya que algunos de dichos canales permanecen relativamente infrutilizados en comparación con otros.

La incorporación de este efecto a la modelización se lleva a cabo a través de un factor de eficacia unitaria de los canales de paso, de forma que el número de canales de paso realmente disponibles para un determinado tipo de movimiento, al ser multiplicado por dicho factor de eficacia unitaria, queda reducido a un número equivalente de canales efectivos. Este último, que es en general un número real, representa la cantidad de canales que bastarían para obtener una reducción del tiempo de entrada o salida del conjunto de pasajeros igual a la producida por el número de canales realmente existente si el rendimiento del proceso fuese perfecto (es decir, si los pasajeros se repartiesen de tal forma que los tiempos empleados en cada uno de los canales de paso fuesen homogéneos entre sí). Por tanto, es el número entre el cual se ha de dividir el tiempo que habría sido preciso para servir un determinado volumen de usuarios si solo existiese un único canal de paso al objeto de estimar el tiempo de servicio a pasajeros realmente empleado con el número de canales de paso disponible en los vehículos.

El reparto del volumen de pasajeros entrantes o salientes entre los distintos canales de paso, así como los correspondientes tiempos empleados en cada uno de los canales para servir al número de usuarios que utilicen dicho canal, están sujetos a un apreciable nivel de incertidumbre. Por ello, resulta apropiado que el factor de eficacia unitaria de los canales de paso sea tratado, en el contexto de la modelización planteada, como una variable aleatoria. En este sentido, se propone el uso de distribuciones triangulares de probabilidad, caracterizadas mediante sus valores de mínimo, máximo y moda. Estos valores han de ser seleccionados en función del número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) con que estén equipadas las unidades de transporte previstas en cada caso (variable  $Ndc_n^m$ ), siempre que dicho número sea mayor que uno. Por tanto, es necesario indicar, para todas aquellas combinaciones de índices  $m$  (modo de transporte público) y  $n$  (subtipo de vehículos o unidades de transporte de dicho modo) tales que  $Ndc_n^m > 1$ , los siguientes conjuntos de parámetros como variables de entrada del modelo:

<sup>95</sup> De hecho, incluso aunque el reparto del número de pasajeros entre los distintos canales de paso fuese uniforme, el tiempo necesario en cada canal sería en general diferente, debido a que en realidad cada usuario individual emplea un tiempo distinto en función del medio de pago utilizado, de características personales, de circunstancias aleatorias, etc. (a pesar de que a efectos de cálculo se simplifiquen dichos tiempos individuales mediante la utilización de un único valor medio).



$$\langle fdpmin_n^m, fdpmax_n^m, fdpmod_n^m \rangle$$

con:  $m \in \{0, R, B\}$  ;  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$

siendo  $fdpmin_n^m$ ,  $fdpmax_n^m$  y  $fdpmod_n^m$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de eficacia unitaria a aplicar a los canales de paso de las unidades de transporte o vehículos pertenecientes al modo  $m$  de transporte público y a su subtipo o clase  $n$ , dado su correspondiente número limitante de canales (de entrada o de salida)  $Ndc_n^m$ . Estas variables de entrada son de tipo adimensional.

Un valioso punto de partida para el establecimiento de valores de referencia u orientativos de este factor de eficacia unitaria de los canales de paso se encuentra en el *Exhibit 6.58* del '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: p. 6.68), en el cual se indican los porcentajes de pasajeros que utilizan el canal de entrada o de salida con mayor ocupación —que por tanto condiciona la duración del tiempo de parada— para distintos números de canales de paso disponibles. Estos porcentajes se encuadran en situaciones en las que los pasajeros podrían elegir libremente qué canal de entrada o de salida usar, al no estar restringidos a tener que utilizar un único canal exclusivo para un determinado medio de pago<sup>96</sup>.

El valor inverso de la fracción de pasajeros que utilizan el canal de paso con mayor ocupación constituye, a igualdad de tiempos individuales por pasajero, el número equivalente de canales efectivos. A su vez, este último, al ser dividido entre el número de canales de paso realmente disponible en los vehículos o unidades de transporte, proporciona el factor de eficacia unitaria de dichos canales. Este proceso se resume en la Tabla 5.3, donde los resultados finalmente obtenidos en la última columna pueden interpretarse como un valor central (media o moda<sup>97</sup>) de las distribuciones triangulares de probabilidad planteadas para el modelo. Los mínimos y máximos de estas distribuciones se fijarían en consonancia con dichos valores (por ejemplo, mediante unos porcentajes de reducción y de incremento sobre el valor central). En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que los máximos nunca podrían ser mayores de 1 y los mínimos tampoco podrían ser inferiores a  $1/Ndc_n^m$ .

**Tabla 5.3.** Cálculo de valores orientativos del factor de eficacia unitaria de los canales de paso según el número de canales disponibles en los vehículos o unidades de transporte.

Nº de canales de paso (variable $Ndc$ )	Porcentaje de pasajeros a través del canal con mayor ocupación	Nº equivalente de canales efectivos	Factor de eficacia unitaria de los canales
2	60% <sup>(a)</sup>	$1/0.60 = 1.6667$	$1.6667/2 = 0.8333$
3	45%	$1/0.45 = 2.2222$	$2.2222/3 = 0.7407$
4	35%	$1/0.35 = 2.8571$	$2.8571/4 = 0.7143$
6	25%	$1/0.25 = 4.0000$	$4.0000/6 = 0.6667$

<sup>(a)</sup> Para el caso en el que el número limitante de canales de paso es igual a 2, se ha adoptado el porcentaje que corresponde a movimientos de subida.

### 5.5.3. Índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros

Un elemento adicional de gran relevancia en la relación entre el número medio de pasajeros que acceden a cada unidad de transporte o vehículo durante cada uno de los trayectos entre las terminales y el tiempo total consumido para la entrada y salida de viajeros a lo largo de todas las paradas o

<sup>96</sup> Originalmente, el *Exhibit 6.58* del '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: p. 6.68) se encuentra referido específicamente a situaciones con entrada permitida a través de todas las puertas disponibles, con acceso sin cobro de tarifa o con pago previo de la misma. Se asume, no obstante, que su uso puede extenderse a todas aquellas situaciones en las que el usuario puede elegir indistintamente entre varios canales válidos de entrada o de salida.

<sup>97</sup> Coincidentes en caso de que la distribución triangular adoptada sea simétrica.

estaciones existentes es la posible simultaneidad (o falta de la misma) que puede producirse entre los procesos de subida y de bajada de pasajeros en cada una de dichas paradas o estaciones. A lo largo de cada uno de estos trayectos entre terminales, el número de viajeros que suben a un vehículo o unidad de transporte ha de ser, salvo casos singulares, igual al número de bajadas que se producen, por lo que a cada pasajero que hace uso del transporte público le corresponden dos movimientos, uno de entrada y otro de salida. Por tanto podría pensarse —erróneamente en la mayoría de los casos— en multiplicar el número de pasajeros que acceden al vehículo o unidad de transporte público por 2 y por el tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público al objeto de obtener el tiempo total de entrada y salida de viajeros empleado a lo largo de todas las paradas o estaciones<sup>98</sup>. Sin embargo, este planteamiento solo resultaría válido si se produjese la que es, en este sentido, la situación más desfavorable posible: que en cada una de las paradas o bien solo suban viajeros o bien solo bajen pasajeros, sin que en ninguna de ellas haya subidas y bajadas al mismo tiempo. De este modo no tiene lugar ningún tipo de simultaneidad entre los procesos de entrada y salida de pasajeros. En el extremo opuesto, podría concebirse una situación teórica o ideal en la que en todas y cada una de las paradas o estaciones el tiempo necesario para la subida de pasajeros entrantes fuese exactamente igual al empleado para la bajada de los viajeros que se apean (simultaneidad perfecta). En este caso, el número de pasajeros que acceden al vehículo o unidad de transporte público y el tiempo medio por persona por cada movimiento de subida o bajada se multiplicarían tan solo por 1 a efectos de calcular el tiempo total de entrada y salida de pasajeros consumido a lo largo de todas las paradas o estaciones. Constituiría, por tanto, la situación más favorable desde el punto de vista de la minimización del tiempo acumulado de parada o estación. Naturalmente, en la gran mayoría de casos reales de líneas de transporte urbano y metropolitano se producirán situaciones intermedias entre uno y otro extremo.

Por consiguiente, en el tipo de formulación planteada en el modelo desarrollado para el cálculo del tiempo total de entrada y salida de viajeros empleado a lo largo de todas las paradas o estaciones, el número de pasajeros que acceden al vehículo o unidad de transporte público y el tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida del vehículo han de ser multiplicados por un factor cuyo valor estaría comprendido entre 1 y 2. Surge así en esta tesis el planteamiento de expresar dicho factor como la sustracción de 2 menos un índice representativo del mayor o menor grado de simultaneidad entre los procesos de subida y bajada de pasajeros en las paradas o estaciones de un trayecto. Este índice debe tomar, por tanto, valores entre 0 y 1, donde 0 corresponde a una total falta de simultaneidad (situación más desfavorable) y 1 representa la condición teórica de simultaneidad perfecta (situación más favorable). El valor concreto de dicho índice depende de la suma, a lo largo de todas las paradas o estaciones, de las diferencias (en valor absoluto) entre los tiempos necesarios para completar los procesos de entrada y de salida de pasajeros en cada una de esas paradas o estaciones, siendo decreciente a medida que aumentan dichas diferencias. Una definición más estricta del significado y de la posible forma de cálculo de este índice viene dada en la presente tesis por la ecuación 5.1:

$$bas = 1 - \frac{t_1^b + \sum_{n=2}^N |t_n^b - t_n^a| + t_{END}^a}{t_1^b + \sum_{n=2}^N \max\{t_n^b, t_n^a\} + t_{END}^a} \quad (5.1)$$

donde *bas* representa el índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros;  $t_n^b$  y  $t_n^a$  son los tiempos necesarios para servir, respectivamente, todas las entradas y todas las salidas de pasajeros en la parada o estación en la que da comienzo el tramo o segmento *n*-ésimo; *N* indica el número total de tramos o segmentos de la línea (delimitados por la posición de las paradas o estaciones); y, finalmente,  $t_{END}^a$  representa el tiempo de bajada de pasajeros en la terminal de final de línea (de acuerdo al sentido de viaje) o terminal de cierre en el caso de líneas circulares. Nótese que para

<sup>98</sup> A efectos simplificadoros, se asume la existencia de un único canal de entrada y otro de salida en las explicaciones dadas en el presente epígrafe. Recuérdese que la influencia de múltiples canales de paso se introduce en el modelo según las indicaciones dadas en el epígrafe anterior.

configurar la ecuación 5.1 se ha asumido que en las terminales extremas (que marcan el inicio y final de cada trayecto) los procesos de acceso y salida de viajeros se producen por separado, al pertenecer a trayectos distintos (esta presunción puede ser algo más dudosa en el caso de líneas circulares, dependiendo de la forma de operación de las mismas).

De acuerdo a la definición matemática dada en la ecuación 5.1, se deduce que el valor del índice de simultaneidad entre los procesos de subida y bajada de pasajeros está estrechamente ligado a los volúmenes de viajeros que entran y que salen de los vehículos de transporte público en cada una de las paradas o estaciones. Sin embargo, de acuerdo al planteamiento general de la estructura de datos del modelo, dichos volúmenes no tendrían por qué ser necesariamente conocidos (especialmente en el caso de las bajadas, para las que en muchos casos no están implantados sistemas de registro o contabilización automática), de tal modo que se emplea como variable de entrada simplemente el volumen total de subidas registradas a lo largo de la línea (por cada hora de servicio, dentro de un cierto período horario y en un sentido de circulación determinado), junto con ciertos coeficientes que simplifican las características fundamentales de la forma del perfil de volúmenes de pasajeros en las distintas secciones o tramos de la línea. Este conjunto de datos resultaría sin embargo insuficiente para poder realizar una estimación analítica del valor de la ecuación 5.1. Además, incluso aunque se dispusiera de los volúmenes de pasajeros que suben y que bajan en cada parada o estación, el índice de simultaneidad seguiría presentando unos sensibles niveles de incertidumbre y variabilidad, puesto que depende también de otros factores que a su vez están sometidos a dicha variabilidad, tales como los tiempos por persona empleados tanto en movimientos de subida como de bajada de viajeros o el reparto del volumen de pasajeros entrantes o salientes entre los distintos canales de paso (en caso de que las unidades de transporte estuviesen equipadas con más de un único canal de entrada o de salida).

El planteamiento que de todo ello se deriva consiste en tratar necesariamente el índice de simultaneidad entre los procesos de subida y bajada de pasajeros como una variable aleatoria, adoptándose al respecto distribuciones triangulares de probabilidad. Por tanto, es preciso especificar como datos de entrada del modelo los siguientes conjuntos de parámetros para caracterizar dichas distribuciones triangulares:

$$\langle basmin_{ijk}, basmax_{ijk}, basmod_{ijk} \rangle$$

con:  $i = 1, 2, \dots, NL$  ;  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$  ;  $k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$

siendo  $basmin_{ijk}$ ,  $basmax_{ijk}$  y  $basmod_{ijk}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros en el conjunto de paradas o estaciones de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Se trata nuevamente de variables adimensionales, con valores que en cualquiera de los posibles casos deben cumplir  $basmin_{ijk} \geq 0$  y  $basmax_{ijk} \leq 1$ .

Debido a la propia definición de este índice, no es posible establecer unos valores orientativos o de referencia que tengan una validez general para cualquier línea (al depender en gran medida de características particulares de cada una de ellas), más allá de presuponer que en gran parte de los casos se situará dicho índice en torno a valores intermedios dentro del posible rango de variación del mismo. Por tanto, cuando fuese posible convendría obtener valores aproximados del índice de simultaneidad mediante observaciones particulares o mediciones *in situ*.

#### 5.5.4. Tiempo medio por parada para las operaciones de apertura y cierre de puertas

Otra componente adicional del tiempo de parada o estación (*dwell time*) —aunque generalmente de mucho menor peso relativo— es el tiempo dedicado a los procesos de apertura y cierre de puertas del vehículo o unidad de transporte en cada una de las paradas o estaciones. Esta componente está presente, para cualquiera de los modos de transporte público en estudio, en todas las paradas o

estaciones de una línea (o, como mínimo, en todas aquellas en las que deba subir o bajar algún pasajero)<sup>99</sup>.

Los valores de este tiempo dependen de las características técnicas de los mecanismos de apertura y cierre de puertas de los vehículos. Para los sistemas de transporte público que utilicen autobuses se indican tiempos típicos que oscilan entre 2 y 5 s (TCRP, 2013: pp. 6.6, 6.69). Estos mismos valores se pueden hacer extensibles a sistemas de tranvía o metro ligero, si bien para modos ferroviarios convencionales de alta capacidad (*heavy rail*) se apuntan tiempos de apertura y cierre en el límite superior (5 s) de dicho intervalo (TCRP, 2013: p. 8.31). En cualquier caso, el eventual empleo de minirampas desplegadas en algunos vehículos de BRT/BHLS y metro ligero o tranvía, para cubrir la separación entre el borde del andén y el piso bajo del vehículo y optimizar así las condiciones de accesibilidad a las unidades de transporte, puede incrementar moderadamente los tiempos previamente indicados.

De acuerdo a la variabilidad indicada y a la falta de datos más específicos sobre esta componente adicional del tiempo de parada o estación, se propone que su valor sea tratado en el modelo como una variable aleatoria. Para ello se adoptan nuevamente distribuciones triangulares de probabilidad, de tal modo que se deben indicar como datos de entrada del modelo los siguientes parámetros:

$$\langle octmin_n^m, octmax_n^m, octmod_n^m \rangle$$

con:  $m \in \{0, R, B\}$  ;  $n = 1, 2, \dots, Nvt^m$

siendo  $octmin_n^m$ ,  $octmax_n^m$  y  $octmod_n^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del tiempo dedicado, por cada parada o estación, a las operaciones de apertura y cierre de puertas de las unidades de transporte o vehículos pertenecientes al modo  $m$  de transporte público y a su subtipo o clase  $n$ . Las unidades empleadas en el modelo para expresar numéricamente el valor de estas variables de entrada son segundos [s] (por parada).

### 5.5.5. Coeficiente de tiempo de terminales

En la operación de una línea de transporte público, los vehículos o unidades de transporte que llegan a una de las terminales de inicio o final de la línea (o a la terminal de cierre en el caso de líneas circulares) deben generalmente permanecer detenidos en las mismas durante un determinado tiempo adicional al que sería estrictamente necesario para la subida y bajada de pasajeros en dicha terminal. A este tiempo adicional se le denomina tiempo de terminal (*terminal time*). Los motivos de la inclusión de los tiempos de terminal en el proceso de operación de una línea están relacionados con necesidades tales como: el giro (cambio de sentido) de los vehículos o unidades de transporte (o cambio de cabina de conducción en el caso de vehículos de metro ligero o tranvía bidireccionales) en las terminales extremas de inicio y final de trayecto<sup>100</sup>; el cumplimiento de los tiempos de descanso de los conductores; la realización de ajustes entre distintos períodos horarios; la recuperación, mediante estos tiempos de margen, de posibles retrasos que se hayan acumulado durante el trayecto sin que afecten a los subsiguientes viajes; y, por añadido, el mantenimiento de intervalos de operación uniformes (Vuchic, 2005: p. 15; Molinero y Sánchez, 2005: p. 404).

El tiempo total de terminales en un ciclo completo (es decir, incluyendo ambas terminales si la línea es longitudinal de doble sentido y solo una —la de cierre— en el caso de líneas circulares) suele relacionar-

<sup>99</sup> Debe recordarse la existencia de una componente adicional, el '*boarding lost time*', que es el tiempo transcurrido desde que las puertas se abren hasta el comienzo de la entrada del primer pasajero. No obstante, esta componente no ha sido explícitamente incluida dentro del modelo de la presente tesis, ya que solo empezaría a tener valores mínimamente relevantes cuando el número de espacios o zonas de embarque/desembarque de pasajeros en las paradas sea elevado (tres o más). Solo excepcionalmente podría ser este el caso de algunas paradas de los sistemas analizados en esta tesis. Por el contrario, para paradas con un solo espacio o zona de embarque/desembarque de viajeros (caso más típico), el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: p. 6.69) establece que el '*boarding lost time*' es nulo.

<sup>100</sup> Nótese que estas operaciones de cambio de sentido no son generalmente necesarias en el caso de líneas circulares.

se con la suma de los tiempos de operación<sup>101</sup> necesarios para dar una vuelta completa a la línea (lo que incluye ambos sentidos en el caso de líneas convencionales o longitudinales) mediante un factor de proporcionalidad, que recibe el nombre de coeficiente de tiempo de terminales (usualmente denotado como  $\gamma$ ). El establecimiento de una relación de tipo proporcional se justifica por aspectos de regulación laboral (los contratos o convenios pueden estipular que un cierto porcentaje del horario de trabajo se debe dedicar al descanso del conductor), así como por las necesidades de recuperación de retrasos (ya que su probabilidad de aparición y la propagación y cuantía de los mismos se incrementan cuanto mayor sea el tiempo de operación de la línea). Así pues, se puede definir el coeficiente  $\gamma$  de tiempo de terminales mediante la siguiente relación (Vuchic, 2005: p. 15)<sup>102</sup>:

$$\gamma = \frac{t'_t + t''_t}{T'_o + T''_o} \quad (5.2)$$

donde  $t'_t$  y  $t''_t$  representan el tiempo de terminal en cada una de las terminales extremas de la línea, mientras que  $T'_o$  y  $T''_o$  indican los tiempos de operación de cada uno de los sentidos de circulación de dicha línea. Esta relación, tal como aparece representada en la ecuación 5.2, estaría especialmente particularizada para líneas convencionales, es decir, longitudinales de doble sentido. En el caso de líneas circulares —ya sean de sentido único o con operación diferenciada en ambos sentidos— solo existen una terminal (la de cierre) y un único sentido de circulación dentro de cada ciclo o vuelta completa a la línea, por lo que se suprimen los términos  $t'_t$  y  $T'_o$  en la ecuación 5.2 (o, sin necesidad de modificar la ecuación, se impone  $t'_t=0$  y  $T'_o=0$  cuando la línea sea de tipo circular).

De acuerdo a Vuchic (2005: p. 15), el coeficiente  $\gamma$  está generalmente comprendido entre 0.10 y 0.30, con un valor medio que típicamente se sitúa en torno a 0.15. Por su parte, Molinero y Sánchez (2005: p. 404) sitúan este rango típico entre 0.12 y 0.18. Estas fuentes apuntan, no obstante, algunas singularidades y particularizaciones en función del tipo de línea y de las características del modo de transporte público. Así, por ejemplo, para algunos modos con muy alta fiabilidad de horarios (tales como el metro subterráneo y el ferrocarril de cercanías) los tiempos de terminal pueden ser fijos independientemente de la longitud de la línea (y, por tanto, de su tiempo de operación). En el caso de líneas circulares esta situación puede ser llevada al extremo, de forma que se opere sin ningún tiempo de terminal ( $\gamma=0$ ). Por otra parte, a aquellos modos que operen en tráfico mixto (como, por ejemplo, el autobús convencional), o con una significativa interferencia del tráfico general, se les concede a menudo tiempos de terminal más prolongados en horas punta que en horas valle, de forma que dispongan de un mayor margen para la recuperación de retrasos causados por la congestión del tráfico. Por último, se indica que en líneas que operan con intervalos muy amplios, los tiempos de terminal (una vez ajustados conforme al tiempo de ciclo<sup>103</sup>, que ha de ser un múltiplo del intervalo) pueden acabar resultando muy altos, con valores del coeficiente  $\gamma$  por encima de 0.30.

En consideración de la importante variabilidad que puede presentar el coeficiente de tiempo de terminales y de su probable dependencia de algunos factores externos (regulaciones laborales, convenios colectivos o de empresa, etc.), se propone que su valor sea tratado como una variable aleatoria en el marco de la modelización desarrollada. Así pues, se adoptan al respecto distribuciones triangulares de probabilidad, siendo preciso especificar los siguientes conjuntos de parámetros como datos de entrada del modelo:

<sup>101</sup> El tiempo de operación es el transcurrido desde la salida de un vehículo o unidad de transporte de una de las terminales hasta su llegada a la terminal opuesta de la línea (o a la misma terminal de partida —terminal de cierre— en el caso de líneas circulares). En el contexto de esta tesis, se van a considerar también incluidos en el tiempo de operación los tiempos dedicados a la subida y bajada de viajeros en las terminales de inicio y final de trayecto, de modo que estos quedan excluidos del propio tiempo de terminales.

<sup>102</sup> A diferencia de la fórmula originalmente presentada por Vuchic (2005: p. 15), en la ecuación 5.2 se contempla la posibilidad general de que los tiempos de operación puedan ser diferentes en cada uno de los sentidos de circulación.

<sup>103</sup> El tiempo de ciclo es el tiempo transcurrido entre dos partidas consecutivas desde una misma terminal de un vehículo o unidad de transporte. Análogamente, puede definirse también como el tiempo que teóricamente debe tardar en pasar el mismo vehículo o unidad por un punto determinado de la línea, en el mismo sentido de avance, dos veces seguidas.

$$\langle \gamma min_{ij}^m, \gamma max_{ij}^m, \gamma mod_{ij}^m \rangle$$

con:  $m \in \{0, R, B\}$  ;  $i = 1, 2, \dots, NL$  ;  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$

siendo  $\gamma min_{ij}^m$ ,  $\gamma max_{ij}^m$  y  $\gamma mod_{ij}^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del coeficiente de tiempo de terminales que deba ser aplicado en el diseño de la operación de la línea  $i$  durante el período horario  $j$ , supuesta la utilización del modo  $m$  de transporte público. Estos parámetros de entrada son de tipo adimensional, debiendo ser introducidos en el modelo en forma de proporción decimal (no en formato porcentual).

Obsérvese además que los datos a introducir en este apartado se refieren a los límites inferiores impuestos para el coeficiente de tiempo de terminales, de forma que, en la operación real de la línea, el valor de  $\gamma$  resultante de aplicar la ecuación 5.2 ha de ser siempre mayor o igual a dicho límite inferior. Esto se debe a que el tiempo mínimo de terminales que sería estrictamente necesario para cumplir las regulaciones pertinentes ha de ser reajustado superiormente hacia un valor que haga que el tiempo de ciclo sea un múltiplo del intervalo, siendo este tiempo reajustado el que realmente se ha de utilizar en la explotación real de la línea.

## 5.6. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA UTILIZACIÓN (DEMANDA) DE LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

### 5.6.1. Volumen inicial (año base) de viajes en transporte público

La variable  $q_{ijk}^{*0}$  indica el número de pasajeros por hora y sentido que, según datos del año base, acceden al modo de transporte público preexistente (autobús convencional,  $m=0$ ) a lo largo de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Por tanto, representa el volumen horario de viajes que se efectúan en el modo de transporte público en las condiciones particulares mencionadas.

Esta variable equivale al número total de subidas registradas a los vehículos de transporte público por cada hora de servicio a lo largo de una determinada línea, en un determinado período horario (relativamente homogéneo) y en un sentido de circulación determinado. Se expresa por tanto en unidades de pasajeros (genéricamente, personas realizando un viaje) por hora [prs/h] para cada uno de los posibles sentidos de viaje.

### 5.6.2. Coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda

La variable  $\sigma_{ijk}$  representa el coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Se trata de una variable adimensional.

A efectos de la presente tesis, se ha definido el coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda (S.M.D.) como el cociente entre el volumen de pasajeros que atraviesan, en un determinado sentido, la S.M.D. de la línea de transporte público durante una hora (designado genéricamente  $P_{max}$ , y que será equivalente en significado a las variables del modelo  $PM_{ijk}^*$  y  $PM_{ryijk}^{TS}$ , como se verá en el epígrafe 8.3.2.1) y el número total de pasajeros por hora que hacen uso del servicio (subidas totalizadas a lo largo de la línea) en ese mismo sentido (designado genéricamente como  $q_{PT}$ , e indicado en el año base por la variable del modelo  $q_{ijk}^{*0}$ ). Así pues, el coeficiente  $\sigma$  se puede definir matemáticamente como:

$$\sigma = \frac{P_{max}}{q_{PT}} = \frac{\max_{n=1,\dots,N} \{P_n\}}{\sum_{n=1}^N bp_n} = \frac{\max_{n=1,\dots,N} \left\{ P_{term} + \sum_{m=1}^n bp_m - \sum_{m=2}^n ap_m \right\}}{\sum_{n=1}^N bp_n} \quad (5.3.a)$$

donde  $P_n$  representa el volumen de pasajeros por hora que atraviesan el tramo o segmento  $n$ -ésimo de la línea en un determinado sentido, mientras que  $bp_n$  (*boarding passengers*) y  $ap_n$  (*alighting passengers*) simbolizan, para ese mismo sentido de viaje, el número de pasajeros por hora que suben (en el caso de  $bp_n$ ) o bajan (en el caso de  $ap_n$ ) a/de los vehículos de transporte público en la parada o estación en la que da comienzo el tramo o segmento  $n$ -ésimo. El número total de tramos o segmentos de la línea (delimitados por la posición de las paradas o estaciones) está representado en la ecuación 5.3.a por  $N$ . Por su parte,  $P_{term}$  representa el volumen horario de pasajeros que continúan su viaje en la terminal de inicio del recorrido (terminal de cierre en el caso de líneas circulares). Según el tipo de línea bajo análisis, se pueden distinguir dos casos principales:

- En líneas convencionales (longitudinales de doble sentido), el volumen de pasajeros que continúan viaje en las terminales o cabeceras de línea es nulo, es decir, todos los pasajeros que llegan hasta una terminal o cabecera se apean en ella. Por tanto  $P_{term} = 0$  en este tipo de líneas.
- En las líneas de tipo circular, el número de pasajeros que continúen su viaje a través de la terminal de cierre puede ser notablemente distinto de cero (una parte de los viajeros que llegan hasta dicha terminal se apean, por ser ese su destino, pero otra parte puede permanecer en los vehículos para continuar su viaje hacia un destino posterior, especialmente si la línea circular es operada en sentido único). Operacionalmente, son pasajeros que pasan del tramo  $N$  al tramo 1 sin bajarse en la terminal de cierre (estación en la que da comienzo el tramo 1). Por tanto, se tiene:  $P_{term} = P_N - ap_1 \geq 0$  y  $P_1 = P_{term} + bp_1$ . Además, para que los volúmenes de pasajeros sean homogéneos en el tiempo a lo largo del período horario analizado se ha de cumplir:  $\sum_1^N bp_n = \sum_1^N ap_n$ .

Con la nomenclatura del modelo, la variable  $\sigma_{ijk}$  se puede expresar mediante la siguiente relación (equivalente en significado a la primera igualdad de la ecuación 5.3.a, particularizada para los datos del año base correspondientes a cada línea, período horario y sentido):

$$\sigma_{ijk} = \frac{PM_{ijk}^*}{q_{ijk}^{*0}} \quad (5.3.b)$$

En resumen, el coeficiente  $\sigma$  indica la fracción del total de usuarios de una línea de transporte público que efectivamente atraviesan su sección de máxima demanda.

Obsérvese que el coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda aquí establecido coincide con el inverso del coeficiente de intercambio de pasajeros (*coefficient of passenger exchange*) según este último se define por Vuchic (2005: pp. 40-41) en su forma simplificada, para líneas en las que las curvas de distribución espacial de subidas y de bajadas a lo largo de las paradas o estaciones de la línea presentan una única intersección (y por tanto, existe un único máximo relativo en la distribución espacial del número de pasajeros que atraviesan las distintas secciones o tramos de la línea).

Nótese que, por definición, se ha de cumplir siempre:  $0 < \sigma_{ijk} \leq 1$ .

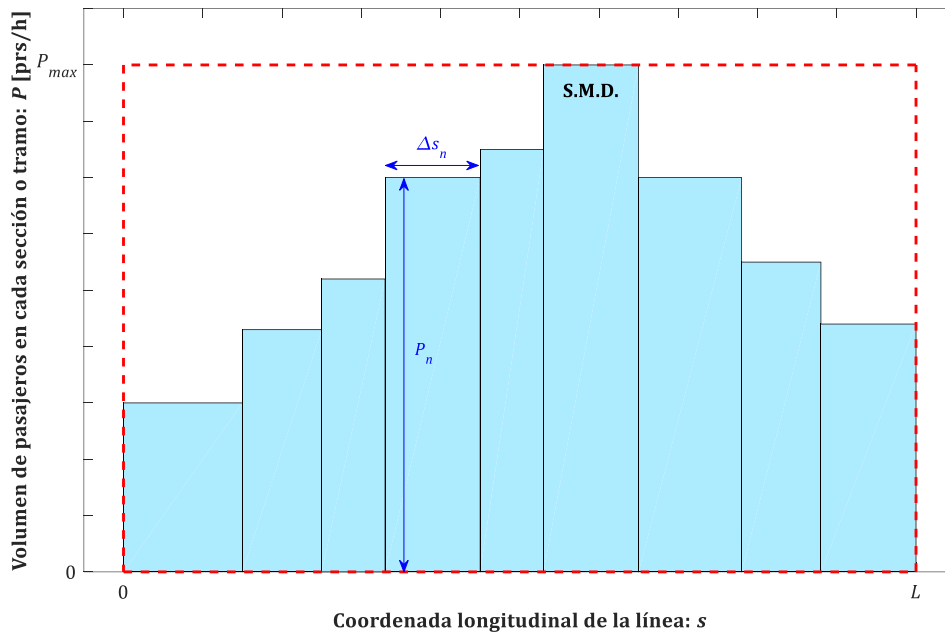
### 5.6.3. Coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea

La variable  $\delta_{ijk}$  representa el coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el

sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i=LT \vee TypL_i=RT$ ;  $k=1$  si  $TypL_i=RO$ ). Es también una variable adimensional.

El coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de una línea, definido en esta tesis, mide la proporción entre el volumen medio de pasajeros durante el recorrido de la línea a lo largo de sus diferentes secciones, tramos o segmentos (designado genéricamente  $P_{av}$ ) y el volumen de pasajeros existente en la sección de máxima demanda (genéricamente  $P_{max}$ ), todo ello durante un cierto período horario y en un determinado sentido de viaje. Este parámetro coincide con el inverso del coeficiente de variaciones del flujo (*coefficient of flow variations*) según la definición del mismo dada por Vuchic (2005: pp. 39-40).

Supuesta una curva  $P(s)$  (volumen horario de pasajeros que atraviesan cada punto de la línea en función de  $s$ , siendo  $s$  la coordenada longitudinal de la línea), se podría deducir gráficamente el coeficiente  $\delta$  como el cociente entre el área bajo dicha curva (dada matemáticamente por la integral entre 0 y  $L$  de  $P(s) \cdot ds$ ) y el área del rectángulo  $P_{max} \times L$  (donde  $P_{max}$  coincide con el valor máximo de la curva  $P(s)$  y  $L$  es la longitud de la línea). Dado que en la operación práctica  $P(s)$  ha de responder necesariamente a la forma de una función escalonada, en la que las discontinuidades corresponden a la posición de las paradas o estaciones, se puede discretizar el área bajo dicha función como el sumatorio, para cada uno de los  $N$  segmentos o tramos entre paradas, del volumen horario de pasajeros en el tramo ( $P_n$ ) por la longitud del mismo ( $\Delta s_n$ ). Esta es la situación representada gráficamente en la Figura 5.1, en la que se reproduce un ejemplo simple de perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de una línea de longitud  $L$ .



**Figura 5.1.** Ejemplo simplificado de perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de una línea, con representación de las áreas involucradas en la deducción gráfica del coeficiente de compacidad  $\delta$ .

En cualquier caso, el coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de una línea queda definido formalmente por la ecuación 5.4:

$$\delta = \frac{P_{av}}{P_{max}} = \frac{1}{P_{max}} \cdot \frac{\int_0^L P(s) \cdot ds}{L} = \frac{\sum_{n=1}^N P_n \cdot \Delta s_n}{P_{max} \cdot L} = \frac{\sum_{n=1}^N \left( P_{term} + \sum_{m=1}^n bp_m - \sum_{m=2}^n ap_m \right) \cdot \Delta s_n}{\max_{n=1, \dots, N} \left\{ P_{term} + \sum_{m=1}^n bp_m - \sum_{m=2}^n ap_m \right\} \cdot L} \quad (5.4)$$



donde  $bp_m$ ,  $ap_m$  y  $P_{term}$  presentan los mismos significados que se indicaron para la ecuación 5.3.a.

De nuevo, se cumplirá necesariamente por definición:  $0 < \delta_{ijk} \leq 1$ .

Obsérvese además que en la Figura 5.1 el sumatorio  $\sum_n P_n \cdot \Delta s_n$  equivale al área total sombreada en color azul claro, mientras que el producto  $P_{max} \cdot L$  está representado por el área que quedaría contenida dentro del rectángulo delimitado por las líneas rojas discontinuas. El cociente entre ambas áreas determinaría gráficamente el valor del coeficiente  $\delta$ .

#### 5.6.4. Coeficiente de pico intrahorario o de hora punta

La variable  $PHC_{ijk}$  indica el coeficiente de pico intrahorario o coeficiente de hora punta observado en la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Se trata, nuevamente, de una variable de tipo adimensional.

El coeficiente de pico intrahorario o de hora punta (*peak hour coefficient*) permite tener en cuenta un mayor nivel de detalle sobre las heterogeneidades o variaciones temporales del volumen de pasajeros que tienen lugar a lo largo de un cierto período horario, ya que su definición alude al mayor volumen de pasajeros (por unidad de tiempo) alcanzado durante un intervalo de tiempo de duración relativamente corta (inferior en todo caso a la del período horario en estudio). La duración de estos períodos intrahorarios de detalle podría variar según las necesidades particulares de cada análisis, pero generalmente se definen —al menos en períodos horarios correspondientes a horas punta— con una duración de 15 minutos (e incluso inferiores en algunos casos). Así pues, dada la sección de máxima demanda de una determinada línea durante un cierto período horario y en un determinado sentido de viaje, el coeficiente de pico intrahorario o coeficiente de hora punta ( $PHC$ ) se define (Vuchic, 2005: p. 48) como el cociente o ratio entre 4 veces el máximo número de pasajeros contabilizado en la sección durante un período de detalle de 15 minutos de duración (denotado como  $p_{15}$  [prs/(15min·dir)]) y el volumen horario medio en dicha sección de máxima demanda ( $P_{max}$  [prs/(h·dir)]). Es decir:

$$PHC = \frac{4 \cdot p_{15}}{P_{max}} \quad (5.5.a)$$

Con la definición dada por la ecuación 5.5.a, los valores del coeficiente de pico intrahorario o de hora punta pueden estar teóricamente comprendidos entre 1 (volúmenes constantes durante el período horario) y 4 (caso extremo, de carácter más bien hipotético, en el que solo existiese tránsito de pasajeros durante uno de los períodos de 15 minutos, siendo nulo en el resto).

A efectos de cálculo, el coeficiente de pico intrahorario o de hora punta se va a utilizar al objeto de convertir el volumen medio de pasajeros por hora que atraviesan la sección de máxima demanda (dado por las variables del modelo  $PM^*_{ijk}$  y  $PM^{rs}_{yijk}$ ) en el volumen de diseño (variables  $PD^*_{ijk}$  y  $PD^{rs}_{yijk}$ ), el cual se emplea durante el desarrollo del modelo para el dimensionamiento del servicio de transporte público.

Obsérvese que la nomenclatura empleada para relacionar los volúmenes horarios medios y los volúmenes de diseño o volúmenes pico puede variar a lo largo de la literatura técnica sobre transporte público, aunque el concepto subyacente sea realmente el mismo. En particular, el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' de EE.UU. define (TCRP, 2013: pp. 3.17-3.18) y utiliza (TCRP, 2013: pp. 6.84-6.85, 6.129, 8.65-8.66) el término '*peak hour factor*' o  $PHF$  (factor de pico intrahorario o de hora punta) de un modo tal que representa exactamente el valor inverso del coeficiente  $PHC$ , tal como este último es definido por Vuchic (2005: p. 48). Se tiene por tanto:

$$PHF = \frac{P_{max}}{4 \cdot p_{15}} = \frac{1}{PHC} \quad (5.5.b)$$

De esta forma, el factor *PHF* (cuyos valores teóricos pueden estar comprendidos entre 0.25 y 1) intervendría dividiendo al volumen horario medio de pasajeros en la sección de máxima demanda para obtener el correspondiente volumen pico o volumen de diseño, en lugar de actuar multiplicándolo como sucede con el coeficiente *PHC*. Más allá de esta simple distinción operativa, no existen mayores diferencias conceptuales entre uno y otro término.

En cuanto a los valores prácticos habitualmente observados, el propio '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' (TCRP, 2013: pp. 3.17, 6.85) señala en general un rango típico de variación del factor *PHF* entre 0.60 y 0.95 (lo que equivale a coeficientes *PHC* entre 1.05 y 1.67). Para los sistemas de autobuses, plantea valores por defecto del factor *PHF* (en ausencia de otras informaciones particulares) entre 0.75 y 0.85 (TCRP, 2013: pp. 3.17, 6.85), lo que proporcionaría valores del coeficiente *PHC* entre 1.18 y 1.33. Por su parte, propone para sistemas de tipo LRT un factor *PHF* por defecto de valor 0.75 (TCRP, 2013: pp. 8.65-8.66), que equivale a un coeficiente *PHC* de 1.33. No obstante, deben usarse en cualquiera de los casos valores particulares observados localmente siempre que sea posible.

Finalmente nótese que, a nivel práctico, el coeficiente de pico intrahorario o de hora punta (*PHC*) y el coeficiente de utilización de la capacidad programada (*LF*) tendrán efectos superpuestos cuando se apliquen al proceso de dimensionamiento del servicio de transporte público, puesto que, para un cierto volumen horario medio de pasajeros en la sección de máxima demanda ( $PM_{ijk}^*$  o  $PM_{ryjk}^{rs}$  en el modelo), valores altos de *PHC* combinados con valores bajos de *LF* hacen aumentar muy notablemente la frecuencia de operación y/o la capacidad estática de las unidades de transporte que resultan necesarias para cumplir los criterios de diseño del servicio. Esto implicaría que, durante aquellas partes del período horario tomado para la programación del servicio que no corresponden con los picos intrahorarios de demanda, puede llegar a producirse un considerable exceso de capacidad ofertada en relación con el volumen horario medio de pasajeros, ya que, en cierto modo, el coeficiente *PHC* actúa mayorando la demanda horaria al mismo tiempo que *LF* minorla la capacidad útil o aprovechable (véanse epígrafes 8.3.2.2 y 8.3.2.3.a). Por todo ello, resulta recomendable que el valor del coeficiente de utilización de la capacidad programada a adoptar para el dimensionamiento del servicio se establezca de manera coordinada con el coeficiente de pico intrahorario observado.

## 5.7. ESTABLECIMIENTO DE HORIZONTES TEMPORALES Y DATOS PARA LA DIVISIÓN EN FASES O ETAPAS

### 5.7.1. Duración total del horizonte temporal o período de evaluación

La variable *Yap* representa la duración (en número de años) del horizonte temporal o período de evaluación (común a cualquiera de los tres escenarios). De acuerdo a la discretización del tiempo planteada en el modelo, ha de tratarse de un valor entero.

La duración total del horizonte temporal de evaluación ha de incorporar no solamente el período de operación o explotación de los proyectos analizados, una vez puestos en servicio, sino también el período de construcción —o, más genéricamente, de implementación— de dichos proyectos (en este caso, la implantación de los sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT). De hecho, durante esta etapa se producen típicamente la mayor parte de los costes de inversión y pueden tener lugar, adicionalmente, los denominados costes de interrupción, que provienen del conjunto de alteraciones que la construcción de una infraestructura genera a los usuarios del transporte y a la sociedad en su conjunto en forma de congestión, cambios provisionales en otros modos, molestias, ruidos, etc. (de Rus *et al.*, 2010: p. 56).

La duración del horizonte temporal o período de evaluación es un dato a fijar por el analista o evaluador en consideración del tipo de proyectos de inversión y explotación que son objeto de estudio. Idealmente, la duración del horizonte de evaluación debería tender a representar la vida útil del proyecto de transporte, a fin de que el valor terminal o residual de dicho proyecto resulte nulo, quedando excluido

por tanto su cómputo del proceso de evaluación. Sin embargo, en la práctica es habitual que el horizonte de evaluación sea más breve que la potencial vida útil del proyecto, especialmente cuando esta última resulta notablemente extensa. Este hecho se justificaría principalmente por limitaciones prácticas relacionadas con la fiabilidad de las pronósticos a muy largo plazo, ya que extender la evaluación a un período excesivamente prolongado puede dar lugar a severos problemas de información sobre las variables de estudio (de Rus *et al.*, 2010: p. 58). De acuerdo a esta misma fuente, se consideraría razonable un horizonte de evaluación de 30 años para la mayoría de proyectos de transporte que impliquen obras de infraestructura.

En esta línea, la '*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*' de la Dirección General de Política Regional de la Comisión Europea (EC-DGRP, 2008: p. 37) recomendaba horizontes temporales de referencia de 30 años de duración para proyectos ferroviarios y de 25 años para proyectos de carreteras. No obstante, admitía la posibilidad de justificar la adopción de otros horizontes temporales distintos basándose en las características específicas de cada proyecto.

Más específicamente, en el caso de España y en el ámbito urbano, el '*Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades*' (MFOM, 1996: pp. 32-34) proponía un período de evaluación de 20 años, contabilizados desde la puesta en servicio del proyecto. No obstante, debe tenerse presente, como posible cautela al respecto, que dicho manual no está referido específicamente a un análisis coste-beneficio, sino a una evaluación orientada a métodos multicriterio. Por otra parte, proporciona información relevante sobre la posible vida útil de los distintos activos componentes de los proyectos de infraestructuras ferroviarias urbanas (MFOM, 1996: pp. 132-133): (i) actuaciones de obra civil: 75 años; (ii) vías: 25 años; (iii) sistemas de alimentación de energía: 25 años; (iv) señalización y comunicaciones: 20 años; (v) escaleras mecánicas: 20 años; (vi) equipamiento de estaciones: 15 años; (vii) cocheras: 75 años. Frente a esto, propone la utilización de una vida útil de solo 30 años para las infraestructuras de carreteras urbanas. En cuanto a la vida útil de los vehículos de transporte público (MFOM, 1996: p. 138), consigna una duración de 25 años para el material móvil ferroviario y de 12 años para autobuses.

Frente a estos horizontes de evaluación relativamente cortos, el Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT) propugna en sus guías TAG (*Transport Analysis Guidance*) sobre modelización y evaluación del transporte (DfT, 2017b: pp. 3-4) que para aquellos tipos de proyectos —generalmente de gran envergadura— en los que pueda suponerse una vida útil indefinida o ilimitada (con las necesarias actuaciones de mantenimiento y reposición) se tome un período de evaluación para el análisis coste-beneficio de 60 años desde la puesta en servicio del proyecto<sup>104</sup>. No obstante, para aquellos proyectos cuyos activos pueden tener una vida útil limitada o finita se admiten como apropiados períodos de evaluación inferiores a 60 años, seleccionándose dicho período según el juicio debidamente justificado del analista.

Por su parte, el '*Economic Evaluation Manual*' de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: p. 2.16) señala que el período de evaluación debería ser seleccionado de tal forma que recoja al menos el 90% del valor actualizado de todos los futuros costes y beneficios, indicándose que para una tasa de descuento del 6% esto supondría un período estándar de 40 años. De hecho, se especifica un período de evaluación de hasta 40 años tanto para nuevos servicios de transporte público con sus infraestructuras asociadas (NZTA, 2016: p. 3.44), como para mejoras en servicios de transporte público existentes que impliquen una inversión de capital en infraestructuras o en mejoras del propio servicio (NZTA, 2016: p. 3.46). Sin embargo, también se admite en general la posibilidad de adoptar períodos de análisis inferiores a 40 años si se pone de manifiesto que ello resulta apropiado (NZTA, 2016: p. 2.16).

Como conclusión, para el tipo de proyectos objeto de análisis (implementación de sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT) se recomendaría un horizonte temporal de evaluación —incluyendo la fase de implantación— en un rango aproximado entre 30 y 40 años, con la consiguiente modelización de la red o sistema de transporte afectada por dicho proyecto.

<sup>104</sup> Obsérvese que, según DfT (2017b: pp. 4-5), esto no implica necesariamente que la modelización del sistema de transporte deba llegar hasta el final del período de 60 años, sino que a partir del último año realmente modelizado se realizaría una extrapolación de los impactos del proyecto.

Desde el punto de vista del modelo desarrollado, los sucesivos años incluidos en el horizonte temporal de evaluación se numeran secuencialmente con números naturales entre 1 y  $Yap$ . Así pues, se asignaría un valor  $y=1$  para el primer año del horizonte o período de evaluación (dicho año es considerado en el modelo inmediatamente posterior al año base). Además se adopta como hipótesis de modelización que los trabajos destinados a la implantación del nuevo modo de transporte público se ponen en marcha ya en el primer año del período de evaluación, tras la toma de la decisión, en el año base, sobre su hipotética ejecución.

### 5.7.2. Velocidad media de avance en la implantación, en cada línea, de los nuevos modos de transporte público

La duración de la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público estará condicionada, por un lado, por el ritmo o velocidad media de avance (en términos de longitud de línea por unidad de tiempo) en el conjunto de trabajos necesarios para hacer viable, en condiciones adecuadas, la puesta en servicio de los nuevos modos de transporte público y, por otra parte, por la longitud de las propias líneas. Así pues, es preciso definir, en el contexto de las variables de entrada del modelo, ciertos datos relativos a la velocidad media de avance en la implantación, en cada línea, de dichos modos de transporte.

En relación con dicha velocidad media de avance, es preciso diferenciar los valores relativos a uno y otro modo, ya que generalmente se suele asumir que la implantación de los sistemas de tipo BHLS o BRT es, en igualdad de condiciones, más rápida que para los sistemas de metro ligero o tranvía, debido fundamentalmente a la mayor complejidad técnica de estos últimos, a las exigencias más restrictivas para la inserción de su trazado y al mayor esfuerzo inversor requerido para su ejecución. Por otra parte, también puede resultar pertinente diferenciar distintos valores según la línea de la que se trate, ya que aspectos particulares de cada línea relacionados con la estructura de la trama urbana y las características del viario, con los servicios urbanos afectados, con la necesidad de atravesar infraestructuras singulares o con la orografía de la traza, pueden condicionar sensiblemente la velocidad de avance en la implantación de los nuevos modos, haciendo la ejecución de la nueva infraestructura más dificultosa en unos casos que en otros.

En cualquier caso, se vislumbra que la velocidad de avance en la implantación de los nuevos modos es una clara candidata a ser tratada por el modelo como una variable aleatoria, puesto que dicha velocidad —además de la posible indeterminación del valor previsto de antemano— está sujeta en la práctica a variadas fuentes de incertidumbre (tales como variaciones en el ritmo inversor o en la disponibilidad presupuestaria, surgimiento de imprevistos técnicos, cambios en las prioridades de las políticas de movilidad urbana o metropolitana, etc.). Estas incidencias —probablemente junto con la existencia generalizada de un cierto ‘sesgo optimista’ en los proyectos de inversión en infraestructuras de transporte— hacen que, en no pocas ocasiones, el proceso de implantación de estos nuevos sistemas de transporte público esté aquejado de notables retrasos con respecto a los plazos inicialmente previstos, especialmente en el caso de los metros ligeros y tranvías.

En consecuencia, se propone que para estas velocidades medias de avance de la implantación se adopten en el modelo distribuciones triangulares de probabilidad, especificadas mediante los valores de su mínimo, máximo y moda. Por consiguiente es preciso indicar, como datos introducidos al modelo, los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle Vimpm_{i}^s, Vimpm_{i}^s, Vimpm_{i}^s \rangle$$

con:  $s \in \{R, B\}$  ;  $i = 1, 2, \dots, NL$

siendo  $Vimpm_{i}^s$ ,  $Vimpm_{i}^s$  y  $Vimpm_{i}^s$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la velocidad media de avance en la implantación, en la línea  $i$ , del nuevo

modo de transporte público proyectado para el escenario  $s$ . Estos valores se introducen al modelo cuantificados en kilómetros por año [km/a].

Nótese, en cualquiera de los casos, que esta velocidad media de implantación ha de incluir no solamente el avance físico de las obras constructivas, sino también la parte alícuota (por kilómetro de línea) del tiempo adicionalmente requerido para todos los demás trabajos y actividades orientados a posibilitar la ejecución y puesta en servicio del nuevo modo de transporte público (por ejemplo, proyecto constructivo, trabajos preparativos de la traza, instalación de diferentes sistemas, período de pruebas en blanco, etc.).

### 5.7.3. Duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público

De acuerdo a los esquemas de segmentación temporal del horizonte de evaluación planteados en relación con la modelización de la demanda, con la puesta en servicio del nuevo modo de transporte público se da inicio a una primera fase o etapa en su ciclo de vida comercial durante la cual se produce una progresiva readaptación de la demanda a los nuevos atributos de nivel de servicio ofertados por el modo introducido. A esta etapa se la ha denominado fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público. Se asume en el modelo que durante esta fase se produce un cierto retardo entre las variaciones de nivel de servicio (cuantificadas a través del concepto de coste generalizado) introducidas por el nuevo modo de transporte público (en comparación con el servicio de autobús convencional anteriormente en funcionamiento) y la respuesta ante dichas variaciones producida en el comportamiento de la demanda. Este retardo o desfase puede vincularse a efectos de inercia en el comportamiento decisional de los viajeros, así como a la posible necesidad de que transcurra un cierto período de tiempo hasta que el conjunto de los potenciales viajeros hayan asimilado plenamente (preferentemente mediante la experimentación en primera persona) e incorporado a sus decisiones de viaje las ventajas e inconveniencias que el nuevo modo de transporte público les puede reportar.

En relación con esta fase o etapa, es necesario introducir en el modelo algún tipo de previsión sobre su hipotética duración, la cual, además de estar sometida a un notable grado de incertidumbre, presenta en realidad unos límites más bien difusos, carentes de una definición cuantitativa propiamente dicha. En consecuencia, se representa dicha duración mediante una variable aleatoria con distribución triangular de probabilidad, debiendo indicarse los valores asumidos para sus parámetros de mínimo, máximo y moda. Se incorpora al respecto la posibilidad de especificar parámetros diferenciados sobre la duración de esta fase según el tipo de modo de transporte público implantado en cada uno de los dos escenarios pertinentes, es decir, valores distintos para metro ligero o tranvía y para BHLS o BRT. En conclusión, se han de definir en el modelo, como datos de entrada aportados al mismo, los valores <sup>105</sup> de los siguientes parámetros:

$$\langle Nicmin^s, Nicmax^s, Nicmod^s \rangle ; s \in \{R, B\}$$

siendo  $Nicmin^s$ ,  $Nicmax^s$  y  $Nicmod^s$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la duración (en años) estimada para la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público implantado en el caso del escenario  $s$ .

Como orientación genérica, en ausencia de información particularizada que apunte en otro sentido se proponen valores medios de duración de la fase de introducción y consolidación en el entorno de entre 3 y 4 años.

<sup>105</sup> Estos valores no tienen por qué ser necesariamente números enteros.

## 5.8. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA MOVILIDAD Y DEL REPARTO MODAL EN LOS ITINERARIOS O CORREDORES AFECTADOS

Además del modo de transporte público que esté en servicio en cada escenario y en cada año del horizonte temporal o período de evaluación (autobús convencional en tráfico mixto,  $m=0$ , en el caso del año base), se incluyen en la modelización desarrollada las siguientes opciones modales de transporte privado o individual, tanto motorizado como no motorizado y de 'micromovilidad':

- $m=C$ : automóvil particular.
- $m=M$ : moto o ciclomotor.
- $m=V$ : bicicleta o pequeño vehículo urbano de movilidad personal.
- $m=P$ : viajes a pie.

### 5.8.1. Proporción inicial (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público

La variable  $Pcp^*_{ijk}$  indica la fracción o proporción de viajes efectuados en transporte público por parte de usuarios cautivos del mismo con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo (mediante cualquiera de las cinco opciones modales contempladas en el modelo) sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i=LT \vee TypL_i=RT$ ;  $k=1$  si  $TypL_i=RO$ ), según los datos disponibles para el año base. Esta variable es, por tanto, de tipo adimensional, debiendo ser expresado su valor de entrada en el modelo en forma de proporción decimal.

Para un viaje de determinadas características, se considera usuario cautivo del transporte público (*captive transit rider*) a aquel viajero que no dispone de otras alternativas válidas de elección para ese tipo de viaje, generalmente por la indisponibilidad de vehículos motorizados de transporte privado<sup>106</sup> (ya sea como conductor o como acompañante) y por la inviabilidad o impracticabilidad de realizar el viaje a pie o en otros modos no motorizados o de 'micromovilidad' (por razones de distancia excesiva, estado físico, carencia de un entorno urbanístico adecuado para desplazamientos peatonales y ciclistas, etc.). Por consiguiente, en la modelización del reparto modal los usuarios cautivos del transporte público no disponen de la posibilidad efectiva de elegir otras alternativas modales.

### 5.8.2. Proporciones iniciales (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual

La variable  $Pco^*_m_{ijk}$  señala la fracción o proporción de viajes realizados por parte de viajeros que puedan ser considerados cautivos del modo  $m$  de transporte privado o individual (es decir,  $m \in \{C, M, V, P\}$ ) con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo (en cualquiera de las cinco opciones modales contempladas) sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i=LT \vee TypL_i=RT$ ;  $k=1$  si  $TypL_i=RO$ ), según los datos disponibles para el año base. Esta variable también es de tipo adimensional, y, al igual que en el caso anterior, su valor numérico ha de introducirse en el modelo en forma de proporción decimal.

<sup>106</sup> Nótese que la falta de disponibilidad de vehículo motorizado privado no tiene por qué ser necesariamente forzosa, sino que en ocasiones puede ser también fruto de una elección voluntaria. Esta situación será más propensa a darse en aquellas áreas en las que la red de transporte público proporcione un elevado nivel de servicio y garantice una amplia accesibilidad territorial.

Similarmente al caso del transporte público, se consideraría viajero cautivo de un determinado modo de transporte privado o individual a aquella persona a la que, para un viaje de unas características particulares, no le resulte válida ninguna otra opción modal distinta de dicho modo, por lo que, a efectos de modelización, no dispondrá de capacidad de elección entre alternativas modales. Los motivos por los que un viajero, aun existiendo un servicio de transporte público que dé cobertura a su viaje, haya de efectuar un desplazamiento en un determinado modo de transporte distinto del público pueden ser variados. Por ejemplo, en el caso de los modos motorizados privados (automóvil particular y moto o ciclomotor), a un individuo le podría resultar necesario utilizar su vehículo para el desplazamiento analizado si dicho viaje forma parte de un 'tour' o secuencia de viajes en el cual alguna de las etapas o desplazamientos requiere imprescindiblemente la utilización de dicho vehículo privado (por ejemplo, por no existir un servicio de transporte público que cubra satisfactoriamente alguna de dichas etapas o desplazamientos). Otro posible motivo que podría condicionar a un viajero a tener que utilizar imprescindiblemente el modo automóvil sería la necesidad de llevar consigo un equipaje excesivamente pesado o voluminoso. En cuanto a los modos de transporte no motorizado y de 'micromovilidad' (bicicleta o vehículos de movilidad personal y viajes a pie), los motivos por los que pudieran existir viajeros cautivos de alguno de estos modos son más imprecisos, pero en cualquier caso se ha considerado su inclusión en el modelo para dotar a este de una mayor generalidad.

A efectos de consistencia o validez de los datos a introducir, téngase presente que, por definición, la suma de las fracciones o proporciones de viajes efectuados por viajeros cautivos de cada uno de los modos (tanto de transporte público como de transporte privado o individual) nunca puede ser superior a la unidad. Es decir, los valores introducidos han de verificar, para cualquier posible combinación de índices  $i,j,k$ , que  $Pcp^*_{ijk} + Pco^*_{ijk}^C + Pco^*_{ijk}^M + Pco^*_{ijk}^V + Pco^*_{ijk}^P < 1$ . Excepto para algunos casos singulares, esta suma será en general muy inferior a la unidad (de lo contrario, apenas habría viajeros con capacidad de elección entre alternativas modales).

### 5.8.3. Reparto modal inicial (año base)

La variable  $MS^*_{ijk}^m$  indica la cuota de reparto modal general que, según datos del año base, corresponde a cada modo  $m$  de transporte (donde  $m \in \{0, C, M, V, P\}$ ) para aquellos viajes efectuados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Se trata de una variable adimensional, expresada en el modelo como proporción decimal.

Las cuotas de reparto modal general se definen como las fracciones o proporciones de viajes efectuados mediante cada modo de transporte, cuantificadas sobre el conjunto de viajes realizados en todos los modos contemplados independientemente de que el individuo que efectúa el viaje sea un viajero cautivo de un determinado modo o un viajero con capacidad de elección entre alternativas (no cautivo). Estas cuotas de reparto modal general deben ser distinguidas de las cuotas de elección modal (calculadas en el epígrafe 7.10.1), que se determinarán con respecto al subconjunto de viajes realizados únicamente por viajeros no cautivos, es decir, con capacidad de elección entre cualquiera de las opciones modales.

Obsérvese que las cuotas de reparto modal aportadas como datos deberán verificar, para cualquier posible combinación de índices  $i,j,k$ , que su suma para el conjunto de opciones modales consideradas en el modelo sea igual a la unidad:  $MS^*_{ijk}^0 + MS^*_{ijk}^C + MS^*_{ijk}^M + MS^*_{ijk}^V + MS^*_{ijk}^P = 1$ . Además, por coherencia interna de los datos, se debe cumplir indefectiblemente que la cuota de reparto modal general perteneciente a cada modo de transporte sea mayor que la fracción o proporción de viajes que, sobre el total de desplazamientos realizados en todos los modos, corresponde a viajeros cautivos de dicho modo. Es decir, se ha de verificar necesariamente  $MS^*_{ijk}^0 > Pcp^*_{ijk} \wedge MS^*_{ijk}^m > Pco^*_{ijk}^m$  para cualquier posible combinación de índices  $i,j,k$ , con  $m \in \{C, M, V, P\}$ . La diferencia entre ambos términos de las desigualdades proviene de aquellos viajes en el respectivo modo de transporte realizados por viajeros con capacidad de elegir otras alternativas modales disponibles y válidas para su viaje.

#### 5.8.4. Composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje

La categorización básica de los viajes urbanos y metropolitanos según su tipología se ha efectuado en consonancia con la segmentación incluida en Bickel *et al.* (2006: pp. S4-S14, 53-80) para el desarrollo de valoraciones monetarias por defecto de los ahorros unitarios de tiempo de viaje en múltiples países del contexto europeo. Dicha referencia (que forma parte del proyecto europeo HEATCO<sup>107</sup>) también será empleada posteriormente como base fundamental para indicar valoraciones orientativas de los costes unitarios del tiempo de viaje. Por tanto, a efectos de la valoración monetaria del tiempo, se van a clasificar los viajes de personas entre viajes de negocios o comerciales (*work/business*), que corresponderían a viajes realizados durante horas de trabajo remunerado de la persona, y viajes fuera de dicho tiempo de trabajo (*non-work*). Estos últimos se pueden dividir a su vez entre viajes de tipo *commuting* (viajes regulares o diarios, generalmente para cumplir necesidades cotidianas siguiendo patrones de ida y vuelta en horas punta) y otros tipos de viajes (por razones de ocio, compras, asistencia a centros de salud, etc.). La referencia anteriormente citada permite asimismo diferenciar valores para varios tipos de modos de transporte y, excepto en el caso de viajes de negocios o comerciales, también distingue entre desplazamientos de corta o de larga distancia (en este caso resultarán de particular interés los referidos a corta distancia, al estarse evaluando líneas de transporte urbano o metropolitano).

Dado que, en último término, el conjunto general de viajes se segmenta en tres categorías según esta clasificación (viajes de negocios o comerciales en tiempo de trabajo remunerado, viajes de tipo *commuting* fuera del tiempo de trabajo remunerado, y otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo), se hace necesario indicar explícitamente las proporciones o fracciones del total de desplazamientos asignadas a dos de dichas categorías, ya que a la tercera de ellas le ha de corresponder necesariamente una parte o fracción igual al total menos la suma de las otras dos. Por presentar una definición más clara y específica, se adoptan como datos a definir las proporciones correspondientes a los viajes de negocios o comerciales (es decir, en tiempo de trabajo remunerado) y a los viajes de tipo *commuting*. En consecuencia, se han de incluir como datos de entrada del modelo desarrollado las variables que a continuación se describen.

La variable  $Pbsn_{ijk}$  indica la fracción o proporción de viajes que, sobre el conjunto general de desplazamientos realizados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ), se pueden clasificar como viajes de negocios o comerciales (es decir, viajes en tiempo de trabajo remunerado).

Por su parte, la variable  $Pcom_{ijk}$  señala la fracción o proporción de viajes que, con respecto al conjunto general de desplazamientos efectuados sobre el corredor, eje o itinerario atendido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ), corresponden a viajes de tipo *commuting*.

Ambas variables ( $Pbsn_{ijk}$  y  $Pcom_{ijk}$ ) son de tipo adimensional, siendo expresadas en el modelo como proporción decimal.

Como tónica general, puede apuntarse que los viajes de tipo *commuting* suelen representar una parte bastante importante de los desplazamientos realizados en días laborables y muy especialmente durante horas punta, perdiendo peso fuera de dichas horas y quedando reducidos a fracciones mucho más bajas en días no laborables. Durante estos últimos, la fracción de desplazamientos que corresponden a viajes de negocios o comerciales suele ser, lógicamente, muy exigua, predominando los viajes de otros tipos (fundamentalmente aquellos relacionados con el ocio o las compras no cotidianas). No obstante, no debe obviarse que este comportamiento típico puede depender bastante de las características del corredor o itinerario, por lo que debe ser particularizado para cada caso.

<sup>107</sup> *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*: <https://trimis.ec.europa.eu/project/developing-harmonised-european-approaches-transport-costing-and-project-assessment> [Último acceso: 24/01/2020]



Obsérvese, por otra parte, que existe una notable relación entre esta segmentación por tipos de viaje y la posible clasificación de los mismos en función de si son efectuados en respuesta a motivos o actividades de carácter obligatorio (movilidad obligada) o, por el contrario, están propiciados por actividades que, o bien son relativamente prescindibles, o bien podrían ser satisfechas en otros destinos alternativos (movilidad no obligada, facultativa o discrecional). En general, puede afirmarse que la práctica totalidad de los desplazamientos clasificables como viajes de negocios o comerciales (viajes en tiempo de trabajo remunerado) se encuadrarían dentro de la movilidad obligada. Una amplia mayoría de los viajes de tipo *commuting* corresponderían generalmente también a movilidad obligada. Por su parte, es esperable que entre los viajes de la categoría ‘otros’ predominen los desplazamientos por movilidad no obligada o facultativa (ocio, compras no cotidianas, etc.), pero puede existir dentro de esta categoría una parte significativa de viajes que se encuadren más adecuadamente dentro del grupo de movilidad obligada (compras de productos básicos, desplazamientos a centros sanitarios, etc.). En cualquier caso, y a pesar de estas orientaciones de carácter genérico, no es posible establecer una correspondencia precisa entre ambos tipos de segmentación de viajes a la que pueda concedérsele una validez general.

### 5.8.5. Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público

Para representar dentro del modelo la posible variación temporal, a lo largo del horizonte de evaluación, de la fracción o proporción de viajes correspondiente a desplazamientos realizados por usuarios cautivos del modo de transporte público (con respecto al conjunto total de viajes) se asume, simplificada-mente, una evolución de tipo lineal. Esta evolución lineal puede ser caracterizada mediante una función discreta de la siguiente forma:

$$Z_Y = Z_{Y-1} + \frac{\mu(\text{p.p.})}{100} = Z_0 + \frac{\mu(\text{p.p.})}{100} \cdot (Y - Y_0) \quad (5.6)$$

donde  $Z_Y$  representa el valor de la variable dependiente estudiada (en este caso la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público) en el año  $Y$ ,  $Z_0$  indica el valor inicial de dicha variable dependiente (en el año base  $Y_0$ ) y  $\mu$  constituye la constante de variación anual (expresada en puntos porcentuales en la ecuación 5.6) de la variable dependiente.

Por otra parte, la tendencia de evolución de la fracción de viajes correspondiente a usuarios cautivos del transporte público estará generalmente sujeta a un nivel de incertidumbre ciertamente relevante. En consecuencia, el enfoque de modelización más conveniente consiste en tratar la variación anual de dicha fracción o proporción como una variable aleatoria. Así pues, para cada simulación aleatoria se obtendrá –a partir de una distribución de probabilidad de tipo triangular específica de cada línea, período horario y sentido de viaje– un valor de la variación anual media (equivalente a  $\mu$  en el contexto de la ecuación 5.6) a aplicar a lo largo de los años pertenecientes al horizonte o período de evaluación.

Cada una de estas distribuciones triangulares de probabilidad se identifica mediante su mínimo, moda y máximo. Por tanto, se deben proporcionar, como datos de entrada a definir por el analista, los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle iPcpmin_{ijk}, iPcpmax_{ijk}, iPcpmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

donde  $iPcpmin_{ijk}$ ,  $iPcpmax_{ijk}$  e  $iPcpmod_{ijk}$  representan el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media, en puntos porcentuales<sup>108</sup>, de la fracción o

<sup>108</sup> Es decir, como diferencia entre dos años consecutivos de la referida fracción o proporción cuando esta última es expresada en formato porcentual.

proporción que los viajes realizados en transporte público por usuarios cautivos del mismo representan sobre el conjunto general de desplazamientos efectuados en cualquiera de las opciones modales consideradas, según las posibles previsiones disponibles o llevadas a cabo para los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Obsérvese que las distribuciones de probabilidad a definir deben establecerse preferentemente en base a una variación anual promediada a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, ya que, en el modelo desarrollado, el valor extraído en cada caso se aplicará por igual a todos y cada uno de los años de dicho período (dando lugar, por tanto, a una evolución lineal). En conclusión, al fijar los parámetros  $iPcpmin_{ijk}$  e  $iPcpmax_{ijk}$  debe tenerse en cuenta que el rango de variabilidad de la variación anual promediada durante un período relativamente extenso es, en general, bastante inferior al que podría presentar, en un caso real, la variación puntual experimentada en un año en particular.

Tradicionalmente, la proporción de viajeros cautivos del transporte público se ha asociado principalmente a la tasa de motorización del área de estudio (con una correlación de signo negativo entre ambas magnitudes), centrando así el análisis en una dicotomía entre transporte motorizado público y privado, y dejando un tanto de lado la posible factibilidad de realizar el viaje mediante otros modos alternativos. A su vez, la tasa de motorización se suele vincular con variables socioeconómicas de los hogares, fundamentalmente la renta disponible. Sin embargo, también existen factores de índole muy distinta a la posesión o no de vehículos particulares que pueden condicionar si, para un determinado tipo de viaje, un individuo debe ser considerado como cautivo del transporte público, tal como se había apuntado en la propia definición del concepto de usuario cautivo del transporte público.

Por otra parte, nótese que la evolución de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público se introduce en la modelización planteada como un elemento íntegramente exógeno y, por tanto, desvinculado de todas aquellas variables concernientes a los cambios en los costes generalizados de las alternativas modales de transporte. Sin embargo, debe reconocerse que, en virtud de decisiones tomadas con criterios basados en el largo plazo, la proporción de viajeros voluntariamente cautivos del transporte público sí puede estar influenciada en cierta medida por los atributos del propio sistema de transporte público. En este sentido, una red de transporte público de alta calidad puede llegar a desincentivar la posesión de vehículos motorizados particulares, mientras que, por el contrario, un sistema de transporte público ineficaz o con un muy bajo nivel de servicio puede favorecer una mayor tasa de motorización privada. Este tipo de posibles efectos sobre decisiones tomadas en el largo plazo, dada su complejidad y pertenencia a disciplinas del conocimiento que trascienden el ámbito de la tesis, quedan fuera de la capacidad de análisis del modelo desarrollado, por lo que los tres escenarios a analizar compartirán en todo caso los mismos valores para la variable que indica la fracción o proporción de viajes correspondiente a desplazamientos efectuados por usuarios cautivos del transporte público. Esta exogeneidad puede considerarse una pequeña limitación del modelo, aunque se estima de todos modos que, para el tipo de análisis comparativo al cual se aplica el mismo, la incidencia de dicha limitación tiende a ser de muy reducida magnitud, al no ser las diferencias entre los principales atributos de los sistemas de transporte público que se están comparando tan notablemente acusadas como para propiciar variaciones muy relevantes en este aspecto.

#### **5.8.6. Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual**

Análogamente al caso de los viajes efectuados por usuarios cautivos del transporte público, la posible variación en el tiempo, a lo largo del horizonte de evaluación, de la fracción o proporción de viajes realizados por viajeros cautivos de cada uno de los modos de transporte privado o individual con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo en cualquiera de las opciones modales se representa, simplificada en el modelo, mediante una evolución de tipo lineal. A este tipo de evolución le corresponde una forma funcional como la mostrada previamente en la ecuación 5.6, con una constante  $\mu$  de variación anual expresada en puntos porcentuales.

De nuevo, debe tenerse en cuenta que las posibles tendencias en la evolución futura de las fracciones de viajes atribuibles a viajeros cautivos de cada uno de los modos de transporte privado o individual se encuentran normalmente sometidas a unos niveles de incertidumbre de considerable magnitud. El enfoque de modelización más adecuado pasa por tanto por tratar la variación anual de cada una de dichas fracciones o proporciones como una variable aleatoria. En este sentido, para cada simulación aleatoria se procederá a obtener —a partir de distribuciones triangulares de probabilidad específicas de cada modo, línea, período horario y sentido de viaje— un valor de la variación anual media (correspondiente a  $\mu$  en la ecuación 5.6) aplicable a lo largo de todos los años incluidos en el horizonte o período de evaluación.

Dado que cada una de dichas distribuciones triangulares de probabilidad se define mediante su mínimo, moda y máximo, es preciso indicar, en forma de datos de entrada a aportar al modelo, los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle iPcomin_{ijk}^m, iPcomax_{ijk}^m, iPcomod_{ijk}^m \rangle$$

$$\text{con: } m \in \{C, M, V, P\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $iPcomin_{ijk}^m$ ,  $iPcomax_{ijk}^m$  e  $iPcomod_{ijk}^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media, en puntos porcentuales, de la fracción o proporción que los viajes realizados por parte de viajeros cautivos del modo  $m$  de transporte privado o individual constituyen con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo en cualquiera de las opciones modales contempladas en la modelización, de acuerdo a las posibles previsiones disponibles o efectuadas para los viajes que se desarrollan sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Se recuerda que, al igual que en el caso anterior, las distribuciones de probabilidad a definir han de determinarse preferentemente en base a una tendencia media o variación anual promediada a lo largo de todo el horizonte temporal de evaluación, puesto que cada uno de los valores extraídos se aplicará en el modelo por igual a todos y cada uno de los años de dicho período (evolución lineal). Por consiguiente, conviene tener presente de nuevo al establecer los parámetros  $iPcomin_{ijk}^m$  e  $iPcomax_{ijk}^m$  que el rango de variabilidad de la variación anual promediada durante un largo período de años es en general bastante más limitado que la variación que podría tener lugar puntualmente en un año en particular.

Obsérvese, por otra parte, que la evolución de las fracciones de viajes atribuibles a viajeros cautivos de cada uno de los modos de transporte privado o individual se incorpora al modelo como una variable completamente exógena con respecto a las capacidades de análisis del mismo. En este caso, este criterio de exogeneidad parece todavía más justificado que en el caso de los usuarios cautivos del transporte público, ya que aparentemente es difícil establecer alguna relación causal bien definida entre los cambios en los costes generalizados de las opciones modales de transporte privado o individual y el hecho de que los usuarios de cada una de ellas dispongan o no de otras alternativas distintas que les resulten válidas para las características de su viaje. A consecuencia de este planteamiento como variable exógena, en los tres escenarios a analizar por el modelo se utilizarán los mismos valores para las variables que representan las fracciones o proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos de los distintos modos de transporte privado o individual.

### 5.8.7. Evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos (ajenos a los costes de transporte o atributos de viaje en los itinerarios o corredores analizados)

En el análisis de la evolución temporal del volumen o número total de viajes de unas determinadas características realizados en el conjunto de opciones modales contempladas, la modelización planteada

distinguirá dos grupos de efectos (exógenos y endógenos<sup>109</sup>), los cuales deben ser tratados de forma diferenciada.

Las variables de entrada a considerar en el presente epígrafe se refieren exclusivamente a aquella parte de la variación en el volumen total de viajes efectuados sobre cada corredor o itinerario que está vinculada a causas exógenas al modelo, entendiendo estas como relacionadas con factores ajenos a las condiciones particulares o atributos que se presenten en el subconjunto de la red de transporte que es objeto de análisis (es decir, ajenos a los costes generalizados de las opciones modales de transporte y, en último término, independientes con respecto al coste compuesto de viaje asociado al conjunto de alternativas). Recuérdese que entre las causas exógenas se encuentran, por una parte, factores de tipo demográfico y socioeconómico (tales como, por ejemplo, la evolución cuantitativa de la población en el área de influencia, variaciones en la distribución por edades de dicha población, cambios en la renta y en las tasas de empleo, influencia de nuevos desarrollos tecnológicos y estilos de vida sobre las necesidades de movilidad, etc.)<sup>110</sup>, junto con efectos territoriales relacionados con la planificación urbanística residencial y con las decisiones —tanto del sector público como del privado— de localización o deslocalización de actividades (centros de atracción de viajes) en torno al corredor o itinerario en estudio. Incluso los posibles cambios en los costes de viaje en otras rutas distintas que puedan considerarse como una alternativa al corredor o itinerario analizado presentan una influencia cruzada sobre el volumen de viajes que se efectúan sobre este último.

De todos modos, no debe obviarse que, en realidad, la evolución de algunos de estos factores —a pesar de ser tratados en el modelo como exógenos— puede estar efectivamente influenciada a medio-largo plazo y a nivel local por las condiciones de la red o sistema de transportes como consecuencia de las complejas interacciones mutuas entre accesibilidad, usos del suelo y distribución de la población.

Desde el punto de vista del desarrollo del modelo, la evolución a lo largo de los años del volumen total de viajes debida a factores exógenos va a ser representada mediante una tendencia de tipo exponencial con una base o razón genérica cuyo valor se debe determinar como dato. Dado que cada año es discretizado como un único número entero, este tipo de función toma la forma de una progresión geométrica. La forma funcional adoptada se define en resumen del siguiente modo:

$$Z_Y = Z_{Y-1} \cdot \left(1 + \frac{\varphi(\%)}{100}\right) = Z_0 \cdot \left(1 + \frac{\varphi(\%)}{100}\right)^{Y-Y_0} \quad (5.7)$$

siendo  $Z_Y$  el valor de la variable dependiente analizada (en este caso, el volumen total de viajes si no se produjesen cambios en el coste compuesto de viaje) para el año  $Y$ ,  $Z_0$  el valor inicial de dicha variable dependiente (en el año base  $Y_0$ ) y  $\varphi$  la tasa (porcentual) de variación anual de la variable dependiente (de tal forma que  $1+\varphi/100$  sería la base de la función o la razón de la progresión).

Evidentemente, la evolución a largo plazo de los factores exógenos anteriormente mencionados y sus efectos conjuntos —producidos a través de la reconfiguración de la generación, atracción y distribución de viajes— sobre la demanda de movilidad en una determinada relación de transporte constituyen cuestiones de naturaleza incierta, siendo preciso un enfoque que pueda recoger la falta de certidumbres al respecto. Se impone por tanto la necesidad de tratar la evolución exógena del volumen total de viajes

<sup>109</sup> La evolución endógena del volumen total de viajes corresponde a la demanda inducida (o suprimida) como consecuencia directa de una disminución (o aumento) de los costes de transporte en el corredor o itinerario bajo análisis, y se relaciona —a diferencia de los factores exógenos— con decisiones individuales e instantáneas (o a corto plazo) tomadas por los potenciales viajeros, que en función de los mayores o menores costes asociados a efectuar el desplazamiento pueden modificar su frecuencia de realización de viajes, alterar la ruta elegida, etc. En el marco de referencia del modelo, estas variaciones endógenas en el volumen total de viajes están ligadas a los cambios en los costes generalizados de transporte de las opciones modales en el correspondiente corredor o itinerario, los cuales se condensan en el coste compuesto de viaje, que constituye la variable en función de la cual se determinan dichas variaciones endógenas de demanda.

<sup>110</sup> Los efectos combinados de este grupo de factores sobre la demanda de transporte constituyen lo que, de acuerdo a Gorham (2009: p. 5), se puede denominar crecimiento (o evolución) natural de la demanda (*natural demand growth*).

mediante variables aleatorias que puedan ser ajustadas a una determinada distribución estadística. En el modelo desarrollado, se utilizan distribuciones triangulares de probabilidad para definir estadísticamente la tasa media ( $\varphi$  en la ecuación 5.7) de variación anual del volumen total de viajes debida a factores exógenos al modelo, según las previsiones específicas para cada línea, período horario y sentido de viaje. Por consiguiente, se deben definir, como datos externos al modelo, los valores de los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle IQexmin_{ijk}, IQexmax_{ijk}, IQexmod_{ijk} \rangle$$

con:  $i = 1, 2, \dots, NL$  ;  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$  ;  $k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$

siendo  $IQexmin_{ijk}$ ,  $IQexmax_{ijk}$  e  $IQexmod_{ijk}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la tasa media de variación anual del volumen total de viajes por hora efectuados mediante cualquiera de las opciones modales de transporte sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , si dicha variación estuviese causada exclusivamente por factores identificados como exógenos al modelo. Estas tasas de variación deben ser introducidas en el modelo en forma de porcentaje (%).

Nótese que el valor de la tasa de variación extraído en cada simulación aleatoria se aplicará en el modelo a todos y cada uno de los años del horizonte de evaluación por igual (dando lugar a una evolución exponencial con respecto al tiempo). Por tanto, los parámetros de estas distribuciones de probabilidad deben ser definidos en base a la tasa de variación anual media que, aplicada de forma sucesiva, resulta equivalente a la variación acumulada prevista al final de todo el período de evaluación<sup>111</sup>, y no en base a las variaciones puntuales que podrían tener lugar en cada año en particular, para las cuales el rango de variabilidad sería en general bastante más amplio.

En este sentido, puede apuntarse que otra alternativa, en principio más elaborada, para representar en el modelo la evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos hubiese sido considerar valores diferenciados de las tasas de crecimiento o decrecimiento para cada año en particular del horizonte o período de evaluación, en lugar de la forma funcional de evolución tendencial a largo plazo efectivamente empleada. Sin embargo, dada la amplia extensión del horizonte o período de evaluación, se ha considerado que en general no sería factible disponer de previsiones suficientemente fiables sobre la distribución en el tiempo —especialmente a medio-largo plazo— de los posibles ciclos futuros de expansión y contracción de la demanda de movilidad urbana y metropolitana, estrechamente ligados a su vez a los ciclos económicos. Además, al tratarse de tasas de variación aleatorizadas, los posibles comportamientos reales en forma de ciclos u oscilaciones en períodos cortos o medios quedarán previsiblemente comprendidos dentro del rango o abanico de evoluciones existente en el modelo entre el valor mínimo y el valor máximo. Adicionalmente, no debe perderse de vista que la orientación final del modelo está relacionada con la evaluación socioeconómica de proyectos a lo largo de un amplio horizonte o período de evaluación. En este sentido, si la tendencia de evolución a largo plazo está bien reflejada en el modelo, los efectos sobre la evaluación de las posibles crestas y valles de las oscilaciones correspondientes a períodos más cortos (en torno a la evolución media) tenderán a quedar aproximadamente compensados al agregar los costes y beneficios generados en los diferentes años del horizonte de evaluación (especialmente si las oscilaciones cíclicas no son muy amplias y si la tasa de descuento temporal es relativamente baja). Por tanto, la repercusión de estas oscilaciones cíclicas en los resultados finales del proyecto evaluado no debiera ser excesivamente elevada.

<sup>111</sup> Por tanto, es de aplicación el concepto de media geométrica (no el de media aritmética).

## 5.9. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS CONDICIONES DE CIRCULACIÓN DE VEHÍCULOS MOTORIZADOS EN TRÁFICO MIXTO (DATOS DE ESTUDIOS DE TRÁFICO)

Para aquellos modos de transporte motorizado que circulan en tráfico mixto —que, en el marco del modelo desarrollado, son el automóvil particular, la moto o ciclomotor, y el autobús convencional en el caso del transporte público— se debe incorporar a la modelización la considerable influencia que el volumen de dicho tráfico ejerce sobre diversos componentes del coste generalizado de cada una de estas opciones modales. Estos costes (fundamentalmente el tiempo de viaje, pero también otros como el coste por consumo energético) dependen del mayor o menor nivel de congestión en el corredor o itinerario analizado. En general, esta dependencia suele representarse mediante un determinado tipo de función que genéricamente formaría parte de las denominadas ‘curvas coste-flujo’, las cuales se emplean tradicionalmente, dentro del clásico modelo de cuatro etapas, para la asignación del tráfico privado a los distintos arcos de una red <sup>112</sup> (Ortúzar y Willumsen, 2011: pp. 351-355).

Centrando el análisis en el tiempo de viaje, las relaciones que específicamente vinculan este atributo con el volumen de tráfico reciben habitualmente el nombre de funciones volumen-retardo (*volume-delay functions*), las cuales se basan en ajustar los tiempos de viaje en un arco según la proporción de su capacidad que esté siendo efectivamente utilizada por los vehículos. A grandes rasgos, el principio básico de estas funciones radica en que, dado un segmento de vía con una determinada capacidad, un incremento del volumen de tráfico lleva aparejada una disminución en la velocidad media de avance y, consecuentemente, un aumento en el tiempo necesario para recorrerlo. Además, el incremento de tiempo (o disminución de velocidad) generado por la inclusión de un vehículo adicional tiende a ser más acusado cuanto mayor sea el nivel de congestión existente.

Diversas funciones de este tipo han sido tradicionalmente formuladas desde el ámbito de la ingeniería del tráfico. Se pueden destacar —por citar solo algunas de ellas— la función exponencial utilizada por Smock (1962), la función conocida como “fórmula BPR”, del *U.S. Bureau of Public Roads* <sup>113</sup> (BPR, 1964), la función de Overgaard (1967), las funciones cónicas propuestas por Spiess (1990), o la función de Akçelik (1991), la cual se deriva de la teoría clásica de colas.

Dentro de este extenso abanico de formulaciones, el tipo de función más ampliamente difundido y comúnmente utilizado es el correspondiente a la fórmula del BPR (Horowitz, 1991: pp. 10-11; Martin y McGuckin, 1998: p. 94; Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 353; NCHRP, 2012: p. 73), cuya forma funcional viene dada por la siguiente expresión general:

$$t = t_0 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{Vol}{C} \right)^\beta \right] \quad (5.8.a)$$

donde  $t$  es el tiempo de trayecto <sup>114</sup> de un arco para un volumen de tráfico (vehículos equivalentes por unidad de tiempo) dado por la variable  $Vol$ ;  $t_0$  representa el tiempo de trayecto del arco en condiciones de volumen nulo de tráfico <sup>115</sup> (habitualmente denominado tiempo en flujo libre cuando el tipo de infraestructura permite condiciones de flujo ininterrumpido);  $C$  es la capacidad del arco (vehículos

<sup>112</sup> No obstante, en el modelo del que es objeto la presente tesis este tipo de funciones coste-flujo se utilizan para la predicción de las variaciones producidas en el coste generalizado de las antedichas opciones modales, con sus consiguientes repercusiones en el reparto modal y en el volumen total de viajes realizados en el conjunto de modos (a través de su influencia en el coste compuesto de viaje).

<sup>113</sup> Antecedente de la actual Administración Federal de Carreteras de EE.UU. o *Federal Highway Administration* (FHWA).

<sup>114</sup> Se está utilizando la denominación de tiempo de trayecto para referirse con carácter general al tiempo consumido en atravesar un determinado arco o segmento de vial, incluyendo, en el caso de viales con flujo interrumpido, los tiempos de demora generados en intersecciones y otros puntos de posible detención de la circulación. En este sentido, es equivalente al concepto de ‘travel time’ que emplea el ‘*Highway Capacity Manual*’ de 2000 (TRB, 2000: p. 10.4) para vías urbanas.

<sup>115</sup> De forma un poco menos estricta, el volumen de tráfico, aunque no sea nulo, ha de ser suficientemente bajo como para que el comportamiento de los conductores no se vea afectado por la presencia de otros vehículos.

equivalentes por unidad de tiempo); y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de ajuste. El cociente  $Vol/C$  recibe también el nombre de ratio Volumen/Capacidad (*volume-to-capacity ratio*).

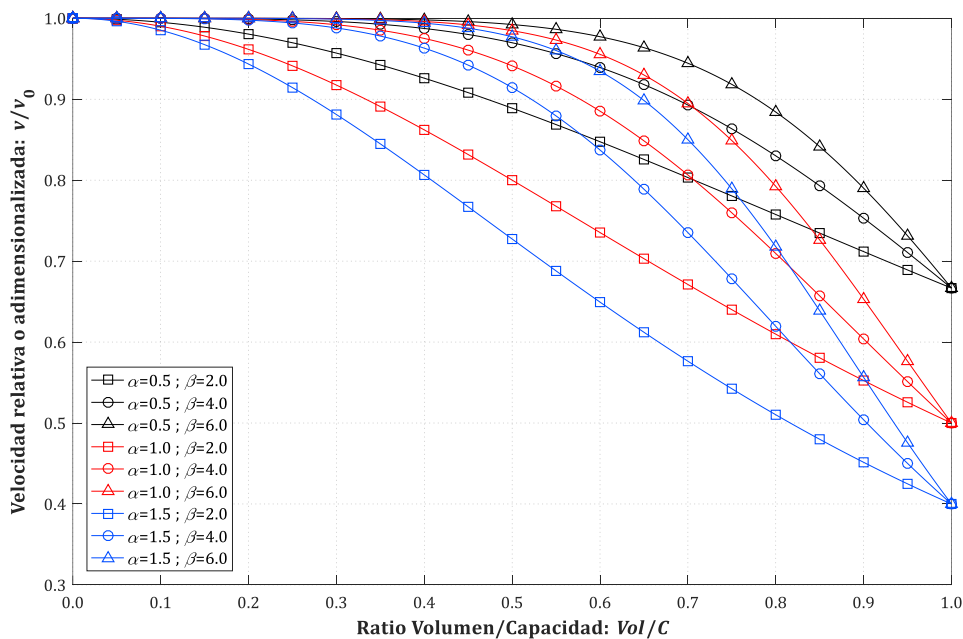
En virtud de su relativa sencillez y de su uso ampliamente extendido, se adopta la forma funcional correspondiente a la fórmula del BPR como base para poder incorporar en el modelo —con ciertas limitaciones y simplificaciones— las interdependencias existentes entre volumen de tráfico mixto y tiempos de viaje en automóvil particular, en moto o ciclomotor, y en autobús convencional. Aunque esta fórmula fue desarrollada inicialmente, en su forma original, para viales con flujo ininterrumpido, se empleará posteriormente en el modelo con los ajustes oportunos para poder ser adaptada a condiciones de flujo interrumpido, típicas del tráfico urbano y metropolitano.

La ecuación 5.8.a ha presentado la fórmula del BPR en términos de tiempos de trayecto. Una expresión alternativa de la misma relación consiste en plantear dicha fórmula en términos de velocidades medias, para lo que basta simplemente con tener en cuenta la relación inversamente proporcional entre tiempo y velocidad. Se obtiene así la siguiente ecuación:

$$v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{Vol}{C}\right)^\beta} \quad (5.8.b)$$

siendo  $v_0$  la velocidad media de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico (en su caso, velocidad en flujo libre) y  $v$  la velocidad media de trayecto correspondiente a cualquier otro volumen de tráfico ( $Vol$ ).

A modo de ejemplo ilustrativo de la forma de las curvas de velocidad media de trayecto generadas por aplicación de la fórmula genérica del BPR se representan en la Figura 5.2 varias curvas de este tipo en función del ratio Volumen/Capacidad y con diferentes combinaciones de valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Nótese que dicha velocidad media de trayecto ( $v$ ) se presenta en valores relativos o adimensionalizados con respecto a la velocidad en condiciones de volumen nulo de tráfico ( $v_0$ ), de tal forma que las ordenadas de las curvas corresponden al cociente  $v/v_0$  obtenido según la ecuación 5.8.b.



**Figura 5.2.** Ejemplo de diversas curvas de velocidad media de trayecto (como fracción de la velocidad con volumen nulo de tráfico) en función del ratio Volumen/Capacidad, según la fórmula general del BPR con diferentes combinaciones de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .

En la fórmula primigenia del *Bureau of Public Roads* (BPR, 1964), desarrollada inicialmente para autopistas, a los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se les asignaba por defecto unos valores de 0.15 y 4, respectivamente, mientras que la capacidad a introducir en la fórmula se establecía como una capacidad de diseño equivalente al límite superior del nivel de servicio C. Sin embargo, actualmente se recomienda emplear en su lugar la capacidad última, correspondiente a un nivel de servicio E (Horowitz, 1991: pp. 12-13, 37; NCHRP, 2012: p. 74), ya que su definición es más consistente entre distintos tipos de vías y además resulta más fácil de obtener. Este cambio ya generaría, por sí solo, una modificación en los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Pero además, los valores originales por defecto han sido sucesivamente modificados y adaptados a distintas categorías de vías mediante ajustes por regresión a datos teóricos y/o experimentales. Sobre los valores recomendados de estos parámetros se incidirá posteriormente en el epígrafe 5.9.4.

### 5.9.1. Velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico (en vías con interrupciones del flujo)

Una de las variables básicas en la ecuación 5.8.b es la velocidad media de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico ( $v_0$ ). En el marco del tipo de modelización planteada, esta variable debe ser obtenida o estimada para los trayectos correspondientes al recorrido de cada línea bajo análisis, en cada uno de los posibles sentidos de circulación de dichas líneas. Además, se contempla la posibilidad de particularizar su valor para cada uno de los modos de transporte motorizado del modelo que circulan en tráfico mixto: automóvil particular, moto o ciclomotor, y autobús convencional. La particularización relativa al modo de transporte público (autobús convencional en tráfico mixto) es especialmente pertinente debido a la necesidad, durante la prestación del servicio, de detener el vehículo en las paradas de la ruta, tal como se aclarará posteriormente.

La fórmula del BPR fue concebida originalmente para su aplicación en viales con un flujo ininterrumpido de tráfico, es decir, sin intersecciones reguladas semafóricamente o mediante otras señales que puedan conllevar la detención temporal de la circulación en el vial objeto de estudio. Sin embargo, es un hecho evidente que esta circunstancia no se produce —o al menos no por completo— en la gran mayoría de trayectos de ámbito urbano y/o metropolitano, donde son frecuentes las condiciones de flujo interrumpido, tanto por intersecciones viarias a nivel (generalmente reguladas semafóricamente) como por detenciones ante pasos peatonales (regulados semafóricamente o no). Esta limitación obliga a realizar una redefinición de la velocidad media correspondiente a condiciones de volumen nulo de tráfico, de forma que esta debe ser obtenida o calculada teniendo en cuenta no solamente el tiempo de marcha o circulación en los segmentos que presenten condiciones de flujo ininterrumpido en ausencia de tráfico (flujo libre propiamente dicho), sino también los tiempos medios de demora generados en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del tráfico en función de la probabilidad de tener que detenerse y del tiempo de espera ante el dispositivo de regulación o control de la circulación (Martin y McGuckin, 1998: p. 94-95). Aunque esta readaptación supone una mayor complejidad, el procedimiento detallado para estimar analíticamente la velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico ( $v_0$ ) para arcos o viales que contienen intersecciones reguladas (flujo interrumpido) aparece descrito por Horowitz (1991: pp. 34-35). Dicho procedimiento está basado en la edición de 1985 del *'Highway Capacity Manual'* (TRB, 1985), y, a pesar de ciertas limitaciones, se considerará una aproximación válida a efectos del modelo.

Una alternativa práctica podría consistir en desarrollar una pequeña campaña de mediciones *in situ* mediante vehículo flotante, con trayectos completos llevados a cabo en franjas horarias (probablemente de la noche o de la madrugada) en las que el volumen de tráfico sea lo suficientemente irrelevante para no afectar al tiempo de trayecto.

De todos modos, cualquiera de los procedimientos —ya sea teórico o experimental— lleva aparejada una cierta dosis de incertidumbre y variabilidad: en el primer caso debido fundamentalmente a las simplificaciones metodológicas y a la posible necesidad de realizar hipótesis sobre algunas variables de



entrada (principalmente aquellas relacionadas con la regulación de las intersecciones); en el segundo caso por la propia aleatoriedad a la que se ven sometidas las condiciones (no controladas) en las que se lleva a cabo el experimento, que se traduce en una cierta variabilidad de resultados. Por tanto, resulta apropiado que la velocidad promedio en condiciones de volumen nulo de tráfico sea tratada en el modelo desarrollado como una variable aleatoria, asumiéndose al respecto distribuciones triangulares de probabilidad, que deben ser especificadas mediante su mínimo, máximo y moda.

Así pues, un primer grupo de datos de entrada, procedentes de los pertinentes estudios de tráfico, está constituido por los siguientes parámetros:

$$\langle VF_{cmin_{ik}}, VF_{cmax_{ik}}, VF_{cmod_{ik}} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $VF_{cmin_{ik}}$ ,  $VF_{cmax_{ik}}$  y  $VF_{cmod_{ik}}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la velocidad promedio de trayecto (incluyendo demoras generadas en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del flujo) en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto, para automóviles particulares que recorran el corredor, eje o itinerario sobre el que presta servicio la línea  $i$  en el sentido de viaje  $k$ .

Similarmente, para el modo de transporte motorizado de dos ruedas (moto o ciclomotor) deben indicarse los siguientes conjuntos de parámetros como datos de entrada del modelo:

$$\langle VF_{mmin_{ik}}, VF_{mmax_{ik}}, VF_{mmod_{ik}} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

donde  $VF_{mmin_{ik}}$ ,  $VF_{mmax_{ik}}$  y  $VF_{mmod_{ik}}$  presentan un significado análogo al de  $VF_{cmin_{ik}}$ ,  $VF_{cmax_{ik}}$  y  $VF_{cmod_{ik}}$ , pero referido a motos y ciclomotores en lugar de a automóviles particulares.

Finalmente, para el modo de transporte público con operación en tráfico mixto (autobús convencional) se deben aportar como datos de entrada del modelo los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle VF_{bmin_{ik}}, VF_{bmax_{ik}}, VF_{bmod_{ik}} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $VF_{bmin_{ik}}$ ,  $VF_{bmax_{ik}}$  y  $VF_{bmod_{ik}}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la velocidad promedio de trayecto (incluyendo demoras generadas en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del flujo, así como las deceleraciones y aceleraciones para realizar las detenciones en todas las paradas) en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto, para autobuses convencionales que realicen el recorrido de la línea  $i$  en el sentido  $k$ .

Para cualquiera de estas tres opciones modales (automóvil particular, moto o ciclomotor y autobús convencional en tráfico mixto), las unidades empleadas para expresar numéricamente en el modelo sus respectivas velocidades promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico son kilómetros por hora [km/h].

Obsérvese que, a diferencia de los modos de transporte motorizado privado, la velocidad promedio de trayecto del autobús convencional en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto debe incorporar también las ralentizaciones de la marcha que se producen en relación con la realización de detenciones en las paradas de la línea, a consecuencia de la necesidad de decelerar y frenar para acceder y detenerse en la parada, y de volver a acelerar hasta la velocidad normal de circulación al reemprender la marcha.

Así pues, el tiempo utilizado para el cálculo de esta velocidad promedio de trayecto debe incluir las pérdidas de tiempo correspondientes a dichas fases de deceleración y aceleración, pero nunca el tiempo que el autobús debería permanecer detenido en la parada (tiempo de parada o estación, o *'dwell time'*) para la apertura y cierre de puertas y la subida y bajada de pasajeros. Esta diferencia con los modos de transporte motorizado privado hace que las velocidades promedio en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto para autobús convencional sean, previsiblemente, inferiores a sus homólogas obtenidas para automóvil privado <sup>116</sup>.

### 5.9.2. Capacidad viaria inicial para tráfico mixto

Otra de las variables fundamentales en las funciones volumen-retardo es la capacidad del vial de circulación, representada por  $C$  en la ecuación 5.8.b. En el contexto del modelo desarrollado, se debe obtener o estimar una capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al recorrido de cada línea bajo análisis, en cada uno de los posibles sentidos de circulación.

Tal como se anticipó con anterioridad, en la calibración y aplicación de la fórmula del BPR se recomienda actualmente utilizar como capacidad de referencia la capacidad última del vial, correspondiente a un nivel de servicio E en la mayoría de los casos (Horowitz, 1991: pp. 12-13, 37; NCHRP, 2012: p. 74), y no la capacidad de diseño de la infraestructura (equivalente al límite superior del nivel de servicio C) como se proponía en la formulación original del *Bureau of Public Roads* (BPR, 1964).

Por otra parte, resultará bastante frecuente que en el análisis del trayecto o itinerario de una determinada línea se encuentren segmentos o tramos de viales de diversas características y, por tanto, diferentes capacidades. Sin embargo, debido a las limitaciones de la parte del modelo que hace referencia a la circulación general en tráfico mixto, es preciso asumir la simplificación de adoptar un único valor de capacidad representativa de todo el itinerario. Dada esta limitación, parece recomendable obtener un valor aproximado de dicha capacidad representativa mediante la siguiente ponderación:

$$C^w = \frac{\sum_{n=1}^N C_n \cdot t_n}{\sum_{n=1}^N t_n} \quad (5.9)$$

donde  $C^w$  es la capacidad ponderada que se adopta como representativa,  $C_n$  representa la capacidad de cada uno de los  $N$  segmentos o tramos diferenciados, y  $t_n$  indica el tiempo de trayecto de cada uno de dichos segmentos o tramos (incluyendo, en su caso, las demoras producidas en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del flujo, para unas condiciones representativas del volumen habitual de tráfico en cada segmento o tramo).

La determinación de la capacidad de un segmento de vial de circulación constituye generalmente un proceso de una elevada complejidad (especialmente en el caso de segmentos con intersecciones), cuyos detalles de cálculo se especifican en el Volumen 2 (para segmentos con flujo ininterrumpido) y Volumen 3 (para segmentos con flujo interrumpido) de la Edición 2010 del *'Highway Capacity Manual'* (TRB, 2010) <sup>117</sup>. En cualquier caso, dichos procesos de cálculo exceden el objeto de estudio de la presente tesis. Además, se admite (NCHRP, 2012: p. 74) que un cálculo detallado de la capacidad tal como este aparece recogido en el *'Highway Capacity Manual'* puede no resultar factible a nivel de redes de modelización del transporte, ya que algunas de las variables utilizadas en el citado manual difícilmente estarán disponibles a dicha escala de modelización.

<sup>116</sup> Otros factores secundarios pueden contribuir también a esta menor velocidad, como las —generalmente— inferiores prestaciones de los autobuses en cuanto a aceleración y frenado en comparación con los automóviles particulares y la menor maniobrabilidad de aquellos en giros o curvas de radio reducido.

<sup>117</sup> En el caso de la edición de 2000 (TRB, 2000), las metodologías de los Capítulos 20, 21, 22, 23 y 24 corresponderían a flujo ininterrumpido, y los Capítulos 15, 16, 17, 25 y 26 a flujo interrumpido.

No obstante, es posible referenciar algunos valores orientativos de la capacidad aproximada de distintos tipos de viales de circulación. Así, Horowitz (1991, pp. 25-32) indica estimaciones iniciales para las capacidades últimas y de diseño<sup>118</sup> de distintas clases de viales, tanto de flujo ininterrumpido como de flujo interrumpido (segmentos de aproximación a intersecciones). Además de la propia clase de vial de circulación, la capacidad puede depender de factores adicionales como son, para el caso de vías de flujo ininterrumpido, el tipo de área desde un punto de vista urbanístico, la existencia de separación entre calzadas, el tipo de terreno (llano u ondulado), la velocidad de diseño de la infraestructura, o las posibilidades de adelantamiento. En el caso de segmentos con flujo interrumpido, destacan factores como el nivel de prioridad del vial de aproximación a la intersección (porcentaje de tiempo de verde en la regulación semafórica), la existencia de un carril exclusivo de giros a la izquierda, el porcentaje de giros en la intersección, o el volumen de tráfico en el vial intersecado.

Dado el conjunto de limitaciones metodológicas anteriormente expuesto, la dificultad intrínseca de determinar la capacidad de un vial con plena exactitud, y el posible desconocimiento o falta de certidumbre sobre algunos de los factores de los que esta depende, resulta especialmente adecuado que la capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte al recorrido de cada línea sea tratado en el modelo como una variable aleatoria, en respuesta a la incertidumbre y variabilidad que de dichas causas se derivan. Para ello se adoptan distribuciones triangulares de probabilidad, de tal modo que se deben incorporar, como datos aportados al modelo, los valores de los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle CMTimin_{ik}, CMTimax_{ik}, CMTimod_{ik} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $CMTimin_{ik}$ ,  $CMTimax_{ik}$  y  $CMTimod_{ik}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , siendo recorridos en el sentido  $k$ , y dada la configuración actual o inicial (año base) de las infraestructuras viarias.

Las variables relativas a la capacidad de los viales de circulación en tráfico mixto se expresan en el modelo en automóviles ligeros equivalentes (PCE, siglas en inglés de *Passenger Car Equivalent*)<sup>119</sup> por hora [PCE/h] para cada sentido de viaje. Esta unidad de medida se emplea con el propósito de estandarizar u homogeneizar —mediante factores de conversión— los diferentes impactos o efectos que los diversos tipos de vehículos que pueden componer la circulación generarían sobre las variables que caracterizan el tráfico. Por ejemplo, este impacto sería varias veces mayor al de un turismo o automóvil ligero en el caso de autobuses, camiones y otros vehículos pesados, y menor en el caso de motos y ciclomotores.

Por otra parte, nótese que en la definición establecida para  $CMTimin_{ik}$ ,  $CMTimax_{ik}$  y  $CMTimod_{ik}$  se hace mención a que estas capacidades deben corresponder a la configuración o estado en el que se encuentren inicialmente las infraestructuras viarias, asimilando esa misma configuración también para el año base. En el escenario '0' (continuación de la operación mediante autobús convencional) se asume que esas mismas capacidades iniciales se mantienen a lo largo de todo el horizonte de evaluación, sin que se realicen grandes actuaciones sobre dichas infraestructuras viarias más allá de los necesarios trabajos de mantenimiento periódico (escenario de tipo *do-minimum*). Sin embargo, en los escenarios 'R' (implantación de metro ligero o tranvía) y 'B' (implantación de BHLS/BRT), la introducción de los nuevos sistemas de transporte público —junto con sus inevitables fases de obras— puede generar

<sup>118</sup> Nótese que en el documento original (Horowitz, 1991: pp. 26-31) existen algunas erratas en los títulos de las tablas. Así, las Tablas 6 y 16 se deben referir a la capacidad de diseño, no a la capacidad última.

<sup>119</sup> En ocasiones se utiliza en su lugar la denominación PCU (*Passenger Car Units*), aunque el concepto es exactamente el mismo.

cambios muy relevantes en la capacidad disponible para el resto de tráficos en los viales afectados. En relación con esta cuestión se introduce a continuación el siguiente epígrafe.

### 5.9.3. Capacidad viaria para tráfico mixto tras la implantación de los nuevos sistemas de transporte público

Tal como se anticipó en el epígrafe anterior, en los escenarios 'R' (implantación de metro ligero o tranvía) y 'B' (implantación de BHLS/BRT) la inserción en el viario de la correspondiente plataforma reservada es susceptible de introducir modificaciones sustanciales en la capacidad del vial de circulación para el resto de tráficos, ya que, dependiendo del tipo de sección transversal proyectada en cada caso, dicha inserción podría realizarse a costa de sustituir uno o varios carriles de circulación, mediante la eliminación de carriles de estacionamiento, etc. Por tanto, para estos escenarios es necesario definir también las capacidades del vial o viales de circulación que se prevén disponibles con la nueva configuración de las infraestructuras viarias, una vez implantado el nuevo modo de transporte público en plataforma reservada.

Para la estimación de estas nuevas capacidades son de aplicación las mismas indicaciones generales que se señalaron, para las capacidades iniciales, en el epígrafe anterior. A las fuentes de incertidumbre y variabilidad que se apuntaron anteriormente se añade en este caso el hecho de tener que realizar una predicción de capacidad sobre unas infraestructuras viarias futuras, cuyos niveles de detalle durante las etapas de planificación y evaluación podrían no estar suficientemente definidos como para determinar muchas de las variables que intervienen en el cálculo de la capacidad de un segmento o vial. Por tanto, es imprescindible que la capacidad viaria disponible tras la implantación de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada reciba, en el marco del modelo desarrollado, el tratamiento de variable aleatoria. Al respecto, se plantean nuevamente distribuciones triangulares de probabilidad, por lo que es preciso especificar, como datos proporcionados al modelo, los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle CMTnmin_{ik}^s, CMTnmax_{ik}^s, CMTnmod_{ik}^s \rangle$$

$$\text{con: } s \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $CMTnmin_{ik}^s$ ,  $CMTnmax_{ik}^s$  y  $CMTnmod_{ik}^s$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la capacidad para tráfico mixto representativa del vial o viales de circulación en los que se inserta la línea  $i$ , siendo recorridos en el sentido  $k$ , dada la configuración de las infraestructuras viarias prevista en el escenario  $s$  tras la completa implantación del nuevo modo de transporte público en plataforma reservada. De nuevo, las unidades utilizadas en el modelo para la cuantificación numérica de estos parámetros de entrada son automóviles ligeros equivalentes por hora [PCE/h] en cada sentido de viaje.

Por lo que respecta a la propia fase de implantación (proyecto constructivo, obras de construcción e implementación de sistemas, etc.), se anticipa que la capacidad viaria durante dicha fase será modelizada posteriormente mediante una curva de enlace o transición (desde la capacidad inicial a la capacidad tras la inserción de los nuevos modos de transporte público) de características prefijadas.

### 5.9.4. Parámetros $\alpha$ y $\beta$ de la fórmula BPR

Las posibilidades de ajuste de la forma funcional representada en las ecuaciones 5.8.a y 5.8.b al conjunto de datos particulares observados en un determinado vial o segmento para diversos valores del ratio Volumen/Capacidad vienen dadas por los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . En el caso de la modelización planteada, se ha contemplado además la posibilidad de adoptar valores diferentes de estos parámetros según el tipo de vehículo afectado. Así, se han distinguido al respecto vehículos motorizados de cuatro o más ruedas

(automóviles particulares y autobuses) y vehículos motorizados de dos ruedas (motos o ciclomotores), ya que los altos niveles de congestión viaria podrían afectar de forma un tanto diferente a uno y otro tipo —especialmente en tráfico urbano con flujo interrumpido— debido a su distinta anchura y maniobrabilidad, que en el caso de motos y ciclomotores facilita el rebase de colas de automóviles detenidos ante un elemento de regulación del tráfico. Nótese, no obstante, que esta diferenciación no parece ser muy común en la literatura técnica, posiblemente a consecuencia de que la mayoría de estudios sobre esta materia han focalizado tradicionalmente su atención en el automóvil. En cualquier caso, a efectos prácticos se podría prescindir de esta diferenciación si se considerase oportuno, adoptando en el modelo idénticos valores de estos parámetros para ambos tipos de vehículos.

Los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  deberían proceder preferentemente, cuando sea viable, de una calibración particularizada, efectuada sobre una muestra de tiempos o velocidades medias de trayecto registradas en el vial objeto de estudio para diferentes valores del ratio Volumen/Capacidad. Cuando ello no sea factible, se pueden utilizar, como recurso alternativo, valores medios recopilados en la literatura técnica que hayan sido obtenidos para viales de características lo más similares posible. En uno u otro caso —pero muy especialmente en el segundo de ellos— los valores adoptados para  $\alpha$  y  $\beta$  estarían sometidos a un determinado nivel de incertidumbre (incrementado además por las simplificaciones metodológicas asumidas en epígrafes anteriores), por lo que, siguiendo las pautas generales que marcan el desarrollo del modelo, deben ser tratados estos parámetros como variables aleatorias. Se proponen para ambos distribuciones triangulares de probabilidad, con lo que un primer grupo de datos de entrada (relativo a vehículos motorizados de cuatro o más ruedas como automóviles y autobuses) ha de estar constituido por los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle \alpha_{fmin_{ik}}, \alpha_{fmax_{ik}}, \alpha_{fmod_{ik}} \rangle$$

$$\langle \beta_{fmin_{ik}}, \beta_{fmax_{ik}}, \beta_{fmod_{ik}} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

donde  $\alpha_{fmin_{ik}}$ ,  $\alpha_{fmax_{ik}}$  y  $\alpha_{fmod_{ik}}$  representan el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del parámetro  $\alpha$  de la fórmula BPR aplicada al vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$  por vehículos motorizados de cuatro o más ruedas (automóviles particulares y autobuses). Por su parte,  $\beta_{fmin_{ik}}$ ,  $\beta_{fmax_{ik}}$  y  $\beta_{fmod_{ik}}$  presentan un significado análogo, excepto en que estos últimos se refieren al parámetro  $\beta$  de la fórmula BPR en lugar de a  $\alpha$ .

Similarmente, un segundo grupo de datos de entrada sería el aplicable a vehículos motorizados de dos ruedas (motos o ciclomotores), para los cuales sería preciso indicar, como datos a aportar al modelo, los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle \alpha_{tmin_{ik}}, \alpha_{tmax_{ik}}, \alpha_{tmod_{ik}} \rangle$$

$$\langle \beta_{tmin_{ik}}, \beta_{tmax_{ik}}, \beta_{tmod_{ik}} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

donde  $\alpha_{tmin_{ik}}$ ,  $\alpha_{tmax_{ik}}$  y  $\alpha_{tmod_{ik}}$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del parámetro  $\alpha$  de la fórmula BPR aplicada al vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$  por vehículos motorizados de dos ruedas (motos o ciclomotores).  $\beta_{tmin_{ik}}$ ,  $\beta_{tmax_{ik}}$  y  $\beta_{tmod_{ik}}$  indican un significado equivalente, pero referido en estos casos al parámetro  $\beta$  de la fórmula BPR en lugar de a  $\alpha$ .

En cuanto a posibles valores orientativos o de referencia general de estos dos parámetros, Martin y McGuckin (1998: p. 96) proponían, en primera aproximación, que para áreas urbanas de pequeño tamaño en las que se desee usar unos únicos valores por defecto se empleen unos parámetros  $\alpha=0.84$  y  $\beta=5.5$ . En el mismo documento (Martin y McGuckin, 1998: p. 95, Tabla 48) se recogen valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para autopistas/autovías y carreteras convencionales multicarril de varias velocidades de diseño. Se puede comprobar que los valores de  $\alpha=0.84$  y  $\beta=5.5$  corresponden a autopistas o autovías con una velocidad de diseño de 60 mph (96.56 km/h)<sup>120</sup>. Todos estos valores están basados a su vez en el trabajo desarrollado por Horowitz (1991: pp. 13-15, 49-54), que calibró los parámetros de la fórmula BPR para obtener el mejor ajuste a las relaciones volumen-velocidad computadas usando los procedimientos contenidos en el '*Highway Capacity Manual*' de 1985 para segmentos con flujo ininterrumpido, utilizando, para definir la capacidad de los viales, el nivel de servicio E.

Por su parte, el '*Highway Capacity Manual*' de 2000, en su capítulo dedicado a la modelización de tráfico a escala de área o región, señala valores recomendados de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la fórmula BRP tanto para autopistas/autovías y carreteras multicarril (TRB, 2000: p. 30.39, *Exhibit C30.1*) como para arterias urbanas que incorporan condiciones de flujo interrumpido (TRB, 2000: p. 30.39, *Exhibit C30.2*), estableciendo la capacidad en base al nivel de servicio C. En el caso de las arterias urbanas con flujo interrumpido (que se reproduce en la Tabla 5.4 por su especial interés para los ámbitos urbanos y metropolitanos), los viales están clasificados en cuatro categorías (Clases I, II, III y IV, de mayor a menor velocidad de diseño y capacidad), incluyendo también como variable de selección la densidad lineal de intersecciones reguladas. La incorporación de este importante factor constituye una significativa ventaja de cara a su posible aplicación en un determinado caso de estudio, si bien para algunos itinerarios en ciudades españolas o europeas los valores considerados de densidad de intersecciones reguladas podrían llegar a quedarse ligeramente cortos.

**Tabla 5.4.** Valores recomendados de los parámetros de la fórmula BPR para arterias urbanas.

Clase de arteria	Velocidad en flujo libre (no interrumpido) [km/h]	Densidad de intersecciones reguladas [intersecc./km]	Velocidad de trayecto con $Vol/C=1$ [km/h]	Parámetro $\alpha$	Parámetro $\beta$
Clase I	80	0.33	53	0.34	4.0
	80	1.0	31	0.74	5.0
	80	2.5	15	1.16	6.0
Clase II	65	0.5	40	0.38	5.0
	65	1.0	28	0.70	5.0
	65	2.0	18	1.00	5.0
Clase III	55	2.0	17	0.96	5.0
	55	3.0	13	1.00	5.0
	55	4.0	10	1.40	5.0
Clase IV	50	4.0	10	1.11	5.0
	50	5.0	8	1.20	5.0
	50	6.0	7	1.50	5.0

Fuente: TRB (2000: p. 30.39, *Exhibit C30.2*).

Obsérvese que, además, es posible reconstruir la velocidad media de trayecto  $v_0$  en condiciones de volumen nulo de tráfico (no coincidente en este caso con la velocidad en flujo libre, no interrumpido) en base a la información contenida en la Tabla 5.4. Si se denomina  $v_1$  a la velocidad media de trayecto correspondiente a un ratio Volumen/Capacidad igual a 1 (4ª columna de la Tabla 5.4), se obtiene, a partir de la ecuación 5.8.b, la siguiente relación:

<sup>120</sup> A juzgar por este dato, la aplicabilidad general de estos valores a áreas urbanas, donde son frecuentes las condiciones de flujo interrumpido y la velocidad de diseño de las vías suele ser notablemente menor, parece bastante dudosa.

$$v_1 = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot 1^\beta} \Rightarrow v_0 = v_1 \cdot (1 + \alpha) \quad (5.10)$$

Más recientemente, las directrices del *National Cooperative Highway Research Program* sobre pronóstico de demanda de transporte (NCHRP, 2012: pp. 75-77, Tabla 4.26) sintetizan los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  utilizados por una muestra de 18 Organizaciones de Planificación Metropolitana (MPOs, *Metropolitan Planning Organizations*) incluidas en una base de datos. Se indican valores medios, mínimos, máximos y de desviación típica tanto para autopistas o autovías como para arterias, incluyendo también una segmentación de las áreas metropolitanas según su población. Nótese, no obstante, que dicha segmentación conlleva que los tamaños de las submuestras sean en ocasiones muy reducidos (especialmente para áreas pequeñas y medias). Como conclusión del análisis de estos datos, se determinan en dicho documento unas funciones BPR promediadas cuyos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  (con capacidades definidas para el nivel de servicio E) valen respectivamente 0.312 y 5.883 en el caso de autopistas o autovías, mientras que, por su parte, toman valores de 0.514 y 3.001 para arterias urbanas. Estos últimos valores parecerían por tanto los más recomendables para un uso genérico o por defecto en ámbitos urbanos/metropolitanos en el hipotético caso de que se optase por utilizar los resultados extraídos de dicha base de datos.

### 5.9.5. Factores de conversión a automóviles ligeros equivalentes

El volumen de tráfico motorizado está generalmente compuesto de diferentes tipos de vehículos (automóviles ligeros, autobuses, vehículos pesados de mercancías, motos o ciclomotores, etc.), cuya incidencia sobre las variables que habitualmente se utilizan para caracterizar el flujo o circulación (tales como velocidad, densidad, espaciamiento, intervalo entre vehículos, etc.) puede ser notablemente distinta dependiendo de la clase de vehículo. Para tratar de homogeneizar la magnitud de estos diferentes impactos o efectos a una unidad común (que toma como referencia al automóvil ligero) se utilizan generalmente factores de conversión de los restantes tipos de vehículos a su número equivalente de automóviles ligeros, dando así lugar al concepto de automóvil ligero equivalente (PCE, *Passenger Car Equivalent*) como unidad común de medida.

En lo que respecta al tipo de modelo desarrollado en la presente tesis, es preciso definir dichos factores de conversión para vehículos de tipo autobús y para motos o ciclomotores.

En el primero de los casos (autobuses), el *'Highway Capacity Manual'* de 2000 (TRB, 2000) ofrece amplia información sobre valores de su factor de conversión, aunque concebidos fundamentalmente para viales o segmentos con flujo ininterrumpido. Así, para carreteras convencionales de dos carriles<sup>121</sup> (TRB, 2000: p. 20.8, *Exhibit 20.9*) se proponen factores de conversión entre 1.1 y 1.7 en el caso de terreno llano y entre 1.5 y 2.5 en terreno ondulado (los valores concretos dependen del volumen de tráfico, siendo decrecientes con dicho volumen). Para carreteras multicarril (TRB, 2000: p. 21.8, *Exhibit 21.8*) se indican factores de conversión de 1.5 para terreno llano, 2.5 para terreno ondulado y 4.5 para terreno montañoso. Estos mismos valores se aplican también para autovías o autopistas (TRB, 2000: p. 23.9, *Exhibit 23.8*). También sería posible incluso calcular factores de conversión para rampas y pendientes específicas, según características como su inclinación y su longitud. Por otra parte, un dato interesante desde el punto de vista del tráfico urbano es que al determinar el flujo de saturación de una intersección regulada, el *'Highway Capacity Manual'* utiliza un factor de conversión de 2.0 por cada vehículo pesado, incluyendo autobuses (TRB, 2000: p. 16.10).

Por su parte, las directrices de modelización de tráfico propuestas por Transport for London (2010, p. 67) indican, de un modo más simple, factores de conversión de 2.0 para autobuses rígidos y autocares, y de 3.2 para autobuses articulados.

<sup>121</sup> En estos tipos de carreteras, los autobuses quedan incluidos, a nivel de análisis de tráfico, en el mismo grupo que los camiones (TRB, 2000: p. 20.7).

En relación con las motos y ciclomotores, esta misma fuente (Transport for London, 2010: p. 67) propone un factor de conversión de 0.4. Los efectos de la presencia de motocicletas en el tráfico de arterias urbanas fueron analizados, por ejemplo, por Rongviriyapanich y Suppatrakul (2005) en la ciudad de Bangkok (Tailandia), donde este tipo de vehículos llegan a suponer una parte muy relevante del tráfico urbano. Al intentar determinar un factor de conversión de motocicletas a PCE (automóviles ligeros equivalentes), dichos autores encuentran valores que pueden llegar a variar entre 0.2 y casi 1.0, dependiendo del volumen de tráfico mixto y de la fracción de motocicletas que forman parte de dicho volumen. Para niveles altos de volumen de tráfico, estos factores de conversión parecen estabilizarse entre 0.4 y 0.6, de acuerdo al método de cálculo que estos autores denominan 'Enfoque 1'.

Debido a la variabilidad bastante acusada que, a juzgar por las fuentes anteriormente citadas, los valores de estos factores de conversión pueden llegar a presentar (así como por su dependencia con respecto a características que posiblemente puedan ser desconocidas a priori), se adopta el criterio de tratar ambos factores como variables aleatorias en el marco del modelo. Para ello, se plantean sendas distribuciones triangulares de probabilidad, que habrán de ser especificadas mediante su mínimo, máximo y moda.

Por tanto, en el caso de los autobuses, deben ser indicados como datos de entrada del modelo los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle EFbmin_{ik}, EFbmax_{ik}, EFbmod_{ik} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $EFbmin_{ik}$ ,  $EFbmax_{ik}$  y  $EFbmod_{ik}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de conversión —a efectos de incidencia sobre las variables de tráfico— de vehículos de tipo autobús a automóviles ligeros equivalentes (PCE), a aplicar a las características del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$ .

Por su parte, para motos y ciclomotores es preciso especificar, como datos del modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle EFmmin, EFmmax, EFmmod \rangle$$

donde  $EFmmin$ ,  $EFmmax$  y  $EFmmod$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de conversión —a efectos de incidencia sobre las variables de tráfico— de vehículos de tipo moto o ciclomotor a automóviles ligeros equivalentes (PCE).

Obsérvese que, en el caso de motos y ciclomotores, no se ha considerado oportuno incorporar distribuciones con datos diferenciados según las características y sentido de recorrido del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de cada línea, pues la investigación disponible sobre el factor de conversión de dicho tipo de vehículos no parece aportar suficiente información como para establecer unos criterios claros sobre la influencia de tales características.

Todos los valores de los factores de conversión son de tipo adimensional (estrictamente, automóviles ligeros equivalentes por cada vehículo del tipo considerado [PCE/veh]).



## 5.10. CARACTERÍSTICAS ADICIONALES SOBRE LOS VIAJES REALIZADOS EN VEHÍCULO MOTORIZADO PRIVADO

### 5.10.1. Ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el itinerario o corredor en los desplazamientos realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de viaje por pasajero del transporte público

En relación con el conjunto de viajes que, dentro del ámbito de estudio de una determinada línea, se realizan sobre el corredor, eje o itinerario servido por dicha línea utilizando alguna de las opciones de vehículo motorizado privado, es preciso definir la distancia media durante la cual dichos viajes hacen uso del citado corredor o itinerario. En general, esta distancia diferirá de la longitud total del viaje (siendo inferior a ella), si se considera este último como de puerta a puerta (o, más exactamente, de punto de estacionamiento en origen a punto de estacionamiento en destino). Se trata por tanto de la distancia media durante la cual los viajeros que realicen su desplazamiento en vehículo motorizado privado se verán afectados por los cambios (en la capacidad viaria, en el volumen de tráfico, etc.) que tengan lugar en el corredor, eje o itinerario que es servido por la línea de transporte público.

A efectos de incorporación a la estructura de datos del modelo, dicha distancia va a ser expresada inicialmente en relación con la longitud media de desplazamiento de los usuarios de la línea de transporte público (es decir, la distancia, promediada sobre el conjunto de pasajeros, entre la parada o estación de subida y la parada o estación de bajada, o, en otras palabras, la longitud media a bordo del vehículo). Téngase presente que esta última distancia media se establece analíticamente —de forma determinista— a partir de los valores de las variables  $\sigma$  (coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda),  $\delta$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea), y de la propia longitud total de la línea<sup>122</sup>.

Así pues, el tipo de dato a introducir en el modelo toma la forma de ratio o razón (cociente) entre ambas longitudes o distancias medias: la recorrida sobre el corredor o itinerario por parte de los viajes realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de desplazamiento por pasajero de la línea de transporte público.

En cualquier caso, sobre la primera de dichas longitudes (distancia media recorrida sobre el corredor o itinerario por los viajes efectuados en vehículo motorizado privado) difícilmente puede existir en la práctica un conocimiento preciso de su valor, estando este además sometido a cierta variabilidad. Por ello, se adopta, dentro del contexto de la modelización desarrollada, el criterio de tratar el ratio o razón entre ambas distancias preferentemente como una variable aleatoria. En este sentido, se asumen distribuciones triangulares de probabilidad para dicha variable, con lo cual se deben indicar los siguientes grupos de parámetros adimensionales como datos del modelo:

$$\langle lpmin_{ijk}, lpmax_{ijk}, lpmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $lpmin_{ijk}$ ,  $lpmax_{ijk}$  y  $lpmod_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  por parte de los viajes en vehículo motorizado privado efectuados durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , y la longitud media de desplazamiento de los pasajeros de la línea de transporte público en los viajes realizados en el mismo período horario y en el mismo sentido.

<sup>122</sup> El cálculo de la distancia media recorrida a bordo por los pasajeros de una determinada línea de transporte público se incluye posteriormente en el Capítulo 7 (epígrafe 7.4.1).

Lógicamente, los valores que en cada caso puedan adoptar estos parámetros son específicamente dependientes de las condiciones particulares de cada localización (corredor, eje o itinerario), aunque, en líneas generales, dicho ratio o razón no debería diferir en gran medida —salvo algunos casos excepcionales— del valor unidad.

### 5.10.2. Contribución de vehículos realizando viajes pasantes al ratio Volumen/Capacidad

En general, se denomina viajes pasantes (*through trips*) a aquellos que atraviesan una determinada área de estudio pero tienen ambos extremos (origen y destino) fuera de dicha área, por lo que reciben también el nombre de viajes E-E, es decir, exterior-exterior (Martin y McGuckin, 1998: pp. 8, 48; NCHRP, 2012: p. 49). Este tipo de viajes constituyen un subconjunto dentro del grupo, más amplio, de viajes externos (aquellos que tienen o su origen, o su destino, o ambos, fuera del área de estudio).

En el marco del tipo de modelo desarrollado, los viajes pasantes realizados en vehículo motorizado particular van a ser tratados como un componente fundamentalmente exógeno, que actúa ocupando parte de la capacidad del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de una línea determinada. En este sentido, representan, de forma simplificada, una especie de 'precarga' de volumen de tráfico mixto sobre dichos viales, de tal modo que el volumen de dicha precarga se asume desligado de las variables endógenas del modelo (pero no así de la propia capacidad viaria, la cual, en los escenarios 'R' y 'B', puede variar con la implantación de los nuevos sistemas de transporte público en plataforma reservada<sup>123</sup>).

En consecuencia, el volumen de tráfico mixto a lo largo del vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de una línea que es originado por viajes de tipo pasante se va a representar, en cada caso, como una fracción de la capacidad viaria de aquellos. Por tanto, la variable asociada a dicha fracción estará indicando, en definitiva, la aportación o contribución de los vehículos que realizan viajes pasantes en el valor medio del ratio entre el volumen total de tráfico mixto y la capacidad viaria representativa. Ese volumen total de tráfico mixto estará incluyendo vehículos que efectúan viajes no pasantes (cálculo endógeno<sup>124</sup>) y vehículos cuyo tránsito responde a la realización de viajes pasantes (determinación exógena). En viales de carácter urbano, los vehículos realizando viajes pasantes supondrán habitualmente una fracción relativamente pequeña sobre el volumen total de tráfico. Como tónica general, esta fracción puede ser sensiblemente mayor en viales de ámbito metropolitano, y muy superior en viales orientados al transporte interurbano (no incluidos en el ámbito de estudio de esta tesis).

A nivel general, debido a la reducida fracción que los viajes externos suelen representar, los esfuerzos de medición y modelización dedicados a este tipo de viajes han sido tradicionalmente menos intensos que para viajes internos (Martin y McGuckin, 1998: p. 48). Además, es habitual que exista una importante falta de datos sobre los viajes pasantes (al menos en comparación con los internos), pero la pequeña proporción de los mismos favorece que los errores asociados a la estimación de estos viajes tengan generalmente escaso peso (NCHRP, 2012: p. 51).

En los típicos modelos multizonales de transporte, las estimaciones relativas a viajes externos suelen basarse en datos de conteos de tráfico realizados en las estaciones externas de control (situadas en el cordón exterior que delimita el área de estudio), complementados, siempre que sea posible, mediante encuestas cordón (Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 85). En general, las características de la demanda de viajes externos dependen fundamentalmente de cada localización geográfica y de las particularidades de cada área urbana, por lo que la capacidad de transferir dichas características entre distintas áreas

<sup>123</sup> De este modo se contempla, al menos tentativamente, la capacidad de los conductores que realizan viajes pasantes para escoger rutas alternativas en función de la capacidad viaria disponible.

<sup>124</sup> Además de los viajes internos (I-I, interior-interior), los viajes con uno de sus extremos (origen o destino) en el área de influencia directa del corredor, eje o itinerario son considerados, a efectos de la modelización planteada, como potencialmente susceptibles de ser captados por el transporte público.

urbanas es sumamente limitada (Martin y McGuckin, 1998: p. 49). En particular, para el caso de los viajes pasantes (E-E) pueden identificarse varios factores que afectan a la cantidad de este tipo de viajes (NCHRP, 2012: p. 50):

- Tamaño del área: generalmente, cuanto mayor sea el tamaño del área menor será la proporción de viajes pasantes.
- Presencia de rutas transversales principales: la existencia de este tipo de rutas favorece una mayor proporción de viajes pasantes.
- Ubicación del área urbana con respecto a otras: la localización de otras áreas urbanas en las proximidades del área de estudio tiene efectos significativos en los patrones de movilidad de la región completa.
- Existencia de barreras físicas (líneas pantalla), ya sean naturales o artificiales: la presencia de barreras físicas es un condicionante que limita la cantidad de viajes pasantes.

Dado que habitualmente existe un apreciable nivel de desconocimiento sobre los viajes de tipo pasante y sus características, y además, el formato en el que deben ser incorporados al modelo involucra también a la capacidad representativa de los viales (que, como se vio previamente, es una variable afectada de incertidumbre), se propone que la fracción de la capacidad viaria del vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de cada línea que es ocupada por vehículos que realizan viajes pasantes sea modelizada como una variable aleatoria. A tal objeto, se plantean distribuciones triangulares de probabilidad, que para quedar definidas requieren la introducción, como datos de entrada del modelo, de los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle EEVCmin_{ijk}, EEVCmax_{ijk}, EEVCmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i=1, 2, \dots, NL ; j=1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $EEVCmin_{ijk}$ ,  $EEVCmax_{ijk}$  y  $EEVCmod_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la fracción o proporción de la capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$  que es ocupada por vehículos (expresados en automóviles ligeros equivalentes, PCE) que realizan viajes pasantes durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ .

Estos parámetros de entrada son de tipo adimensional, siendo expresados en el modelo como proporción decimal.

### 5.10.3. Tasa inicial (año base) de ocupación en automóvil particular

Los procesos de conversión entre volumen de viajes (personas) en vehículo motorizado particular y volumen de vehículos en circulación empleados para realizar dichos viajes se fundamentan en el número medio de personas que viajan simultáneamente en cada vehículo. A este número se le denomina tasa o factor de ocupación.

En el caso del automóvil particular, las mejores prácticas para obtener las tasas de ocupación por automóvil se basan, siempre que exista suficiente información a escala local, en datos de encuestas a nivel de hogares sobre actividades y hábitos de movilidad (NCHRP, 2012: p. 61). No obstante, se pueden identificar algunos patrones bastante comunes en cuanto al comportamiento de la tasa de ocupación de automóviles según una serie de factores de influencia (Martin y McGuckin, 1998: pp. 77-79):

- El tipo y motivo o propósito del viaje son los factores de mayor incidencia sobre la tasa media de ocupación por automóvil. Así, los viajes por desplazamiento al centro de trabajo presentan generalmente tasas de ocupación notablemente más bajas que los viajes realizados por el resto de motivos.

Entre estos últimos, los viajes realizados por ocio o entretenimiento (que tienen un fuerte componente social) se caracterizan por las tasas de ocupación más elevadas<sup>125</sup>. Los viajes relacionados con compras presentan normalmente tasas de ocupación algo más bajas, pero aun así bastante más elevadas que los desplazamientos al centro de trabajo.

- Las tasas de ocupación por vehículo también suelen variar según la hora del día, aunque esta variación está asociada en gran parte a la variación de los motivos o propósitos de viaje que resultan mayoritarios en cada franja horaria. En general, las tasas de ocupación más bajas suelen ser observadas durante las horas pico, mientras que las horas valle presentan tasas más altas.
- Los niveles de ingreso son otro factor que generalmente afecta a las tasas de ocupación por vehículo. Dichas tasas tienden a decrecer (aunque no muy acusadamente) a medida que aumenta el nivel de ingresos del viajero. Un factor adicional de influencia son los costes de estacionamiento en el destino del viaje, ya que los viajes a zonas con un mayor coste de aparcamiento tienden a presentar, a igualdad de otras variables, tasas de ocupación por vehículo más elevadas que aquellos viajes realizados a áreas con costes de estacionamiento bajos o nulos.
- En cuanto al tamaño poblacional del área urbana, no parece que exista una correlación clara entre dicha característica y las tasas de ocupación por vehículo (NCHRP, 2012: p. 61).

Para aquellos casos en los que no se encuentren disponibles datos locales sobre las tasas de ocupación de automóviles, las alternativas más apropiadas consisten en recurrir a valores generales de carácter orientativo, como los indicados por Martin y McGuckin (1998: pp. 77-79) y por NCHRP (2012: p. 61). La primera de estas fuentes ofrece un mayor nivel de detalle en la incorporación de posibles factores de influencia tales como el propósito o motivo del viaje, la población del área urbana, la hora del día, el nivel de ingresos, o el tipo de vial de circulación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos valores reflejan tasas medias de ocupación correspondientes aproximadamente al año 1990, por lo que podrían haber cambiado sensiblemente desde entonces. El nivel de desagregación con el que se ofrecen las tasas medias de ocupación de automóviles por parte de NCHRP (2012: p. 61) es más limitado, pero los datos en los que están basados son bastante más recientes (2009). Las tasas de ocupación para el conjunto general de automóviles varían entre 1.09 (viajes por motivos laborales y basados en el hogar, durante la hora punta de la mañana) y 1.75 (media diaria para viajes basados en hogar por motivos distintos del trabajo y del traslado de menores a centros escolares). Con respecto a cualquiera de estas dos fuentes, debe tenerse presente que los valores indicados están basados en encuestas nacionales de movilidad efectuadas en Estados Unidos, por lo que la posible transferencia de estas tasas de ocupación a otros contextos geográficos debe ser tratada con cautela.

En este sentido, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2010) recopiló valores medios de las tasas de ocupación de automóviles para una muestra de varios países europeos, entre ellos España. En el caso español, dicha tasa se sitúa en torno a 1.7 (datos entre 2004 y 2007). Sin embargo, se debe tener en cuenta que este dato no es específico para viajes urbanos y/o metropolitanos, sino que se trata de un valor genérico que incluiría también viajes interurbanos. En relación con esta diferenciación, otro documento anterior de la propia Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2000: p. 100) señalaba, en general, tasas medias de ocupación por automóvil de 1.3 para desplazamientos urbanos y de 1.8 para viajes de larga distancia. También se recogen —citando como fuente original a la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 1997)— rangos típicos de dicha tasa según el propósito o motivo de viaje, con los siguientes valores:

- Viajes de tipo *commuting* a/desde el centro de trabajo: 1.1–1.2.
- Viajes familiares: 1.4–1.7.
- Viajes de ocio y turismo: 1.6–2.0.

<sup>125</sup> A un nivel similar al de los viajes por ocio y entretenimiento, se añadirían también los viajes realizados por otros motivos no especificados (como por ejemplo el traslado de menores a centros escolares) y los viajes no basados en el hogar.

Como conclusión general, un aspecto clave en la estimación de la tasa de ocupación por automóvil más apropiada para cada posible caso son las fracciones o proporciones de viajes correspondientes a cada uno de los motivos o propósitos para los cuales se contemplen diferentes valores. Por ello, resulta altamente recomendable que los valores concernientes a dicha tasa se establezcan de forma coordinada con los datos relativos a la composición de la demanda de movilidad según tipos de viaje.

En cualquier caso, incluso disponiendo de datos procedentes de encuestas locales, la tasa de ocupación por automóvil puede estar sometida a un cierto nivel de incertidumbre, que lógicamente será mayor a medida que la información empleada para su estimación esté menos particularizada o proceda de la extrapolación de datos tomados en otros contextos sociales y geográficos diferentes. En consecuencia, se opta por modelizar dicha tasa como una variable aleatoria, proponiéndose al respecto la adopción de distribuciones triangulares de probabilidad. Dado que estas se parametrizan mediante su mínimo, máximo y moda, es necesario especificar, como datos de entrada del modelo, los siguientes grupos de valores:

$$\langle OCcmin_{ijk}, OCcmax_{ijk}, OCcmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $OCcmin_{ijk}$ ,  $OCcmax_{ijk}$  y  $OCcmod_{ijk}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la tasa de ocupación de los automóviles particulares que transitan por el vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , según datos o estimaciones correspondientes al año base.

Todos los valores numéricos de la tasa de ocupación en automóvil particular están expresados en número de personas por cada vehículo de este tipo [prs/veh].

#### 5.10.4. Tasa de ocupación en moto o ciclomotor

Similarmente a lo indicado en el caso del automóvil particular, la conversión entre volumen de viajes (personas) efectuados en la opción modal de moto o ciclomotor y el volumen de este tipo de vehículos que forma parte del tráfico mixto requiere establecer un valor de su tasa o factor de ocupación.

Aunque la información al respecto es escasa, las propias características de los vehículos motorizados de dos ruedas permiten inferir que, al menos en el caso de los países desarrollados, su tasa media de ocupación solo será ligeramente superior a 1. Como dato orientativo de referencia, se puede apuntar que, según la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables de EE.UU. (DOE/EERE, 2010), la tasa media de ocupación por vehículo en dicho país en 2009 era de 1.18 en el caso de las motocicletas.

Dada la generalmente limitada disponibilidad de datos sobre la tasa de ocupación en moto y ciclomotor y la previsible incertidumbre que por tanto puede existir al respecto, se propone como mejor opción que dicho valor sea tratado en el modelo como una variable aleatoria. Para ello, se plantea una distribución triangular de probabilidad, de tal forma que se deben indicar, como datos del modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle OCmmin, OCmmax, OCmmod \rangle$$

donde  $OCmmin$ ,  $OCmmax$  y  $OCmmod$  representan el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la tasa de ocupación en motos y ciclomotores aplicable al área urbana o metropolitana en estudio. Este conjunto de parámetros se expresan en número de personas por cada vehículo de tipo moto o ciclomotor [prs/veh].

Obsérvese que, en el caso concreto de motos y ciclomotores, se ha estimado oportuno prescindir de la diferenciación de distribuciones de probabilidad según el vial o viales de circulación que sirven de

soporte al trayecto de las líneas, el período horario y el sentido de viaje. Dadas las limitaciones de datos que generalmente afectan a la tasa de ocupación de motos y ciclomotores, su reducido margen de variabilidad y el hecho de que la investigación disponible no resulta suficiente para determinar unos criterios generales en los que basar la influencia de dichos aspectos, se considera que la inclusión de distribuciones con parámetros diferenciados difícilmente aportaría mejoras significativas a las capacidades del modelo.

Adicionalmente, nótese que, por razones similares a las indicadas en el párrafo anterior, la tasa de ocupación de motos y ciclomotores obtenida en cada simulación aleatoria se va a considerar constante a lo largo de todo el horizonte de evaluación, con el mismo valor del año base. Sin embargo, la capacidad de incorporar una posible evolución temporal de la tasa de ocupación sí se va a incluir en el modelo en el caso de los automóviles. En relación con esta cuestión se introduce el siguiente epígrafe.

### 5.10.5. Evolución futura de la tasa de ocupación en automóvil particular

La tasa de ocupación en automóvil particular ha estado sometida durante las últimas décadas a algunos cambios de tendencia bastante significativos y, del mismo modo, es esperable que los valores futuros puedan diferir en mayor o menor medida de los actuales. Para representar estas tendencias futuras en el modelo se recurre, simplificada, a una evolución de tipo lineal, la cual puede ser expresada en términos matemáticos del siguiente modo:

$$Z_Y = Z_{Y-1} + \xi = Z_0 + \xi \cdot (Y - Y_0) \quad (5.11)$$

donde  $Z_Y$  representa el valor de la variable dependiente analizada (la tasa de ocupación para este caso) en el año  $Y$ ,  $Z_0$  es el valor inicial de la misma (en el año base  $Y_0$ ) y  $\xi$  simboliza la constante de variación anual de dicha variable dependiente (número de personas por vehículo en este caso).

En relación con esta cuestión, en Estados Unidos ya a finales del siglo XX (Martin y McGuckin, 1998: pp. 76) se señalaba que la tendencia general en las tasas de ocupación de vehículos había sido descendente durante las últimas décadas de dicho siglo (1970s, 80s y 90s). Esta tendencia decreciente ha estado ligada principalmente al incremento en las tasas de posesión de automóvil y a la disminución del tamaño medio de los hogares. Por aquel entonces (1998), se incidía en que las personas que compartían viaje en coche (*carpooling*), especialmente cuando el acto involucraba a personas de distintos hogares, constituían una parte muy pequeña del total de viajeros.

Los datos indicados por la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables de EE.UU. (DOE/EERE, 2010) señalaban un cierto cambio de tendencia producido aproximadamente entre la segunda mitad de la década de los 1990s y la primera década del s. XXI. Durante este período (1995–2009), la tasa de ocupación por vehículo se mantuvo con muy pocas variaciones en el caso de automóviles de tipo turismo. Por su parte, experimentó un ascenso bastante apreciable para furgonetas de pasajeros (*vans*) y para todocaminos o todoterrenos ligeros (SUVs o *sport-utility vehicles*). La tendencia también fue creciente, aunque más moderada, en el caso de camionetas (*pickups*).

La tasa de ocupación de automóviles ha seguido en Europa Occidental tendencias bastante similares. La Agencia Europea de Medio Ambiente apuntaba en el año 2000 (EEA, 2000: p. 99) una caída continua de dicha tasa, pasando, a nivel europeo, de 2–2.1 a principios de los 1970s a 1.5–1.6 a principios de los 1990s. De acuerdo a datos recogidos durante la primera década del s. XXI, esta misma agencia (EEA, 2010) señalaba una tendencia de estabilización de la tasa de ocupación por automóvil en Europa Occidental durante dicho período. Por el contrario, los países de Europa del Este mostraban una tendencia decreciente, si bien es cierto que partían de valores más altos.

A lo largo de la actual década, se ha desarrollado un entorno más favorable a la realización de viajes compartidos en coche (*carpooling*) entre personas de distintos hogares, muy probablemente impulsado por los rápidos avances en el campo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (véanse algunos ejemplos relacionados con el desarrollo del '*carpooling*' en: Buliung *et al.*, 2010; Lovejoy y

Handy, 2011; Abrahamse y Keall, 2012; Chan y Shaheen, 2012; He *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2016; Berlingiero *et al.*, 2017; Czioska *et al.*, 2017; Prieto *et al.*, 2017). Otro fenómeno relacionado, aunque distinto, es la expansión y auge de las redes de automóviles de uso temporal (*carsharing*). Si bien el '*carsharing*' no implica necesariamente una mayor ocupación del vehículo en cada viaje, ya algunas de las experiencias pioneras en este campo apuntaban a una tasa de ocupación por coche notablemente mayor que en el resto de automóviles: según EEA (2000: p. 100), los coches de la compañía StattAuto CarSharing GmbH<sup>126</sup>, que comenzó su operación en 1988 en Berlín, tenían una ocupación media de 2 personas, frente a una tasa media en Alemania de 1.3.

Desde el punto de vista infraestructural, una medida clásica destinada a fomentar una mayor tasa de ocupación por automóvil es la implantación en grandes arterias urbanas y metropolitanas de carriles para Vehículos de Alta Ocupación (VAO o HOV: *High Occupancy Vehicles*), generalmente compartidos con autobuses del transporte público y eventualmente con otros tipos de vehículos (automóviles de bajas emisiones, motos o ciclomotores, vehículos de emergencias, etc.). Otras medidas menos extendidas que tienen por objeto promover una mayor ocupación de los automóviles son el pago de peajes reducidos para los vehículos con un alto número de ocupantes (especialmente cuando se trata de peajes por congestión en el acceso al centro de las ciudades) o la rebaja de los costes de estacionamiento para vehículos de estas características.

Por tanto, parece existir en general una tendencia favorable a un aumento de la ocupación media por automóvil, ya sea fomentada desde las administraciones públicas, impulsada por la propia sociedad, o promovida por iniciativas empresariales (compañías de '*carpool matching*' y '*ridesharing*'). Este entorno favorable constituye una base que permite conjeturar un cierto incremento de las tasas de ocupación en automóvil particular en los próximos años, aunque evidentemente resultaría mucho más incierto prever si esta tendencia positiva se va a mantener a medio y largo plazo.

En cualquier caso, y al margen de posibles especulaciones sobre el signo de dicha tendencia, se hace necesario que la futura variación anual (equivalente a  $\xi$  en la ecuación 5.11) de la tasa de ocupación en automóvil particular sea tratada en el modelo como una variable aleatoria. Se recurre para ello a distribuciones triangulares de probabilidad, con lo que se deben incorporar, como datos de entrada al modelo, los valores de los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle iOCcmin_{ijk}, iOCcmax_{ijk}, iOCcmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $iOCcmin_{ijk}$ ,  $iOCcmax_{ijk}$  e  $iOCcmod_{ijk}$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media (en número de personas por vehículo) de la tasa de ocupación de los automóviles particulares que recorren el vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ .

Los parámetros de las distribuciones triangulares a definir deben establecerse tomando como base una variación anual promediada a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, puesto que el valor de variación extraído para cada simulación aleatoria se aplicará por igual, en el modelo desarrollado, a todos y cada uno de los años de dicho período. Esto se traduce, desde el punto de vista de la modelización, en una evolución lineal con distintas constantes (es decir, pendientes) para cada simulación.

<sup>126</sup> Actualmente Greenwheels AG.

### 5.10.6. Proporción de cumplimiento de la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses de transporte público desde paradas

Las leyes o reglamentos de circulación vigentes en un determinado estado o región administrativa pueden obligar a los conductores de vehículos particulares a facilitar, en todo lo posible, la reincorporación a la circulación de los vehículos de transporte colectivo de viajeros cuando estos se disponen a salir de una parada señalizada, especialmente en vías urbanas. En el caso de España, este tipo de norma aparece recogida en el Artículo 73 del Real Decreto 1428/2003 (Ministerio de la Presidencia, 2003), que cita expresamente como maniobras destinadas a facilitar dicha reincorporación el cambio lateral de carril (en caso de ser posible), la reducción de velocidad, e incluso la detención si fuese preciso.

Este tipo de normas de circulación (conocidas en inglés como '*yield-to-bus laws*') están destinadas a eliminar, o al menos reducir, la demora de reincorporación (*reentry delay*) de los autobuses de transporte público cuando estos deban reiniciar la marcha desde una parada de tipo entrante o en bahía (TCRP, 2013: pp. 6.58-6.59, 6.72), desde la cual tienen que integrarse de nuevo en el flujo de tráfico que transita por el carril contiguo de circulación. Sin embargo, la efectividad de esta norma depende en gran medida del grado de cumplimiento de la misma por parte de los conductores de vehículos particulares. Por ello, resulta conveniente tener en cuenta este factor en el cálculo de las demoras de reincorporación acumuladas a lo largo de un trayecto entre terminales o cabeceras por parte del modo de transporte público que opera en tráfico mixto (autobús convencional).

La proporción de ocasiones en las que a un autobús que se incorpora a la circulación desde una parada entrante o en bahía se le concede realmente prioridad de reincorporación por parte de los conductores de vehículos motorizados privados es, en general, una variable sobre la que no suele existir una determinación cuantitativa muy precisa, estando afectada por tanto por notables niveles de desconocimiento y/o incertidumbre. En consecuencia, resulta más adecuado que el modelo desarrollado incorpore esta proporción en forma de variable aleatoria, con lo cual se adoptan distribuciones triangulares de probabilidad para dicha variable. Así pues, es necesario especificar, como datos de entrada del modelo, los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle y_{cmin}_{ijk}, y_{cmax}_{ijk}, y_{cmod}_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $y_{cmin}_{ijk}$ ,  $y_{cmax}_{ijk}$  e  $y_{cmod}_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la fracción o proporción de ocasiones en las que a un autobús que se incorpora a la circulación en tráfico mixto desde una parada entrante o en bahía de la línea  $i$  (recorrida en sentido  $k$ ) se le concede prioridad efectiva de reincorporación por parte de los conductores de vehículos motorizados privados que circulan durante el período horario  $j$ . Téngase presente que estos valores adimensionales deben ser introducidos en el modelo en forma de proporción decimal (no en formato porcentual).

Nótese que los valores de esta variable únicamente afectan al sistema de autobús convencional en tráfico mixto (escenario 'O' y fase de implantación en los escenarios 'R' y 'B'), y, más en concreto, solo a la fracción de paradas o estaciones que sean de tipo entrante o en bahía (*off-line stops*).

En relación con este tema, el *Transit Cooperative Research Program* (King, 2003) estudió, para varios casos pertenecientes a Estados Unidos y Canadá, los niveles de efectividad de diversos programas de implantación de normativas que obligan a los conductores de vehículos particulares a permitir la fácil reincorporación de autobuses desde paradas. Entre otras cuestiones, se consultó el nivel cualitativo de cumplimiento efectivo de dicho tipo de normativas mediante encuestas a los conductores de autobuses de cuatro agencias de transporte público (tres de EE.UU. y una de Canadá) que operan rutas fijas, obteniéndose un total de 722 encuestas. Sobre la muestra total, el 2% de los encuestados indicaron que casi todos los conductores les cedían el paso en la reincorporación, el 11% respondieron que la cesión



de paso se producía en un alto porcentaje de ocasiones, un 22% señalaron que en aproximadamente la mitad de los casos, un 31% manifestaron que solo se producía la cesión en un bajo porcentaje de ocasiones, y finalmente, un 32% respondieron que casi nunca se les cedía el paso<sup>127</sup> (King, 2003: pp. 37-38, Tabla 20). Se aprecian además diferencias muy notables entre las respuestas de conductores de distintas agencias, que en este caso pueden estar parcialmente explicadas por los diferentes tipos de señalización de refuerzo colocada en la parte posterior de los autobuses (mayor efectividad de las señales luminosas parpadeantes, tal como se indica también en Fabregas *et al.*, 2011). Otra conclusión extraída de las consultas a las agencias de transporte es que los ahorros de tiempo derivados de la implantación de estas normas resultan mayores en aquellas condiciones de tráfico en las que la velocidad de circulación de los vehículos particulares es baja (King, 2003: p. 3), de lo que se puede deducir que el grado de cumplimiento tiende a ser más elevado en viales con menor capacidad y límites de velocidad más restrictivos (como calles y arterias secundarias).

Por otra parte, incluso en aquellos hipotéticos casos de estudio ubicados en estados o regiones administrativas en las que no se hubiesen promulgado normas de este tipo, puede existir una cierta parte de conductores que cedan voluntariamente el paso o faciliten por iniciativa propia la reincorporación de los autobuses desde las paradas, con lo cual los valores adoptados para  $ycmin_{ijk}$ ,  $ycmax_{ijk}$  e  $ycmod_{ijk}$  no tendrían por qué ser necesariamente iguales a cero (si bien para el mínimo, dependiendo de las condiciones y hábitos locales, una buena práctica podría ser igualarlo a cero si no se han promovido este tipo de conductas).

## 5.11. DATOS SOBRE COSTES UNITARIOS RELATIVOS AL TIEMPO DE VIAJE

### 5.11.1. Coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo

El valor monetizado de los ahorros de tiempo de viaje suele ser uno de los elementos de mayor cuantía en la evaluación de los beneficios derivados de una infraestructura o proyecto de transporte (EC-DGRP, 2008: p. 79). Además de su importante participación en la evaluación de beneficios (siendo en la mayoría de proyectos uno de los principales componentes del excedente de los viajeros), la valoración que cada segmento de viajeros haga del ahorro de una unidad de tiempo (minuto, hora, etc.) en la realización del viaje desempeña también un papel clave en el comportamiento decisional de los mismos, por lo que se convierte en un factor decisivo en la configuración de la demanda.

Por ello, el establecimiento o determinación de los valores unitarios del tiempo de viaje (unidades monetarias por persona y unidad de tiempo) constituye una etapa de gran relevancia en los procesos de modelización y subsiguiente evaluación. A lo largo del modelo desarrollado en esta tesis, para referirse al valor monetizado del tiempo de viaje se va a emplear predominantemente la designación 'coste del tiempo de viaje' por razones de consistencia terminológica, dado que dicho valor monetizado entrará a formar parte del cálculo del coste generalizado por viaje (o de las variaciones del mismo) en una determinada opción modal. No obstante, es equivalente a otras denominaciones que resultan frecuentes en la literatura técnica sobre esta materia, tales como valor del tiempo (VoT, *Value of Time*) o valor de los ahorros de tiempo de viaje (VTTS, *Value of Travel Time Savings*).

En el transporte de viajeros, el coste o valor monetario del tiempo personal transcurrido en unas determinadas circunstancias de viaje (por ejemplo, a bordo del vehículo) se puede determinar mediante el cociente entre la utilidad marginal (negativa) del tiempo de viaje consumido en dichas circunstancias y la utilidad marginal (negativa) del coste puramente monetario del viaje (*out-of-pocket money*). Es decir, si un aumento del tiempo de viaje a bordo del vehículo de 1 minuto produjese una variación de la utilidad del viaje  $\beta_t$  ( $\beta_t < 0$ ), y un aumento del coste monetario del viaje de 1 euro (por ejemplo, en la tarifa en el caso del transporte público o en peajes en el caso del transporte privado) generase un

<sup>127</sup> El 1-2% restante corresponde a encuestados que no respondieron a esta pregunta.

cambio  $\beta_m$  ( $\beta_m < 0$ ) en la utilidad del viaje, entonces el coste o valor monetario del tiempo de viaje a bordo del vehículo vendría dado por  $\beta_t / \beta_m$  (€/min)<sup>128</sup>.

Por otra parte, si bien es cierto que el modelo de demanda utilizado aplicará valores promediados del coste del tiempo de viaje sobre el conjunto de viajeros de un determinado tipo de opción modal (aunque con valores específicos según se trate de transporte público o de transporte motorizado privado), es importante que dicho coste promediado refleje, en cada posible línea (o viales de circulación que sirvan de soporte a su trayecto), en cada período horario y en cada sentido de viaje, las diferentes composiciones del conjunto de viajeros en cuanto a los tipos de viajes realizados. En este sentido, la estructura de segmentación de valores del tiempo de viaje se va a desarrollar en consonancia con la utilizada en el proyecto europeo HEATCO (*Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*), la cual se empleó ya anteriormente para la categorización básica de los tipos de viaje (epígrafe 5.8.4). De esta forma, se mantiene la consistencia metodológica entre dicha categorización y la determinación de los costes del tiempo de viaje.

Dentro del citado proyecto HEATCO, se llevó a cabo (Shires y De Jong, 2006) un meta-análisis basado en 77 estudios sobre el valor del tiempo de viaje en transporte de viajeros<sup>129</sup>, los cuales procedían de hasta 30 países del ámbito mundial, aunque con especial énfasis en el contexto europeo. Con ello se configuró una base de datos formada por un total de 1299 valores del tiempo de viaje. Esta base de datos permitió el desarrollo y ajuste de varios meta-modelos que posteriormente fueron aplicados a los atributos (por ejemplo, el PIB *per cápita*) de una serie de países (los 25 de la Unión Europea en aquel momento más Suiza) al objeto de obtener valores por defecto del tiempo de viaje en cada uno de ellos (para aquellos países que ya disponían de estudios propios a nivel nacional los valores obtenidos en el meta-modelo se proponían a efectos de comparación y contraste). La segmentación aplicada en el proyecto HEATCO permite diferenciar valores del tiempo según el tipo de viaje, distinguiendo entre viajes en tiempo de trabajo remunerado (*work/business*) y viajes fuera del tiempo de trabajo (*non-work*), que a su vez se subdividen entre viajes de tipo *commuting* y viajes de otros tipos (por ocio, compras, etc.). En el caso de los viajes fuera del tiempo de trabajo, se distinguen diferentes valores del tiempo según el desplazamiento sea de corta o de larga distancia. Además, en todos los casos se especifican distintos valores del tiempo según el tipo de modo de transporte en el que se realiza el viaje (se diferencian tres categorías al respecto, originalmente designadas como aéreo, autobús, y coche o tren).

De acuerdo a Bickel *et al.* (2006: pp. 53-54), los métodos utilizados para la valoración económica de ahorros en el tiempo de viaje suelen diferir según se trate de viajes en tiempo de trabajo remunerado o viajes fuera del tiempo de trabajo, ya que los potenciales beneficios se generan mediante diferentes mecanismos. Así, para los viajes fuera del tiempo de trabajo es habitual que se empleen enfoques basados en encuestas (en preferencias declaradas y/o reveladas) de las que se derive la disposición a pagar de los viajeros (*WTP approach*) por una reducción del tiempo de viaje, la cual depende de las preferencias personales de los mismos. En cambio, para los viajes en tiempo de trabajo remunerado, los beneficios derivados de ahorros de tiempo de viaje están relacionados con la productividad marginal del trabajo, por lo que se utiliza —como mínimo— un enfoque basado en el ahorro de costes (CSA o *Cost Saving Approach*). Este enfoque asume que no existe un impacto en la utilidad para el empleado y que todo el ahorro de tiempo puede ser transferido a rendimiento productivo. Un enfoque más complejo con respecto a los viajes en tiempo de trabajo remunerado es el denominado "*Hensher approach*" (Hensher, 1977), en el que se tiene en cuenta que no todo el tiempo de viaje es totalmente improductivo y que no todos los ahorros de tiempo se van a traducir en producción extra. En resumen, el factor diferencial entre ambos tipos de viajes —y sus correspondientes enfoques metodológicos de valoración— radica en que los beneficios socioeconómicos se generan al transferir tiempo desde una actividad intermedia,

<sup>128</sup> En este pequeño ejemplo ilustrativo se está considerando para la utilidad una forma funcional lineal (al menos con respecto a las variables mencionadas), tal como:  $V = \beta_t \cdot t + \beta_m \cdot m + \dots$ , siendo  $V$  la utilidad representativa o sistemática,  $t$  el tiempo de viaje en el vehículo (en minutos en este ejemplo),  $m$  el coste monetario del viaje (en euros en este caso), y  $\beta_t$  y  $\beta_m$  sus respectivos coeficientes. Bajo estas condiciones se cumple  $\partial V / \partial t = \beta_t$  (min<sup>-1</sup>) y  $\partial V / \partial m = \beta_m$  (€<sup>-1</sup>).

<sup>129</sup> Los meta-análisis desarrollados en el proyecto HEATCO (Shires y De Jong, 2006) también estudian el valor del tiempo de viaje en transporte terrestre de mercancías, pero ello no resulta de interés para los objetivos de estudio de esta tesis.

como es viajar, a dos clases de actividades de diferente naturaleza: o bien a actividades de ocio, descanso, etc. (caso de los viajes fuera del tiempo de trabajo) o a bien a actividades de trabajo productivo (caso de los viajes en tiempo de trabajo remunerado).

Idealmente, estos métodos de valoración deben ser aplicados a nivel local para obtener el coste o valor monetario del tiempo de viaje para cada una de las segmentaciones (tipo de viaje, corta o larga distancia, tipo de modo, renta del viajero, etc.) que resulte preciso considerar. En ausencia de dichos datos locales, se pueden utilizar los valores establecidos en las recomendaciones o guías nacionales (donde estas estén disponibles con unos apropiados niveles de segmentación) o, en su defecto, puede recurrirse a la transferencia de valores procedentes de otros estudios que sean técnicamente sólidos, con los adecuados ajustes (en este último caso, la mejor opción son los valores derivados del meta-modelo desarrollado en el proyecto HEATCO). En el caso de España, dicho proyecto (Bickel *et al.*, 2006: p. 72, Tabla 4.5) recomendaba, para el transporte de viajeros, el uso de valores obtenidos en el meta-modelo, tanto en el caso de viajes en tiempo de trabajo remunerado como en viajes fuera del tiempo de trabajo. Además, los resultados obtenidos en el proyecto HEATCO son propuestos como posible fuente de valores del tiempo de viaje por varios documentos de referencia sobre la evaluación de proyectos, tales como la '*Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*' de la Dirección General de Política Regional de la Comisión Europea (EC-DGRP, 2008: p. 79-80) o la documentación resultante del proyecto de investigación *Evaluación Socioeconómica y Financiera de Proyectos de Transporte* (Betancor *et al.*, 2009: pp. 56, 59; de Rus *et al.*, 2010: pp. 73-74).

En consecuencia, y previendo la posible ausencia de datos adecuados a nivel local, la estructura de segmentación de valores del tiempo de viaje propuesta en el modelo desarrollado en esta tesis se acomodará a la información al respecto disponible en el proyecto HEATCO. En este sentido, se recomienda (Bickel *et al.*, 2006: p. 55), como situación ideal, que la desagregación de valores del tiempo de viaje se efectúe por propósito o tipo de viaje, por nivel de renta, por distancia (corta frente a larga) y por modos (a los cuales se asocia un determinado nivel de comodidad). Sin embargo, se admite la utilización de valores medios por modo cuando limitaciones en los modelos de transporte no permitan considerar estos niveles de segmentación. De hecho, los valores proporcionados por el propio proyecto no incluyen explícitamente una segmentación por niveles de renta (aunque esta se incorpora, de forma agregada, en los atributos de cada país utilizados para el desarrollo y aplicación del meta-modelo). En estos casos los valores del tiempo de viaje en cada modo están reflejando de forma combinada los niveles medios de renta de los usuarios de dicho modo y las características propias del modo de transporte (confort, calidad, etc.). Es decir, bajo estas condiciones los valores obtenidos para cada modo incorporan conjuntamente dos tipos de efectos distintos (Shires y De Jong, 2006: p. 17): un efecto relacionado con el tipo de usuario (los usuarios de algunos modos pueden presentar características socioeconómicas marcadamente diferentes a las de aquellos viajeros que emplean otros modos), y otro efecto que es el realmente específico del modo de transporte (viajar en algunos modos puede resultar menos molesto o más provechoso que en otros).

En síntesis, se compendian a continuación los valores segmentados del tiempo de viaje que, como datos del modelo (directos o indirectos), van a entrar a formar parte del cálculo del coste promedio del tiempo de viaje para el conjunto de viajeros de una determinada categoría modal (transporte público o transporte motorizado privado):

- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) realizados en transporte público.
- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) efectuados en transporte público.
- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes en tiempo de trabajo remunerado realizados en transporte público.

- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) efectuados en vehículo motorizado privado.
- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) realizados en vehículo motorizado privado.
- Coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes en tiempo de trabajo remunerado efectuados en vehículo motorizado privado.

El coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos de tipo *commuting* en transporte público se utilizará como valor primigenio de referencia (dato directo), mientras que los restantes costes unitarios del tiempo de viaje en transporte público se determinarán —de manera indirecta— mediante factores de proporcionalidad con respecto al susodicho valor primigenio (es decir, el de *commuting* en transporte público). Por su parte, los costes unitarios del tiempo de viaje en transporte motorizado privado se establecerán también de forma indirecta, mediante factores de proporcionalidad, pero tomados con respecto al coste del tiempo en el tipo de viaje equivalente realizado en transporte público.

Por su parte, la segmentación relativa a la distancia de viaje se aplica en este caso de tal forma que, en todos los casos, se adopten los valores del tiempo de viaje correspondientes a desplazamientos de corta distancia, ya que el ámbito de aplicación de la presente tesis es el transporte urbano y metropolitano. En este sentido, la documentación del proyecto HEATCO (Bickel *et al.*, 2006: p. 59) indica que en el meta-análisis desarrollado el concepto de larga distancia se refiere a viajes interurbanos (los cuales, en el caso de viajes fuera del tiempo de trabajo, suelen tener un valor del tiempo de viaje sensiblemente más alto que los de corta distancia).

Obsérvese además que en la definición de los diversos costes unitarios del tiempo de viaje que han de servir como datos de entrada del modelo se hace una referencia específica a que estos deben corresponder a tiempo transcurrido a bordo del vehículo, y en unas condiciones base o estándar. Esta última puntualización quiere decir que se han de excluir de su valoración los efectos de incremento de coste unitario (o disminución de utilidad) vinculados a aumentos en la incomodidad del tiempo de viaje en el vehículo por desarrollarse el viaje en condiciones de aglomeración de pasajeros (en los vehículos de transporte público) o con altos niveles de congestión viaria (en el caso del transporte motorizado privado). Estos posibles incrementos del coste unitario del tiempo son calculados internamente por el modelo en función de la mayor o menor intensidad del tipo de molestia que los genera.

En el caso del transporte público, las condiciones base o estándar se definen, a efectos del modelo desarrollado en esta tesis, como las correspondientes a un pasajero que viaje sentado, sin que se dé la presencia en el vehículo de otros pasajeros de pie (esto equivale, a nivel de modelización, a que el número de viajeros a bordo de la unidad de transporte sea menor o igual que el número de plazas de asiento con las que aquella está equipada).

En el caso del transporte motorizado privado, las condiciones base o estándar para la definición del coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo se establecen de tal forma que el ratio medio Volumen/Capacidad en el vial o viales de circulación utilizados no sea superior a dos tercios ( $\frac{2}{3}$ ). La selección de este límite está basada en los criterios aplicados para la valoración de la congestión del tráfico por el '*Economic Evaluation Manual*' de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: pp. 5.203-5.206), si bien con alguna ligera modificación, ya que dicho manual emplea un umbral de 0.70.

Para cualquiera de los costes unitarios del tiempo a bordo del vehículo segmentados por tipo de viaje y por categoría modal, el enfoque más apropiado —de acuerdo a las directrices generales del modelo desarrollado— es el de tratar dichos costes como una variable aleatoria, tanto en el caso del valor primigenio de referencia (*commuting* en transporte público) como en el de los factores de proporcionalidad a aplicar a los restantes costes unitarios del tiempo de viaje en el vehículo. La necesidad de

modelizar el coste o valor monetario del tiempo de viaje como una variable aleatoria resulta especialmente evidente en todos aquellos casos en los que, por falta de datos específicos a nivel local, es preciso transferir valores por defecto procedentes de recomendaciones o guías nacionales, de resultados de meta-análisis o meta-modelos, de otros casos de aplicación que se consideren similares, etc. Pero incluso aunque se hayan desarrollado estudios a nivel local sobre el valor del tiempo de viaje (lo cual requiere generalmente la realización de una amplia campaña de encuestas en preferencias declaradas y/o reveladas), los resultados obtenidos no dejan de estar sometidos a un cierto nivel de incertidumbre y a la influencia de posibles errores, lo que hace al enfoque basado en variables aleatorias igualmente adecuado. Normalmente, el grado de incertidumbre sobre los costes unitarios del tiempo de viaje se reducirá notablemente en estos casos con respecto a la transferencia de valores por defecto, pero aun así continua siendo relevante.

En conclusión, se adoptan para toda esta clase de datos de entrada distribuciones triangulares de probabilidad, cada una de las cuales deberá ser definida mediante sus valores de mínimo, máximo y moda. Las correspondientes estructuras de datos se detallan a continuación, junto con algunos posibles valores orientativos de referencia.

#### **5.11.1.1. Coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo *commuting***

Como coste básico de referencia (a partir del cual, mediante la aplicación de sucesivos factores de proporcionalidad, se determinará el coste del tiempo de viaje en las restantes categorías) se ha seleccionado el correspondiente a viajes en transporte público de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado). Esta elección se establece, por una parte, en concordancia con los objetivos originarios del modelo desarrollado, que están orientados a evaluar posibles intervenciones en el sistema de transporte público, por lo que parece más apropiado utilizar como referencia el coste o valor del tiempo en dicha modalidad de transporte. Por otra parte, es frecuente que los viajes de tipo *commuting* constituyan la categoría mayoritaria en la movilidad de ámbito urbano y/o metropolitano, particularmente en desplazamientos realizados en transporte público en días laborables y, sobre todo, durante horas punta, así que su elección como referencia parece más adecuada que la de los viajes de los restantes tipos.

Así pues, es necesario introducir, como datos de entrada del modelo, los siguientes valores:

$$\langle VTCpbmin, VTCpbmax, VTCpbmod \rangle$$

donde  $VTCpbmin$ ,  $VTCpbmax$  y  $VTCpbmod$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) realizados en transporte público, aplicable al año base y al ámbito territorial del área urbana o metropolitana en estudio.

Estos valores se introducen en el modelo en unidades monetarias constantes (referenciadas al nivel general de precios de un año específico) por hora [CU/h].

En cuanto a posibles costes unitarios por defecto que sirvan como referencia en ausencia de datos más específicos, un valor de partida recomendable es el obtenido en el proyecto HEATCO mediante la aplicación del meta-modelo desarrollado, que para viajes fuera del tiempo de trabajo de tipo *commuting*, de corta distancia y realizados en autobús<sup>130</sup> indica un valor del tiempo de viaje de 6.12 €/h en el caso de España (Bickel *et al.*, 2006: pp. S10, 74). Este valor es muy similar a la media de la Unión Europea de 25 estados (UE-25), para la que se señalan 6.10 €/h. Ahora bien, estos valores no deberían ser transferidos directamente a los datos de entrada a introducir en una posible aplicación del modelo

<sup>130</sup> De las tres categorías modales disponibles en el análisis (aéreo, autobús, y coche/tren), se adopta el autobús como representativo del transporte público urbano y/o metropolitano, mientras que la opción coche —a pesar de estar incluida en una categoría conjunta con el tren— se toma como representativa del transporte motorizado privado.

objeto de esta tesis, ya que se deben tener en cuenta algunas puntualizaciones con respecto a los mismos. Los valores indicados están expresados a coste de los factores (no a precios de mercado), en euros correspondientes al nivel de precios de 2002 y, según se desprende de Shires y De Jong (2006: p. 20), están obtenidos para la variable explicativa PIB *per cápita* existente en 2003. Por consiguiente, es preciso realizar una serie de ajustes o conversiones que (para una adecuada utilización en el modelo de demanda) transformen estos valores a precios de mercado, expresados en euros referenciados al nivel general de precios de un año lo más actual posible, y con valores actualizados al PIB *per cápita* del año base del modelo (o, en su defecto, a un año lo más actual posible). Esta serie de procesos van a ser aplicados siguiendo las recomendaciones que sobre estas cuestiones se incluían en el propio proyecto HEATCO (Hunt, 2006). Así, las conversiones que resulten necesarias en cada caso deben seguir preferentemente el siguiente orden secuencial (Hunt, 2006: p. 11): (i) conversión entre precios de mercado y coste de los factores; (ii) ajuste al nivel general de precios de un año común; (iii) conversión a una unidad monetaria común, en caso de ser necesario; (iv) proyección de valores futuros o actualización de valores pasados (cambios a lo largo del tiempo de los valores reales, no de los nominales). A continuación se detallan cada uno de estos procesos para el caso del valor unitario del tiempo procedente del proyecto HEATCO:

- i) En primer lugar, debe tenerse en cuenta que los valores monetarios del tiempo de viaje indicados en Bickel *et al.* (2006) están expresados a coste de los factores, lo cual puede ser útil para los posteriores procesos de evaluación socioeconómica, dependiendo del tipo de metodología seguida (elección de coste de los factores o de precios de mercado como unidad de cuenta común). Sin embargo, en la modelización y predicción de la demanda es preferible utilizar los valores que determinan el comportamiento decisional de los viajeros, que en el caso de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado son los valores a precios de mercado (Bickel *et al.*, 2006: p. 80). Por tanto, para su incorporación al modelo de demanda es necesario convertir los valores del tiempo de viaje expresados a coste de los factores (cf) a precios de mercado (pm). La relación general entre ambas unidades de cuenta viene dada por la tasa media de impuestos indirectos sobre los gastos de consumo (abreviadamente  $\tau$ ) en un determinado país (Nellthorp *et al.*, 2001: pp. 2-3; Hunt, 2006: pp. 3-4). Dado que la valoración a coste de los factores es igual a la valoración a precios de mercado dividida entre  $1+\tau$ , resulta inmediato que la valoración a precios de mercado se obtendría, a partir de la valoración a coste de los factores, multiplicando esta última por  $1+\tau$ . La tasa media de impuestos indirectos sobre los gastos de consumo era en España en 2002 del 16.3% (Hunt, 2006: p. 18, Tabla 6). Por tanto, la conversión del valor del tiempo de viaje a precios de mercado produce un resultado de:  $6.12 \cdot (1+0.163) = 7.12 \text{ €}_{2002}(\text{pm})/\text{h}$ . Obsérvese que este valor está muy próximo al directamente obtenido en Shires y De Jong (2006: p. 22, Tabla A21) de  $7.18 \text{ €}_{2003}/\text{h}$ , ya que en el meta-modelo se utilizaron valores a precios de mercado para el tiempo de viaje en desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado. La pequeña diferencia existente puede ser debida al distinto año de referencia del nivel general de precios (2003 frente a 2002).
- ii) El ajuste por evolución del nivel general de precios se realiza en este caso tomando el 2017 como año común de referencia. Para esta conversión deben utilizarse las tasas de inflación del país en cuestión (Hunt, 2006: pp. 4-7). En España se puede recurrir al Índice de Precios de Consumo (IPC). Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), la variación del IPC desde enero de 2002 a enero de 2017 ha sido del 36.1%<sup>131</sup>. Por consiguiente, el ajuste al nivel general de precios de 2017 produce como resultado:  $7.12 \cdot (1+0.361) = 9.69 \text{ €}_{2017}(\text{pm})/\text{h}$ .
- iii) La conversión a una unidad monetaria común no es aplicable en este caso, ya que todos los valores están expresados en euros. Además, tampoco es necesario utilizar ajustes de Paridad de Poder Adquisitivo (PPA o PPP, *Purchasing Power Parity*) entre diferentes países.
- iv) El último ajuste consiste en incorporar los cambios estimados en el valor real (en unidades monetarias constantes) del tiempo de viaje, los cuales suelen vincularse con la evolución de varia-

<sup>131</sup> Dato calculado a través de: <http://www.ine.es/varipc/index.do> [Acceso: septiembre 2017]

bles como el PIB *per cápita* (Hunt, 2006: pp. 8-9). En este sentido, se recomienda por defecto una elasticidad inter-temporal del valor del tiempo de viaje (para cualquiera de los tipos o propósitos de viaje) de 0.7 con respecto al PIB *per cápita* (Bickel *et al.*, 2006: pp. S5, 63-64; Shires y De Jong, 2006: pp. 16-17). Esto significa que el valor del tiempo de viaje en unidades monetarias constantes aumentaría o disminuiría un 0.7% por cada 1% de incremento o reducción del PIB real *per cápita*. En España, según datos tomados del Banco Mundial<sup>132</sup>, el PIB *per cápita* (en euros constantes de 2010) habría pasado de 22,713.73 €<sub>2010</sub> en 2003 a 23,745.82 €<sub>2010</sub> en 2016 (año más reciente disponible). Estos datos suponen un aumento del 4.54% en el PIB real *per cápita* durante dicho período. Aplicando una elasticidad inter-temporal de 0.7 de acuerdo a las recomendaciones anteriormente citadas, se obtendría finalmente un valor actualizado del tiempo de viaje de:  $9.69 \cdot (1 + 0.7 \cdot 0.0454) = 10.00$  €<sub>2017</sub>(pm)/h.

En conclusión, un valor medio del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo *commuting* se situaría, por defecto, en 10.00 €<sub>2017</sub>(pm)/h en el caso de España (con el PIB *per cápita* de 2016).

Este valor es algo superior al que se obtendría al transferir, ajustar y actualizar el valor del tiempo de viaje propuesto en su momento por el proyecto UNITE<sup>133</sup> para viajes de tipo *commuting* en autobús urbano o tranvía (Nellthorp *et al.*, 2001: p. 8, Tabla 3). En el citado proyecto se indicaba un valor de 6.00 €<sub>1998</sub>(pm)/h para dicho segmento de viajes, en base al análisis de estudios sobre el valor del tiempo de viaje desarrollados en Países Bajos, Reino Unido y Suecia. Por tanto, para transferir correctamente ese valor a España sería necesario adaptarlo de acuerdo al PIB *per cápita* ajustado por Paridad de Poder Adquisitivo. El correspondiente factor de ajuste en el caso español era de 0.778 (Nellthorp *et al.*, 2001: p. 9, Tabla 4), de tal modo que al aplicarlo sobre el valor original se obtendría un valor (en España) de 4.67 €<sub>1998</sub>(pm)/h. Para transformar este valor al nivel general de precios de un año común (2017) se aplica la variación del IPC entre enero de 1998 y enero de 2017, que, según datos del INE, es del 51.8%. Este ajuste conduce a un valor de 7.09 €<sub>2017</sub>(pm)/h. Por último, se debe tener en cuenta que el incremento del PIB real *per cápita* desde 1998 hasta 2016 ha sido en España del 21.07%, según datos del Banco Mundial (19,613.80 €<sub>2010</sub> en 1998; 23,745.82 €<sub>2010</sub> en 2016). Aplicando la elasticidad inter-temporal recomendada por el proyecto HEATCO<sup>134</sup> (esto es, 0.7) se obtendría finalmente un valor del tiempo de viaje en transporte público para viajes de tipo *commuting* de 8.13 €<sub>2017</sub>(pm)/h.

#### 5.11.1.2. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

Para determinar el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) que se realicen en transporte público, se va a recurrir a factores de proporcionalidad que lo relacionen con el valor del tiempo en viajes en transporte público de tipo *commuting*, el cual fue adoptado como coste básico de referencia. De este modo, se establecen, en el conjunto de simulaciones aleatorias, correlaciones de sentido positivo entre los valores de tiempo de viaje de los diferentes grupos de segmentación, tal como suele suceder en realidad. Otra ventaja añadida consiste en que con variar solamente el coste básico de referencia se estarán modificando automáticamente los costes de los demás grupos de segmentación, manteniéndose así una proporcionalidad realista entre todos ellos sin necesidad de reajustar separadamente cada coste unitario.

<sup>132</sup> <http://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.PCAP.KN?locations=ES> [Acceso: septiembre 2017]

<sup>133</sup> *UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency*: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/> [Último acceso: 28/01/2020]

<sup>134</sup> Nótese, no obstante, que en el proyecto UNITE se proponía (para cualquier valor o coste) una elasticidad de 1.0 con respecto al PIB real *per cápita* (Nellthorp *et al.*, 2001: pp. ii, 12). Sin embargo, se ha preferido mantener una elasticidad de valor 0.7 por consistencia metodológica y por ser el proyecto HEATCO una referencia más reciente que ha estudiado esta cuestión con mayor detalle.

En relación con este primer factor de proporcionalidad se han de introducir, como datos de entrada del modelo, los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle VROpbmin, VROpbmax, VROpbmod \rangle$$

donde  $VROpbmin$ ,  $VROpbmax$  y  $VROpbmod$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) efectuados en transporte público y el coste homólogo en viajes (en transporte público) de tipo *commuting*.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el meta-modelo desarrollado dentro del proyecto HEATCO, el valor medio de este factor de proporcionalidad o ratio es de 0.84 (Shires y De Jong, 2006: p. 30). Debido a la especificación del meta-modelo, este resultado se mantiene independiente de la categoría modal (aéreo, autobús, y coche/tren) y de que el viaje sea de corta o de larga distancia. Además, se aplica de manera genérica a todos los países objeto de análisis, como puede comprobarse a partir de los valores glosados tanto en Bickel *et al.* (2006: p. 74, Tabla 4.7) como en Shires y De Jong (2006: pp. 22, 24, Tablas A21 y A23).

### 5.11.1.3. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

Similarmente al caso anterior, y por el mismo tipo de razones, el establecimiento del coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los viajes en tiempo de trabajo remunerado (*work/business*) realizados en transporte público se va a efectuar mediante factores de proporcionalidad con respecto al coste básico de referencia, siendo este el correspondiente a viajes en transporte público de tipo *commuting*.

Por consiguiente, asumiendo para este factor una distribución triangular de probabilidad, se han de indicar como datos de entrada del modelo los parámetros adimensionales siguientes:

$$\langle VRBpbmin, VRBpbmax, VRBpbmod \rangle$$

donde  $VRBpbmin$ ,  $VRBpbmax$  y  $VRBpbmod$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes realizados dentro del tiempo de trabajo remunerado en transporte público y el coste homólogo en viajes (en transporte público) de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado).

Analizando los resultados originales del meta-modelo realizado en el proyecto HEATCO (Shires y De Jong, 2006: pp. 21-22, Tablas A20 y A21) puede observarse que en el caso de España el cociente entre el coste unitario del tiempo en viajes en tiempo de trabajo remunerado (*work/business*) y en viajes de tipo *commuting* de corta distancia (en ambos casos en autobús, como representativo del transporte público urbano y/o metropolitano) es de 2.52. Este valor se halla ligeramente por debajo de la media de la Unión Europea de 25 estados, para la que se obtiene un ratio de 2.60 (resultado en línea con lo indicado por Shires y De Jong, 2006: p. 30<sup>135</sup>). Comparando los resultados segmentados por países (UE-25 y Suiza), se observa que el valor máximo de dicho cociente alcanza la cifra de 3.28 (Bélgica), mientras que el mínimo es de 2.08 (Eslovenia)<sup>136</sup>.

<sup>135</sup> En la referencia citada aparece calculado el ratio inverso (0.38).

<sup>136</sup> Estos factores de proporcionalidad o cocientes se han calculado en base al tipo de cuantificación (precios de mercado o coste de los factores) que en cada caso determina el comportamiento decisional de los viajeros, siendo este el coste de los factores para los viajes en tiempo de trabajo remunerado (*work/business*) y los precios de mercado en el caso de los viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (Bickel *et al.*, 2006: p. 80). Este ha sido también el criterio utilizado por los



#### 5.11.1.4. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes de tipo *commuting*

Para determinar el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) asignable a los viajes realizados en modos de transporte motorizado privado se van a emplear factores de proporcionalidad con respecto al coste del tiempo en los viajes del mismo tipo (*commuting* en este caso), pero realizados en transporte público.

En consecuencia, es preciso incorporar como datos de entrada del modelo los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle VRCprmin, VRCprmax, VRCprmod \rangle$$

donde *VRCprmin*, *VRCprmax* y *VRCprmod* son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en desplazamientos de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) efectuados en modos de transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (de tipo *commuting*) realizados en transporte público.

Conforme a los resultados obtenidos en el meta-modelo del proyecto HEATCO, el valor medio de este ratio o factor de proporcionalidad es de 1.39 en el caso de viajes realizados fuera del tiempo de trabajo remunerado (ya sean de tipo *commuting* o de otros tipos), tanto en corta como en larga distancia (Shires y De Jong, 2006: p. 31, Tabla A31<sup>137</sup>). Nótese además que este ratio es aplicado de forma genérica a todos los países incluidos en el estudio, tal como puede comprobarse a partir de los valores indicados en Bickel *et al.* (2006: p. 74, Tabla 4.7) y en Shires y De Jong (2006: p. 22, Tabla A21).

#### 5.11.1.5. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado

Para el coste unitario del tiempo (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes en transporte motorizado privado efectuados fuera del tiempo de trabajo remunerado y que sean de otros tipos distintos al *commuting* (tales como ocio, compras, etc.) se aplica el mismo procedimiento que en el caso inmediatamente anterior. Por lo tanto, se han de introducir como datos de entrada del modelo los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle VROprmin, VROprmax, VROprmod \rangle$$

donde *VROprmin*, *VROprmax* y *VROprmod* son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) realizados en transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (del mismo tipo) efectuados en transporte público.

El valor medio obtenido a partir del meta-modelo del proyecto HEATCO para este ratio o factor de proporcionalidad es el mismo que en el caso precedente, es decir, 1.39 (Shires y De Jong, 2006: p. 31, Tabla A31), al tratarse de un valor común para los viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado, sean de tipo *commuting* o de otros tipos.

---

autores originales (Shires y De Jong, 2006: p. 30, Tabla A28) al derivar los ratios entre valores del tiempo de viaje para estos dos tipos de desplazamientos.

<sup>137</sup> En la citada referencia se calcula el ratio inverso (0.72).

### 5.11.1.6. Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes en tiempo de trabajo remunerado

Para determinar el coste unitario del tiempo (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes en transporte motorizado privado realizados durante el tiempo de trabajo remunerado se utilizan una vez más factores de proporcionalidad con respecto al coste del tiempo en viajes del mismo tipo (trabajo remunerado, o 'work/business'), pero efectuados en transporte público. De este modo, es necesario incluir, como datos de entrada del modelo, los siguientes parámetros adimensionales:

$$\langle VRBprmin, VRBprmax, VRBprmod \rangle$$

donde  $VRBprmin$ ,  $VRBprmax$  y  $VRBprmod$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en desplazamientos efectuados dentro del tiempo de trabajo remunerado en transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (del mismo tipo, es decir, en tiempo de trabajo remunerado) realizados en transporte público.

De acuerdo a los resultados que se derivan del meta-modelo del proyecto HEATCO, el valor medio obtenido para este factor de proporcionalidad o ratio es de 1.25 en el caso de viajes llevados a cabo durante el tiempo de trabajo remunerado (Shires y De Jong, 2006: p. 31, Tabla A31<sup>138</sup>). Al igual que en varios de los casos anteriores, este ratio es aplicado de forma genérica a todos los países objeto de análisis, según puede comprobarse a partir de los valores especificados en Bickel *et al.* (2006: p. 73, Tabla 4.6) y en Shires y De Jong (2006: p. 21, Tabla A20).

### 5.11.2. Valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público)

Es un hecho ampliamente conocido que los tiempos transcurridos durante las diversas partes o etapas de un viaje en transporte público —tales como acceso y dispersión, espera en parada o transbordo, marcha a bordo del vehículo, etc.— son percibidos y valorados de diferente manera por los viajeros. Así, tanto los tiempos empleados en el acceso/dispersión a pie hasta/desde una parada o estación, como el tiempo de espera en la misma hasta el paso de la correspondiente unidad de transporte público, producen generalmente una mayor pérdida de utilidad —o, en otras palabras, un mayor aumento de desutilidad— en el conjunto del viaje que un tiempo similar que haya transcurrido a bordo del vehículo. Este hecho tiene su correspondiente repercusión en términos de valor de los ahorros unitarios de tiempo o, lo que es equivalente, en el coste unitario de dicho tiempo, que resulta proporcionalmente mayor en las citadas partes del viaje. En los procesos de evaluación socioeconómica y modelización de la demanda, esta diferenciación en el coste unitario del tiempo durante las diversas partes o etapas suele incorporarse mediante la aplicación de multiplicadores o factores de proporcionalidad con respecto al valor o coste unitario del tiempo transcurrido a bordo del vehículo. Desde una perspectiva microeconómica, estos multiplicadores o factores de proporcionalidad pueden interpretarse como el ratio o relación marginal de sustitución del tiempo de espera en parada (o, en su caso, del tiempo de acceso/dispersión a pie) por tiempo a bordo del vehículo de transporte público. Es decir, si el multiplicador o factor de proporcionalidad del tiempo de espera en parada toma un valor, por ejemplo, igual a 2, esto implica que el tiempo de viaje en el vehículo debe reducirse en 2 unidades (minutos) para compensar un aumento del tiempo de espera de 1 unidad (minuto)<sup>139</sup>, de manera que la utilidad o el coste generalizado para el viajero se mantenga constante (curva de indiferencia).

<sup>138</sup> En la referencia citada aparece reflejado el ratio inverso (0.80).

<sup>139</sup> En el sentido contrario, puede interpretarse como que el viajero estaría dispuesto a aceptar un aumento del tiempo en el vehículo de 2 unidades (minutos) si el tiempo de espera en parada se reduce en 1 unidad (minuto), sin que se altere la utilidad o el coste generalizado para el viajero.

En este caso, el análisis se centrará en la valoración relativa del tiempo de espera en parada, ya que las fases de acceso y dispersión no se consideran modificadas entre los distintos escenarios analizados en el modelo (por tanto, su posible contribución al coste generalizado es la misma en cada uno de ellos). Recuérdese que esta simplificación se debe a que la posición de las paradas o estaciones a lo largo de cada línea no es alterada entre escenarios.

En cuanto a los valores por defecto asignados al multiplicador o factor de proporcionalidad del coste unitario del tiempo de espera en parada con respecto al tiempo a bordo del vehículo, la práctica más generalizada consiste en adoptar valores en un rango entre 2 y 2.5.

Así, en el contexto del proyecto HEATCO (Bickel *et al.*, 2006: pp. S5, 61) se recomienda adoptar un factor multiplicador de 2.5 para el valor del tiempo de espera (así como para los tiempos de transbordo). Esta recomendación está basada en la revisión de guías nacionales y otros estudios previos. Por ejemplo, se hace referencia a que las guías nacionales de evaluación de Dinamarca y Suecia proponen un factor multiplicador de valor 2, mientras que en el Reino Unido se utiliza un factor de 2.5. No obstante, la investigación empírica es susceptible de encontrar valores que difieren sensiblemente de estos rangos típicos. Por ejemplo, un meta-análisis llevado a cabo por Wardman (2001) en base a estudios desarrollados en Gran Bretaña entre 1980 y 1996, con modelos de elección estimados mediante preferencias reveladas (RP) o preferencias declaradas (SP), encontró un valor medio para el tiempo de espera igual a 1.47 veces el tiempo en el vehículo, recomendando en consecuencia que el primero fuese valorado tan solo un 60% más alto que el segundo. Sin embargo, este mismo investigador (Wardman, 2004) amplía posteriormente la base de datos inicial y desarrolla un meta-modelo explicativo de las variaciones en el valor monetario del tiempo de viaje. Los resultados obtenidos muestran que el valor relativo del tiempo de espera con respecto al tiempo en el vehículo puede llegar a variar, para los usuarios de modos de transporte público (autobús, tren y metro subterráneo), desde 1.80 hasta 4.20, al no ser el valor unitario independiente de la duración de la espera ni tampoco de la longitud del viaje. Como conclusión, el autor recomienda que, como valor promedio, se tome un factor multiplicador de 2.5. Esta recomendación es recogida en el informe sobre el valor del tiempo de viaje en el Reino Unido realizado por este y otros autores para DfT, el Departamento de Transportes del Reino Unido (Mackie *et al.*, 2003: p. 84).

Actualmente, DfT (*Department for Transport*), en sus guías TAG<sup>140</sup> sobre análisis de transporte (y más específicamente en el grupo de guías sobre evaluación práctica y análisis coste-beneficio) ha reducido la cuantía del factor multiplicador a aplicar para el tiempo de espera en transporte público a un valor de 2, para cualquiera de los propósitos de viaje (DfT, 2017c: p. 9). Esta recomendación está fundamentada en nuevas revisiones y meta-análisis sobre multiplicadores del tiempo de espera en diversos países europeos (Wardman, 2013).

Fuera del ámbito europeo, el *'Economic Evaluation Manual'* de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda también utiliza, en la práctica, un factor multiplicador de 2 sobre el valor del tiempo en el vehículo para evaluar los beneficios derivados de una reducción del tiempo de espera en transporte público (NZTA, 2016: p. 5.462).

Aunque se aprecia —tanto tradicionalmente como actualmente— una clara tendencia a concentrar los valores medios del multiplicador o factor de proporcionalidad del coste unitario del tiempo de espera con respecto al tiempo en el vehículo en torno a 2 (al menos en manuales y guías 'oficiales'), no se debe perder de vista la existencia de una considerable variabilidad de valores, especialmente en lo concerniente a resultados empíricos que tengan en cuenta el tipo de modo, la duración de la espera o la longitud del viaje (tales como los puestos de relieve por Wardman (2004)). Así pues, en relación con la incertidumbre existente sobre los valores reales propios de una determinada aplicación particular, resulta conveniente tratar el valor de este multiplicador o factor de proporcionalidad como una variable aleatoria en el modelo desarrollado. Para ello se asumen nuevamente distribuciones triangulares de probabilidad, de tal modo que se han de introducir, como datos de entrada del modelo, los siguientes grupos de parámetros adimensionales:

<sup>140</sup> *Transport Analysis Guidance*.

$$\langle WRmin^m, WRmax^m, WRmod^m \rangle$$

con:  $m \in \{0, R, B\}$

siendo  $WRmin^m$ ,  $WRmax^m$  y  $WRmod^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de espera en las paradas o estaciones del modo  $m$  de transporte público y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar).

Obsérvese que se ha considerado la opción de incorporar parámetros diferenciados para cada modo de transporte público. Esta diferenciación viene motivada por el hecho de que las condiciones —más confortables o menos confortables— en las que se desarrolla la estancia en la parada o estación pueden afectar sensiblemente a la desutilidad o coste percibido por el viajero durante su tiempo de espera (véase, por ejemplo, Litman (2008)). En este sentido, es esperable que la implantación de los nuevos sistemas de transporte público analizados (BHLS/BRT y metro ligero o tranvía) conlleve una cierta mejora en las condiciones de espera en parada con respecto a la situación del escenario base (autobús convencional). Esta mejora vendría dada por los equipamientos y dotaciones adicionales con los que previsiblemente contarían las nuevas paradas o ‘miniestaciones’, que proporcionarían una mayor protección frente a las inclemencias meteorológicas (mejores marquesinas y más amplias), un mayor confort (mayor número de asientos y más cómodos) y un mayor nivel de información al viajero sobre el servicio de transporte<sup>141</sup> (paneles informativos sobre el tiempo de espera restante, avisos sobre correspondencias entre líneas, sobre imprevistos o problemas en la prestación del servicio, etc.). Así pues se podría recomendar, como criterio general, que los respectivos valores de los parámetros  $WRmin^m$ ,  $WRmax^m$  y  $WRmod^m$  sean ligera o moderadamente mayores para el autobús convencional ( $m=0$ ) que para el sistema BHLS/BRT ( $m=B$ ), y que estos últimos sean a su vez iguales o muy ligeramente mayores a los del metro ligero o tranvía ( $m=R$ ). Lógicamente, la cuantía de la diferencia entre el modo inicial y los nuevos sistemas estará condicionada, en gran parte, por cuál sea el nivel de equipamientos con el que cuenten las paradas de autobús convencional en la red de la ciudad o área metropolitana en estudio. En este sentido, actualmente es bastante frecuente que las paradas de autobús convencional hayan sido mejoradas o modernizadas hasta alcanzar unos niveles de calidad más aceptables para el usuario, reduciendo un poco la brecha con respecto a sistemas más avanzados como BHLS/BRT, tranvía o metro ligero.

### 5.11.3. Valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje

La fiabilidad de los horarios previstos o programados para un servicio de transporte público y la predictibilidad de los tiempos de viaje en el caso de transporte motorizado privado constituyen atributos sensiblemente relevantes para los viajeros, en la medida en que una mejora de dichas características les permite una planificación temporal de sus desplazamientos más ajustada a su hora preferencial de llegada y una disminución del riesgo de llegar con retraso a su destino. Por consiguiente, resulta conveniente que cualquier mejora —o, en su caso, empeoramiento— en la fiabilidad de horarios y en la predictibilidad de los tiempos de viaje sea incluida como un componente más en el coste generalizado de las pertinentes opciones modales, tanto para su posterior incorporación en la evaluación socioeconómica de costes y beneficios (formando parte del excedente de los viajeros), como para la consideración de su influencia en los procesos de determinación de la demanda. Esto exige la definición tanto del tipo de índice o magnitud en que se midan dichos atributos de fiabilidad y predictibilidad como de los correspondientes valores o costes unitarios que se utilicen para su valoración, asegurando que exista una adecuada congruencia entre los primeros y los segundos.

<sup>141</sup> El desarrollo y popularización de aplicaciones móviles sobre redes de transporte público puede aminorar en cierta medida la influencia de la disponibilidad de este tipo de equipamientos informativos en las paradas, al menos para algunos segmentos de usuarios.

Existen varios enfoques diferentes para poder cuantificar la fiabilidad o predictibilidad de los tiempos de viaje como atributo de interés para los viajeros (Li *et al.*, 2010; Carrion y Levinson, 2012), ya sea en transporte público o en transporte motorizado privado. Una visión mucho más detallada de dichos enfoques se ofrece en los epígrafes 8.3.5.4.a y 8.3.7.3. En síntesis, los dos tipos de métodos más comúnmente utilizados en la práctica para la evaluación socioeconómica de costes o beneficios vinculados a la fiabilidad o predictibilidad de los tiempos de viaje están basados en uno de estos enfoques:

- Medidas de dispersión del tiempo de viaje con respecto a un valor central (*centrality-dispersion* o *mean-variance*). Este enfoque se basa fundamentalmente en medir la variabilidad del tiempo de viaje, utilizándose habitualmente la desviación típica o estándar como indicador de dicha dispersión o variabilidad. El concepto de variabilidad, en este contexto, debe entenderse referido a aquellos tipos de variaciones en el tiempo de viaje que los viajeros no podrían predecir con relativa certeza, por lo que se excluyen del mismo las variaciones predecibles relacionadas con los diferentes niveles de demanda según la hora del día, el día de la semana, u otros efectos estacionales de los que se supone que los viajeros son suficientemente conscientes (DfT, 2017c: p. 12). Por tanto, las desviaciones del tiempo de viaje con respecto a un valor medio deben referirse a horas y días comparables.
- Retraso medio (*mean/average lateness*). Este tipo de enfoque está particularmente orientado al transporte público, para el cual existen generalmente unos horarios previstos o programados. En consecuencia, estos enfoques se basan en medir las diferencias entre la hora real de llegada de los viajeros a su parada o estación de destino y el horario programado, anunciado o previsto por el operador para dicha llegada. En la práctica, los posibles adelantos sobre el horario previsto suelen ser considerados como si se tratase de servicios puntuales (DfT, 2017c: pp. 14-15, 29-30).

Mientras que el segundo de los enfoques (retraso medio) es claramente aplicable al transporte público, el primero de ellos (dispersión del tiempo de viaje con respecto a un valor central) podría ser utilizado, en principio, tanto para transporte motorizado privado como para transporte público indistintamente (véase un ejemplo de este caso en Kouwenhoven *et al.* (2014)). No obstante, de cara al desarrollo del modelo se ha optado por utilizar para el transporte público únicamente el enfoque de retrasos medios, restringiendo el uso del enfoque basado en la variabilidad o dispersión de los tiempos de viaje a los desplazamientos efectuados en vehículo privado. Esta selección diferenciada de enfoques para transporte público y privado es la aplicada también por las '*Transport Analysis Guidance*' (TAG) del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017c: pp. 12-15) y por el '*Economic Evaluation Manual*' de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: pp. 5.212, 5.460). Los motivos que subyacen tras esta diferenciación estarían relacionados, entre otros factores, con que en el transporte en vehículo particular el momento elegido para la salida del viaje es una variable continua (cualquier instante a conveniencia del viajero), mientras que en transporte público los momentos disponibles de salida y previsible llegada (horarios) son en cambio de tipo discreto.

En consecuencia, es preciso definir los tipos de costes unitarios que resulten acordes a los enfoques seleccionados para cada caso. En transporte público, dado que el indicador o magnitud de medida de la fiabilidad es el tiempo de retraso medio, es necesario establecer el coste extra percibido por el viajero por cada unidad de tiempo que el vehículo se retrase con respecto a su horario previsto. En el caso del transporte motorizado privado, el indicador de fiabilidad va a venir dado por la desviación típica o estándar del tiempo de viaje, por lo que el coste unitario a definir debe ser aquel asignado a cada unidad (de tiempo) de desviación típica de los tiempos de viaje. En ambos casos estos costes unitarios asociados a la falta de fiabilidad se consideran proporcionales al valor o coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo, de tal forma que se deben establecer los pertinentes factores de proporcionalidad o ratios entre ambos tipos de costes unitarios.

Por tanto, a continuación se aborda la definición de los datos relativos a la valoración de los costes unitarios del tiempo medio de retraso en transporte público y de la variabilidad del tiempo de viaje (a través de su desviación típica) en transporte motorizado privado.

### 5.11.3.1. Valoración del coste unitario del tiempo medio de retraso (transporte público)

Tal como se anticipó en la introducción anterior, el coste unitario asociado al tiempo medio de retraso en transporte público (en unidades monetarias por hora o minuto) se determina por medio de un factor que multiplica al valor o coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo de transporte público en condiciones base o estándar. Por tanto, si dicho factor toma un determinado valor  $LR$ , esto significaría que un minuto de tiempo de retraso es considerado equivalente, en términos de su contribución marginal al coste generalizado o desutilidad del viaje, a  $LR$  minutos de tiempo medio de viaje (esperado) a bordo del vehículo.

Con respecto a los posibles valores habituales de este factor, el Departamento de Transportes del Reino Unido indica en la Unidad A1.3 de sus guías TAG (DfT, 2017c: pp. 14-15) —basándose principalmente en recomendaciones establecidas inicialmente para el transporte por ferrocarril (ATOC, 2005)— valores típicos de 2.4–2.5 en transporte público. Nótese que la guía TAG-A1.3 contempla la posibilidad de añadir también, como fuente de desutilidad o coste adicional, la variabilidad del propio tiempo de retraso, aunque sin embargo reconoce que en muchos casos los datos necesarios para poder calcular la desviación típica de dicho retraso no estarían disponibles. Admite además —de acuerdo a Bates *et al.* (2001)— que el efecto claramente dominante es el del tiempo de retraso, siendo su variabilidad menos importante.

Otra guía nacional de evaluación que incorpora el enfoque de los retrasos medios en transporte público es el '*Economic Evaluation Manual*' de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: p. 5.460). Los factores de equivalencia entre tiempo de retraso y tiempo medio de viaje en el vehículo son, en este caso, notablemente más altos que los indicados en la guía TAG-A1.3 del Departamento de Transportes del Reino Unido. El manual de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda incluye factores segmentados por el tipo de modo (tren o autobús) y por el propósito del viaje (trabajo, educación u otros), distinguiendo incluso si el tiempo de retraso se origina en la salida del servicio de transporte público o si se produce durante el trayecto en el vehículo (NZTA, 2016: p. 5.460, Tabla A18.1). En síntesis, el valor combinado para el conjunto de todas las segmentaciones es de 3.9.

En España, un relevante estudio empírico sobre la valoración de la fiabilidad de los tiempos de viaje fue desarrollado por Asensio y Matas (2008), que se basaron en encuestas en preferencias declaradas (SP) realizadas en el área metropolitana de Barcelona a viajeros de tipo *commuter* usuarios de automóvil particular. El estudio incluye modelos específicos para los dos tipos de enfoques de medición de la fiabilidad de tiempos de viaje (dispersión respecto a un valor medio y tiempo de retraso en la llegada a destino). El segundo de los enfoques metodológicos (modelo 3 en el estudio citado), aunque está desarrollado inicialmente sobre una muestra de usuarios de vehículo motorizado particular, permite por sus características una cierta extrapolación al caso de los retrasos en transporte público. Se obtiene un factor medio de 2.3 para el tiempo de retraso con respecto al tiempo normal de viaje. Los resultados permiten diferenciar entre aquellos viajeros que están sometidos a limitaciones bastante restrictivas en cuanto al horario de comienzo de sus actividades (como por ejemplo la entrada al trabajo) y aquellos otros que tienen restricciones más flexibles o que no están afectados por este tipo de condicionantes. Lógicamente, este es un aspecto que introduce notables diferencias en la valoración del tiempo de retraso: el factor multiplicador es de 3.6 para los primeros y de 1.5 para los segundos. En cualquier caso, el factor medio de 2.3 se encuentra más cercano a los valores indicados por el Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017c: pp. 14-15) que a los aplicados por la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: p. 5.460). Además, este resultado de Asensio y Matas (2008) está en línea con los obtenidos en estudios anteriores de otros autores como Small (1982), con un ratio de proporcionalidad de 2.41, y Noland *et al.* (1998), con un ratio de 2.18.

A la vista de la variabilidad de resultados, e incluso de la disparidad de valores típicos recomendados, resulta evidente que el valor de este factor de proporcionalidad es un claro candidato a ser modelizado como una variable aleatoria. Para ello se recurre, en sintonía con el resto del modelo desarrollado, a distribuciones triangulares de probabilidad. Además, en este caso también parece conveniente introducir en el modelo la posibilidad de adoptar distribuciones con diferentes parámetros para cada

línea, período horario y sentido de viaje. Este tipo de distinciones responden a las notables diferencias que se han observado en la valoración relativa del tiempo de retraso entre aquellos usuarios que están sujetos a restricciones horarias más rígidas y aquellos otros que, o bien no están afectados por este tipo de condicionantes, o bien cuentan con una mayor flexibilidad en los horarios de sus actividades. Así pues, los parámetros de las distribuciones se podrían ajustar según el reparto entre usuarios de uno u otro tipo que se estime representativo de cada línea, durante cada período horario y en cada sentido de viaje. Una indicación cualitativa sobre esta cuestión apuntaría a que la fracción de viajeros sometidos a restricciones horarias menos flexibles tiende a ser mayor en las horas punta de días laborables (especialmente en la de la mañana) en el sentido de viaje predominante, aunque, dependiendo del tipo de centros de atracción de viajes servidos por la línea, puede haber algunas variaciones con respecto a estas indicaciones genéricas.

En resumen, se habrán de introducir los siguientes grupos de parámetros adimensionales como datos de entrada del modelo:

$$\langle LRmin_{ijk}, LRmax_{ijk}, LRmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i=1, 2, \dots, NL ; j=1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} =1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ =1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $LRmin_{ijk}$ ,  $LRmax_{ijk}$  y  $LRmod_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de retraso en transporte público sobre el horario programado o previsto y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar), consideradas las previsibles características —en cuanto a la rigidez o flexibilidad de sus restricciones horarias— de los usuarios de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ .

### 5.11.3.2. Valoración del coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje (transporte motorizado privado)

En el caso del transporte motorizado privado, la medida cuantitativa de la irregularidad o incertidumbre (falta de fiabilidad) de los tiempos de viaje suele estar asociada a la dispersión o variabilidad de los mismos, tomándose generalmente la desviación típica como indicador más común. Por consiguiente, para evaluar la influencia de cualquier mejora —o, si es el caso, empeoramiento— en la fiabilidad o predictibilidad de los tiempos de viaje en el coste generalizado, es necesario establecer un factor de proporcionalidad entre el coste percibido por el viajero por cada unidad de variabilidad del tiempo de viaje (es decir, unidad de desviación típica, como por ejemplo un minuto) y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo medio de viaje. A la razón o cociente entre estos dos valores se le denomina generalmente ratio de valor de la fiabilidad (*reliability ratio*).

En cuanto a posibles valores recomendados para el ratio de valor de la fiabilidad, la versión de marzo de 2017 de la Unidad A1.3 de las guías TAG del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017c: p. 14) indica un ratio de 0.4 para usuarios de automóvil en vías urbanas, para todos los propósitos o motivos de viaje. Nótese que, anteriormente a la versión de marzo de 2017, el valor recomendado para el ratio de fiabilidad era sensiblemente mayor, con una cuantía de 0.8 (DfT, 2014: p. 12). El cambio introducido se deriva de un conjunto de estudios desarrollados para DfT al objeto de obtener valores actualizados del tiempo de viaje en Reino Unido, basándose concretamente en los resultados obtenidos por ARUP *et al.* (2015). Por su parte, las recomendaciones anteriores (ratio de 0.8) se fundamentaban en las conclusiones de un ‘workshop’ de expertos promovido en 2004 por el Centro de Investigación del Ministerio de Transportes de Países Bajos (Hamer *et al.*, 2005). Esta es también la referencia en la que se basaban las recomendaciones del proyecto HEATCO con respecto a la valoración de la fiabilidad de los tiempos de viaje (Bickel *et al.*, 2006: pp. 66-68), por lo que se proponían, para el transporte de viajeros en automóvil particular, ratios de valor de la fiabilidad (a utilizar por defecto en ausencia de datos locales o nacionales más específicos) de 0.8.

Por otra parte, los valores señalados por el '*Economic Evaluation Manual*' de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: p. 5.212) están más en la línea de los antiguamente recomendados por las guías TAG de DfT (DfT, 2014: p. 12) y por el proyecto HEATCO (Bickel *et al.*, 2006: pp. 66-68), siendo incluso algo superiores a aquellos. Así, la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA) propone el uso de un factor de 0.9 con respecto al valor del tiempo de viaje, para lo que considera una composición típica del tráfico urbano. Más específicamente, recomienda valores de 0.8 para automóviles particulares (turismos) y de 1.2 para vehículos comerciales.

Un estudio de base empírica llevado a cabo en los Países Bajos a partir de encuestas en preferencias declaradas (Kouwenhoven *et al.*, 2014) encontró, para el ratio de fiabilidad, valores de 0.4 para viajes de tipo *commuting*, 0.6 para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado, y 1.1 para viajes en tiempo de trabajo remunerado (*business*)<sup>142</sup>. El análisis realizado incluye una comparación de valores con otros estudios anteriores sobre la valoración del ratio de fiabilidad en automóvil. Así, se citan rangos entre 0.30 y 0.95 para estudios llevados a cabo en Suecia (Eliasson, 2004), entre 0.3 y 0.4 en Australia (Hensher, 2011), y entre 0.36 y 0.78 en el Reino Unido (MVA Consultancy, 1996), aunque para este último país también se hace referencia a una encuesta piloto en Manchester que conduce a un ratio de 1.3 (Copley *et al.*, 2002). En Estados Unidos, de acuerdo a Mahmassani (2011), el rango de valores reportados en varios informes se extendería entre 0.40 y 1.10.

En el estudio llevado a cabo por Asensio y Matas (2008) en el área metropolitana de Barcelona, con viajeros de tipo *commuter* en automóvil particular, se obtiene un ratio de valor de la fiabilidad de 0.98 (resultados del modelo 2 en la citada referencia). Los autores sitúan este resultado en un rango intermedio en relación con otros valores encontrados en la literatura técnica precedente: como valores superiores se indican 1.27 para viajes de tipo *commuting* en Los Ángeles (Noland *et al.*, 1998), 1.3 para datos de Manchester según el ya citado Copley *et al.* (2002), o 1.1 como valor típico sugerido por Bates (2001); como valores inferiores se hace referencia a Black y Towriss (1993), que indican ratios de 0.55 para viajes en coche a/desde el trabajo y de 0.70 para el conjunto de tipos de viajes presentes en su muestra.

Teniendo en cuenta la notable diversidad de resultados encontrados y cierta disimilitud de los valores típicos recomendados por defecto, queda patente que el ratio de valor de la fiabilidad debe ser tratado en el desarrollo del modelo como una variable aleatoria. En este sentido, se adoptan distribuciones triangulares de probabilidad en consonancia con la tónica general del modelo. Además, al igual que en la valoración del tiempo medio de retraso en transporte público, se incorpora la posibilidad de definir distribuciones con valores diferenciados de los parámetros para los viajes efectuados sobre el corredor o itinerario servido por cada una de las líneas analizadas, para cada período horario y para cada sentido. De la misma manera que en el caso del transporte público, es razonable suponer que la variabilidad del tiempo de viaje es percibida de una forma más negativa por aquellos viajeros en transporte motorizado privado que estén sometidos a restricciones horarias más rígidas que por aquellos otros que disponen de una mayor flexibilidad en los horarios de sus actividades. De este modo, con la incorporación de valores diferenciados para los parámetros de las distribuciones específicas, es posible reflejar las diferentes composiciones del conjunto de usuarios de transporte motorizado privado según el reparto entre viajeros de uno y otro tipo que se estime característico de cada corredor o itinerario, período horario y sentido de viaje.

En conclusión, deberán introducirse, como datos de entrada del modelo, los siguientes grupos de parámetros adimensionales:

$$\langle RRprmin_{ijk}, RRprmax_{ijk}, RRprmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

<sup>142</sup> En el estudio citado, estos valores del ratio de fiabilidad son compartidos tanto para transporte motorizado privado (automóvil) como para transporte público (tren y autobús/tranvía/metro).



siendo  $RRprmin_{ijk}$ ,  $RRprmax_{ijk}$  y  $RRprmod_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del ratio de valor de la fiabilidad (*reliability ratio*) en transporte motorizado privado, es decir, del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste percibido por el viajero por cada unidad de desviación típica del tiempo de viaje y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo medio de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar), dadas las previsibles características —en cuanto a la rigidez o flexibilidad de sus restricciones horarias— de los viajeros en transporte motorizado privado que efectúan sus desplazamientos en torno al corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Nótese que normalmente debería existir cierta coherencia entre los valores asignados a los parámetros  $RRprmin_{ijk}$ ,  $RRprmax_{ijk}$  y  $RRprmod_{ijk}$  para cada posible combinación de índices  $i,j,k$  y los valores de  $LRmin_{ijk}$ ,  $LRmax_{ijk}$  y  $LRmod_{ijk}$  para esa misma combinación de índices, en relación comparativa con cualquier otra combinación. Es decir, si los valores de  $LRmin_{ijk}$ ,  $LRmax_{ijk}$  y  $LRmod_{ijk}$  para una determinada combinación  $X$  de índices ( $i_X j_X k_X$ ) son notablemente mayores que para otra combinación  $Y$  ( $i_Y j_Y k_Y$ ), lo más usual sería que los valores de  $RRprmin_{ijk}$ ,  $RRprmax_{ijk}$  y  $RRprmod_{ijk}$  también fuesen mayores para  $i_X j_X k_X$  que para  $i_Y j_Y k_Y$ .

#### 5.11.4. Evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje (en unidades monetarias constantes)

El valor real (medido en unidades monetarias constantes) atribuido a un recurso —como es en este caso el tiempo— puede variar a lo largo de los años, con una evolución que generalmente se vincula, en mayor o menor grado, a la variación de la renta o PIB real *per cápita* (si bien es cierto que pueden existir otros factores, como cambios en las preferencias relativas de los individuos, que también afecten a esta evolución).

En el contexto de la formulación desarrollada, la evolución futura del coste real asociado a cada unidad de tiempo de viaje se va a modelizar por medio de una tendencia de tipo exponencial (con una base o razón genérica cuyo valor depende directamente de los datos a introducir). La forma funcional utilizada genéricamente para este tipo de evolución fue anteriormente especificada en la ecuación 5.7 (véase en el epígrafe 5.8.7), con la variable  $\varphi$  como tasa porcentual de variación anual de la variable dependiente ( $1+\varphi/100$  constituye la base de la función o la razón de la progresión geométrica equivalente). Los posibles valores de dicha tasa  $\varphi$  van a ser por tanto el tipo de dato que ha de ser aportado al modelo.

Por otra parte, la práctica más extendida es relacionar las variaciones futuras del valor o coste unitario del tiempo de viaje con la evolución de la renta real o PIB real *per cápita* (Nellthorp *et al.*, 2001: pp. ii, 12; Bickel *et al.*, 2006: pp. 63-64; de Rus *et al.*, 2006: p. 114; Betancor *et al.*, 2009: p. 54; de Rus *et al.*, 2010: pp. 72-73). Las posibles diferencias surgen en relación con la elasticidad (inter-temporal) del valor del tiempo de viaje con respecto al PIB real *per cápita*. Así, en el proyecto UNITE (Nellthorp *et al.*, 2001: pp. ii, 12) se proponía por defecto (para cualquier valor o coste) una elasticidad de 1.0 con respecto al PIB real *per cápita*. Mackie *et al.* (2003: pp. 52-55), como parte de los estudios sobre el valor del tiempo de viaje en el Reino Unido desarrollados para DfT (*Department for Transport*), determinaron, a través de técnicas de meta-análisis, elasticidades inter-temporales en el rango entre 0.72 y 0.82. Por su parte, en el ámbito del proyecto HEATCO, tras analizar los resultados del meta-modelo y contrastarlos con el conjunto de conocimientos teóricos y empíricos disponibles, se estableció la recomendación de emplear una elasticidad inter-temporal por defecto de 0.7 para cualquiera de los tipos o propósitos de viaje (Bickel *et al.*, 2006: pp. S5, 63-64; Shires y De Jong, 2006: p. 17), admitiendo la conveniencia de desarrollar un análisis de sensibilidad con un valor de elasticidad de 1.0.

La tendencia a que el valor del tiempo de viaje crezca por debajo del aumento en el tiempo de la renta o PIB real *per cápita* ha recibido, como una de sus posibles explicaciones, que el tiempo transcurrido durante el viaje sea cada vez menos molesto y más aprovechable como consecuencia de los progresivos incrementos en la calidad y confort de los modos de transporte y de la posibilidad de utilizar dispositi-

vos móviles durante el viaje en transporte público o en automóvil como acompañante (Mackie *et al.*, 2003: p. 50).

En cualquier caso, además de la incerteza sobre la elasticidad inter-temporal del valor del tiempo de viaje con respecto al PIB real *per cápita*, la posible variación del coste unitario del tiempo de viaje a lo largo del horizonte o período de evaluación estará afectada por la incertidumbre sobre la evolución del propio PIB real *per cápita*. Por todo ello, la evolución futura del coste del tiempo de viaje debe ser preferentemente tratada como una variable aleatoria en el modelo desarrollado. Al respecto se propone que para la tasa media de variación anual ( $\varphi$  en el contexto de la ecuación 5.7) del coste real de una unidad de tiempo de viaje, en consonancia con la tónica general del modelo, se asuma una distribución triangular de probabilidad, de tal modo que se deben incorporar, como datos de entrada del modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle IVTTmin, IVTTmax, IVTTmod \rangle$$

donde *IVTTmin*, *IVTTmax* e *IVTTmod* son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la tasa media de variación anual del coste unitario del tiempo de viaje (en términos reales, es decir, expresado en unidades monetarias constantes). Estas tasas de variación se introducen en el modelo en forma de porcentaje (%).

Obsérvese que el valor de la tasa de variación que se extraiga en cada simulación aleatoria del modelo será aplicado por igual a todos y cada uno de los años del horizonte temporal de evaluación, dando lugar a una evolución con respecto al tiempo de tipo exponencial. Por consiguiente, los parámetros de esta distribución de probabilidad deben ser ajustados en base a la tasa de variación anual media que, aplicada de forma recurrente, resultaría equivalente a la variación acumulada prevista al final de todo el horizonte o período de evaluación (no en base a las variaciones puntuales que podrían producirse en cada año individual, cuyo rango de variabilidad sería en general bastante más amplio).

## 5.12. DATOS SOBRE COSTES UNITARIOS RELATIVOS AL CONSUMO DE ENERGÍA

### 5.12.1. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de automóviles particulares

En relación con los costes de operación de los automóviles particulares, un primer aspecto fundamental a tener en cuenta es la composición del parque automovilístico en cuanto al tipo de portador o vector energético (fuente secundaria de energía) que es consumido por el motor para la propulsión del vehículo. Más en concreto, las variables de interés como datos de entrada del modelo harán referencia a la fracción o proporción del total de vehículos-kilómetro (veh-km) que son recorridos mediante la utilización de cada uno de los tipos básicos de fuentes externas de energía que se consideran en la modelización desarrollada, así como a la posible evolución futura prevista para dichas fracciones. En relación con este tema, se van a realizar secuencialmente —con un enfoque pragmático bastante simplificado— dos segmentaciones básicas en cuanto al tipo de portador energético utilizado y su correspondiente clase de motor:

- Automóviles con motor de combustión interna frente a alimentación eléctrica.
- Dentro de los motores de combustión interna, distinción entre motores de gasolina y motores diésel.

Esta segmentación básica en tres categorías fundamentales (gasolina, diésel y eléctricos) coincide con la planteada por el Departamento de Transportes del Reino Unido en la Unidad A1.3 de sus guías TAG (DfT, 2017c: pp. 11) y en la recopilación de datos y previsiones denominada '*TAG data book*' (DfT, 2017a: Sección A1.3.9), al objeto de valorar los costes de operación de vehículos, tanto actuales como futuros.

En la gran mayoría de casos actuales, la correspondencia entre la clase de vehículo y el tipo de fuente secundaria de energía que es consumida para la realización del total de kilómetros recorridos en sus diversos viajes es directa e inequívoca. Tal es el caso de los hoy en día mayoritarios automóviles convencionales con motores de combustión interna (o bien de gasolina o bien diésel), pero también de los vehículos eléctricos puros (designados abreviadamente como BEVs, BOEVs o FEVs<sup>143</sup>), que poseen solamente motores eléctricos y por tanto utilizan únicamente la energía eléctrica recargada de la red para su propulsión. Más compleja es la segmentación entre fuentes de alimentación energética cuando se trata de automóviles híbridos. En primer lugar debe distinguirse entre híbridos enchufables (PHEVs, *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) e híbridos convencionales o no enchufables (HEVs, *Hybrid Electric Vehicles*). Ambos tipos cuentan con un motor eléctrico (con sus correspondientes baterías) y un motor de gasolina, pero hay algunas diferencias importantes en cómo las baterías pueden ser recargadas.

En el caso de los PHEVs, el motor eléctrico puede recibir directamente la electricidad de un generador movido por el motor de combustión interna, o puede alimentarse de la energía almacenada en las baterías del vehículo, que a su vez pueden ser recargadas por medio de sistemas regenerativos de recuperación de la energía cinética (por ejemplo en el frenado), por el exceso de energía producido por el motor de combustión interna, o —aquí radica la principal diferencia— también pueden ser cargadas directamente desde la red eléctrica. Es decir, existe en último término un consumo mixto para el usuario, tanto de gasolina como de energía eléctrica tomada de la red. Por tanto, para ajustarse a la estructura de segmentación utilizada en el modelo, parte de los kilómetros recorridos por vehículos de tipo PHEV deberían ser proporcionalmente asignados a alimentación eléctrica y parte a consumo de gasolina. Evidentemente, la forma en que se realizase este reparto dependería no solamente de las características del vehículo, sino también de factores propios del usuario, como la longitud de los viajes realizados en comparación a la autonomía del modo eléctrico o la frecuencia de recarga de las baterías desde la red.

Por su parte, los HEVs no enchufables funcionan primariamente a partir de un motor de combustión interna, pero son capaces de transformar y recuperar la energía cinética desaprovechada durante la rodadura por inercia (*coasting*) y el frenado para almacenarla en forma de energía eléctrica en las baterías del vehículo, que no pueden ser recargadas desde la red. Dichas baterías alimentan a su vez el motor eléctrico con el que también cuenta el vehículo, que puede funcionar como única fuente de propulsión en aquellas condiciones en que su uso es mucho más eficiente que el del motor de combustión interna (generalmente a bajas velocidades y en tráfico urbano con frecuentes detenciones y arrancadas) o como motor auxiliar del de gasolina cuando sea requerido (reduciendo así su consumo de combustible). En síntesis, aunque esta clase de automóviles híbridos pueda circular temporalmente utilizando tan solo el motor eléctrico, la única fuente externa de alimentación energética consumida por el vehículo es la gasolina almacenada en el depósito, por lo que desde el punto de vista de los costes de operación incurridos por el usuario, todos los kilómetros recorridos por vehículos de tipo HEV no enchufables deberían ser asignados al uso de gasolina. La diferencia con los automóviles convencionales de gasolina vendrá dada por un uso más eficiente de la energía empleada, con lo que un mayor nivel de expansión de este tipo de vehículos híbridos en el mercado contribuiría a reducir el consumo medio del conjunto de automóviles que utilizan solo gasolina como fuente externa de energía.

A continuación se especifican los datos de entrada del modelo relativos a estas segmentaciones y a su previsible evolución futura<sup>144</sup>.

<sup>143</sup> BEVs (*Battery Electric Vehicles*), BOEVs (*Battery-Only Electric Vehicles*), FEVs (*Full Electric Vehicles*). En ocasiones también se puede encontrar (DOE/EERE y EPA, 2017: pp. 35-36) el uso de las siglas genéricas EV (*Electric Vehicles*) para referirse específicamente a los vehículos eléctricos puros (*all-electric vehicles*).

<sup>144</sup> Por razones prácticas, se excluyen del análisis de costes de operación para el usuario automóviles particulares con otras tecnologías de implantación muy minoritaria, tales como Gas Natural Vehicular (GNV/NGV) o vehículos de pila o celda de combustible (FCVs, *Fuel Cell Vehicles*). No obstante, se reconoce que en el eventual desarrollo de una posterior evaluación coste-beneficio podrían resultar convenientes segmentaciones adicionales que tuviesen en cuenta estos u otros tipos de vehículos, particularmente en relación con el cálculo de futuros costes externos de carácter medioambiental.

### 5.12.1.1. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa

La fracción o proporción, sobre el total de vehículos-km recorridos por automóviles particulares, que son efectuados mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía debe ser preferentemente tratada en el modelo como una variable aleatoria sometida a cierta incertidumbre, tal como se observará posteriormente. Para su modelización en forma de variable aleatoria, se va a asumir —siguiendo las líneas generales del modelo desarrollado— una distribución triangular de probabilidad, la cual debe ser definida mediante su mínimo, máximo y moda. Por consiguiente, es necesario introducir, como datos de entrada del modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle P_{cemin}, P_{cemax}, P_{cemod} \rangle$$

donde  $P_{cemin}$ ,  $P_{cemax}$  y  $P_{cemod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares— que son efectuados mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, según los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Esta variable es, por tanto, de tipo adimensional, debiendo ser expresados sus valores de entrada en el modelo en forma de proporción decimal.

A día de hoy, esta fracción sigue siendo casi inapreciable. En el ámbito de España, un primer dato estimativo puede obtenerse a partir de las estadísticas sobre la composición del parque de vehículos de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2017). En dicha base de datos, el parque de turismos registrados en España en 2016 aparece segmentado por tipo de carburante en tres categorías: turismos de gasolina, turismos de gas-oil y un apartado genéricos de “otros”. En el conjunto de España, la categoría de “otros” (en la que cabe suponer que se incluirían, como mínimo, los vehículos eléctricos) supone solamente el 0.077% del total de turismos<sup>145</sup>. Nótese, por otra parte, que estos datos hacen referencia únicamente a la composición del parque automovilístico, no a las distancias totales recorridas por los vehículos de cada una de estas categorías.

Otro dato de interés en este sentido —aunque tampoco responda exactamente a las variables de entrada del modelo— pueden ser las cuotas de ventas de vehículos eléctricos puros (EVs/BEVs) e híbridos enchufables (PHEVs) con respecto al mercado general de turismos y todoterrenos. Dicha cuota de mercado era entre enero y junio de 2017 del 0.376%<sup>146</sup>.

En el caso del Reino Unido, existen previsiones oficiales realizadas por el Departamento de Transportes (DfT, 2017a: Sección A1.3.9) sobre las proporciones del total de vehículos-km que serían recorridos haciendo uso de cada una de las tres fuentes externas de energía consideradas: gasolina, combustible diésel y energía eléctrica. Para el año 2017 y en el caso de automóviles de tipo turismo, dichas previsiones apuntan a un 0.44% de veh-km realizados mediante alimentación eléctrica.

En resumen, puede observarse que las proporciones de vehículos-km que son recorridos mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía no son conocidas con exactitud, pero, en general, son en la actualidad prácticamente irrelevantes.

### 5.12.1.2. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina)

La segunda etapa de segmentación se centra únicamente en aquellos automóviles que utilizan —ya sea exclusiva o parcialmente— motores de combustión interna alimentados mediante combustibles convencionales, es decir, gasolina y diésel. Por tanto, sobre el total de vehículos-km recorridos gracias al

<sup>145</sup> En Galicia este porcentaje resulta todavía inferior, siendo del 0.034%.

<sup>146</sup> Dato extraído de: <http://movilidadelectrica.com/ventas-vehiculos-electricos-junio-2017/> [Acceso: julio 2017]

empleo de este tipo de carburantes, se deben establecer las fracciones o proporciones que corresponden a cada uno de ellos.

Para ello, se toma arbitrariamente como referencia la proporción o fracción de vehículos-km que son recorridos mediante la utilización de gasolina. Con los datos habitualmente disponibles, las estimaciones sobre la cuantía de esta fracción estarán generalmente sujetas a un cierto grado de incerteza, por lo que el enfoque de modelización más apropiado consiste en tratar los valores de dicha proporción como una variable aleatoria más del modelo. Al respecto, se adopta de nuevo una distribución triangular de probabilidad, a definir mediante su mínimo, máximo y moda. Así pues, se deberán indicar, como datos aportados al modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle Pcgmin, Pcgmax, Pcgmod \rangle$$

donde *Pcgmin*, *Pcgmax* y *Pcgmod* son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total realizado por automóviles particulares utilizando combustibles convencionales (gasolina o diésel)— que son efectuados mediante el consumo de gasolina, según los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Se trata de una variable adimensional, cuyos valores de entrada en el modelo se expresarán en forma de proporción decimal.

Para obtener un valor aproximado de la proporción o fracción de vehículos-km que son recorridos mediante la utilización de gasolina (sobre el total de gasolina y diésel en automóviles particulares), el enfoque más apropiado consiste, en el caso de España, en basarse en las estadísticas de composición del parque de vehículos de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2017). A partir de los valores contenidos en dicha base de datos, puede deducirse que, en el caso de los vehículos turismos, el reparto entre automóviles de gasolina y diésel en toda España en 2016 era de 42.96% para gasolina y 57.04% para diésel. También es posible calcular este mismo tipo de dato desagregado por comunidades autónomas y por provincias<sup>147</sup>. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que estas cifras solo serían directamente extrapolables a fracciones o proporciones de vehículos-km si se cumpliera la hipótesis de que los automóviles diésel y los de gasolina recorren, de media por vehículo, el mismo número anual de kilómetros. Sin embargo, previsiblemente esto no es así, sino que el kilometraje anual de los automóviles diésel suele ser mayor que el de los de gasolina, por lo que la cifra de 42.96% podría tomarse (a nivel general de España) como una cota superior o máximo de la fracción de vehículos-km recorridos mediante el uso de gasolina. Si se plantea una hipótesis intermedia en la que los automóviles diésel recorren de media un 20% más de kilómetros por vehículo que los de gasolina, la fracción de vehículos-km correspondiente a estos últimos pasaría a ser del 38.56%, valor que —a falta de informaciones más precisas— podría asimilarse a la moda de la distribución triangular. Por último, si se plantea la hipótesis de que los automóviles diésel recorran como máximo un 40% más de kilómetros por vehículo que los de gasolina, la proporción de vehículos-km asignada a la utilización de gasolina quedaría reducida al 34.98%, cifra que, bajo esta hipótesis, podría considerarse como el mínimo de la distribución<sup>148</sup>.

Otra posible vía de enfoque podría consistir en utilizar cifras de consumo total de combustibles de automoción en España. Según datos publicados por CORES (2017: p. 35), el consumo total de gasolinas de automoción fue en España en 2016 de 4,755,000 toneladas, frente a 22,517,000 toneladas de gasóleos de automoción (bastante más del cuádruple). Teóricamente, en base a la densidad media de cada uno de estos tipos de combustible (para convertir las unidades de masa en volúmenes) y de un valor de consumo medio (en litros por kilómetro) de uno y otro tipo de vehículos, sería posible calcular una estimación de las cantidades totales de kilómetros recorridos mediante la utilización de gasolina y de diésel. Sin embargo, el problema de utilizar estos datos radica en que las cifras de consumo de

<sup>147</sup> La proporción de turismos de gasolina sobre el conjunto de gasolina y diésel es del 33.46% en Galicia y del 33.79% en la provincia de A Coruña (datos de 2016).

<sup>148</sup> Si se aplican los datos de Galicia, la cota máxima resultaría ser del 33.46%, la cota mínima del 26.42%, y el valor intermedio del 29.53%. Con los datos particularizados para la provincia de A Coruña, la cota máxima se situaría en el 33.79%, la mínima en el 26.72%, y el valor intermedio en el 29.84%.

gasóleos de automoción están incluyendo también el elevado volumen de consumo realizado por camiones de transporte de mercancías por carretera, autocares y autobuses, furgones de reparto, etc. Por el contrario, en el modelo desarrollado interesa circunscribir el análisis únicamente a automóviles particulares de viajeros, por lo que los datos anteriormente citados no son transferibles a este caso.

### 5.12.1.3. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa

Es esperable que durante el horizonte temporal de evaluación (generalmente varias décadas) se produzcan cambios bastante significativos en el reparto del volumen de kilómetros recorridos en automóviles particulares según el tipo de fuente externa de energía (secundaria) que es consumida para la propulsión del vehículo, especialmente en cuanto a la previsible expansión de la movilidad eléctrica. Así pues, estas posibles evoluciones deben ser incorporadas al modelo.

Al respecto, no se va a considerar en este caso ningún patrón predefinido de evolución (por ejemplo, lineal, exponencial, etc.), sino que para cada año del horizonte o período de evaluación va a ser posible definir específicamente una determinada variación (incremento o disminución de la fracción de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica externa) con respecto al año precedente. Esto conduce a una formulación del siguiente tipo:

$$Z_Y = Z_{Y-1} + \frac{\mu_Y(\text{p.p.})}{100} = Z_0 + \sum_{n=Y_0+1}^Y \frac{\mu_n(\text{p.p.})}{100} = Z_0 + \frac{1}{100} \cdot \sum_{n=Y_0+1}^Y \mu_n(\text{p.p.}) \quad (5.12)$$

donde  $Z_Y$  constituye el valor de la variable dependiente analizada (en este caso, la fracción de vehículos-km) en el año  $Y$ ,  $Z_0$  es el valor inicial de esta variable dependiente (en el año base  $Y_0$ ) y  $\mu_Y$  representa la variación (en puntos porcentuales) de dicha variable dependiente prevista para el año  $Y$  (con respecto al valor de la variable en el año inmediatamente anterior,  $Y-1$ ).

Por otra parte, es evidente que los ritmos de evolución temporal, a lo largo del horizonte de evaluación, de la fracción o proporción que los vehículos-km realizados mediante alimentación eléctrica externa representan con respecto al total de vehículos-km recorridos por automóviles particulares están sujetos a un nivel de incertidumbre significativamente elevado. Por consiguiente, es necesario tratar la variación anual de dicha fracción o proporción (equivalente a  $\mu_Y$  en el contexto de la ecuación 5.12) como una variable aleatoria, para lo cual se asume una distribución triangular de probabilidad con parámetros específicos para cada año del horizonte o período de evaluación. Dado que cada una de estas distribuciones triangulares de probabilidad se define mediante su mínimo, moda y máximo, es preciso introducir, como datos de entrada a indicar por el analista, los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle iPcemin_y, iPcemax_y, iPcmod_y \rangle ; \quad y=1, 2, \dots, Y_{ap}$$

donde  $iPcemin_y$ ,  $iPcemax_y$  e  $iPcmod_y$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total llevado a cabo por automóviles particulares— que son recorridos mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía<sup>149</sup>, según las previsiones para el área de estudio.

Nótese que en el caso de esta variable, ante la expectativa de que sus patrones de evolución puedan experimentar, a lo largo del dilatado horizonte de evaluación, fases o etapas con velocidades de variación muy distintas entre sí, se ha optado por incorporar la posibilidad de definir, a criterio del analista, distribuciones de probabilidad con diferentes valores de los parámetros para cada uno de los años de dicho período, tal como se indicaba previamente en la ecuación 5.12.

<sup>149</sup> Esta variación correspondería a la diferencia de la citada fracción o proporción entre los años  $y$  e  $y-1$  (o, en su caso,  $y=1$  y el año base), cuando aquella es expresada en formato porcentual.

Para tratar de establecer unos valores orientativos de estas variaciones anuales, la referencia más específica procedente de un organismo de carácter gubernamental puede que sean las previsiones al respecto contenidas en el ‘TAG data book’ del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.9). En el apartado relativo a automóviles de viajeros, se indican las proporciones previstas de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica externa para cada año hasta un horizonte máximo de 2035 (para este último año se señala una fracción del 13.11 %). A partir de dichos datos es posible calcular los incrementos en puntos porcentuales previstos para cada año individual. De forma resumida, el incremento anual medio resulta ser de 0.17 puntos porcentuales entre 2018 y 2020, de 0.51 puntos porcentuales por año entre 2021 y 2025, de 0.93 puntos porcentuales por año entre 2026 y 2030, y de 0.99 puntos porcentuales por año entre 2031 y 2035.

Este ritmo de crecimiento puede parecer en principio bastante modesto o conservador. En este sentido, conviene contrastar esta evolución con alguna otra fuente —aunque no provenga de organismos oficiales— tal como las previsiones a largo plazo sobre el mercado global del vehículo eléctrico realizadas anualmente por la compañía Bloomberg (Bloomberg New Energy Finance, 2017). En estas previsiones se apunta que en el año 2040 el vehículo eléctrico constituiría el 33–34% de la flota global de automóviles<sup>150</sup>, representando en dicho año el 54% de las ventas mundiales de coches nuevos (algo más del 65% de las ventas en el caso de Europa). Se estima que la expansión del vehículo eléctrico alcance un rápido crecimiento a partir del período entre 2025 y 2030, cuando este tipo de automóviles llegarían a resultar competitivos en precios con los convencionales de combustión interna sin necesidad de subvenciones. Las cuotas de presencia del vehículo eléctrico en la flota global de automóviles serían, según estas previsiones, del 1% en 2020, del 2% en 2025, del 7% en 2030, del 19% en 2035 y del 33% en el año 2040. Esto equivale a unos incrementos medios de 0.2 puntos porcentuales al año entre 2021 y 2025, de 1.0 puntos porcentuales por año entre 2026 y 2030, de 2.4 puntos porcentuales al año entre 2031 y 2035, y de 2.8 puntos porcentuales por año entre 2036 y 2040. El ritmo de crecimiento de la cuota de ventas en Europa con respecto a otros grandes mercados como EE.UU. y China será ligeramente superior a corto plazo (antes del 2021), muy similar a medio plazo, y de nuevo un poco superior a largo plazo (entre 2035 y 2040). También se apunta que hasta aproximadamente el 2025 la expansión del vehículo eléctrico estará comandada por los automóviles híbridos enchufables (PHEVs), pero a partir de entonces serán mayoritarios los vehículos eléctricos puros (BEVs).

En cualquier caso, téngase presente que las cifras aportadas por las previsiones de Bloomberg New Energy Finance (2017) se refieren a las cuotas de vehículos eléctricos en la flota de automóviles, que pueden diferir, en mayor o menor medida, de las proporciones de vehículos-km realizados mediante este tipo de fuente externa de energía.

#### **5.12.1.4. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina)**

Al igual que sucede con la proporción de vehículos-km realizados mediante alimentación eléctrica externa, también es esperable que el reparto entre combustibles convencionales utilizados en motores de combustión interna (gasolina/diésel) pueda modificarse sensiblemente a lo largo del tiempo. Por consiguiente, se debe plantear la incorporación en el modelo de la posible evolución de dicho reparto durante el horizonte de evaluación, para lo cual se utilizará la variación anual prevista en la fracción de vehículos-km recorridos mediante uso de gasolina (con respecto al total de ambos combustibles convencionales). En este sentido, se asume un tipo de evolución que permita definir unos valores de variación específica para cada año en particular, por lo que la forma funcional adoptada es la misma que en la ecuación 5.12, siendo los posibles valores de  $\mu_{\gamma}$  el tipo de dato que ha de ser aportado al modelo.

<sup>150</sup> La energía eléctrica consumida para la automoción se multiplicaría por 300 entre 2016 y 2040 (de 6 TW·h en 2016 a 1,800 TW·h en 2040).

Lógicamente, los valores de esta variación anual están también sometidos a un considerable grado de incerteza, por lo que deben ser incorporados al modelo en forma de variable aleatoria. Para ello se adoptan de nuevo distribuciones triangulares de probabilidad, con la posibilidad de especificar parámetros distintos para cada año del horizonte o período de evaluación, en consideración de que a lo largo del mismo puedan darse fases o etapas en las que los patrones de evolución de esta variable presenten comportamientos –o ritmos de variación– notablemente diferentes. Por tanto, se han de indicar, como datos de entrada del modelo, los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle iPcgmin_y, iPcgmax_y, iPcgmod_y \rangle ; y=1, 2, \dots, Y_{ap}$$

donde  $iPcgmin_y$ ,  $iPcgmax_y$  e  $iPcgmod_y$  representan el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km –sobre el total efectuado por automóviles particulares utilizando combustibles convencionales (gasolina o diésel)– que son recorridos mediante el consumo de gasolina, según las previsiones para el área de estudio.

Con respecto a los posibles valores estimativos de esta variación anual, se puede recurrir, como referencia avalada por un organismo gubernamental, a las previsiones incluidas en el ‘TAG data book’ del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.9), si bien se debe tener en cuenta que el comportamiento del reparto gasolina/diésel puede presentar ciertas diferencias entre el Reino Unido y España, especialmente en el comportamiento previsto a corto plazo. Atendiendo a las proporciones previstas de vehículos-km recorridos mediante gasolina y diésel en el caso de automóviles de viajeros, es posible calcular las variaciones en puntos porcentuales resultantes para cada año individual hasta un horizonte de 2035. El signo de las variaciones previstas en la fracción de gasolina cambia a lo largo de los próximos años: es negativo (incremento de la proporción de diésel) hasta 2020 y positivo (aumento de la fracción de gasolina) a partir de dicha fecha. A modo de síntesis, se indica que la variación anual media resultante es de -0.43 puntos porcentuales entre 2018 y 2020, de 0.16 puntos porcentuales por año entre 2021 y 2025, de 0.37 puntos porcentuales al año entre 2026 y 2030, y de 0.23 puntos porcentuales por año entre 2031 y 2035.

No obstante, la tendencia a corto plazo en España –al menos en cuanto a ventas de automóviles nuevos– apunta desde hace algunos años a una reducción de la proporción de vehículos diésel en comparación con los de gasolina. En los meses de junio y julio de 2017, por primera vez desde 1998, las matriculaciones de turismos de gasolina superaron a las de diésel (ANFAC, 2017). A medio y largo plazo, esta tendencia previsiblemente continuará e incluso podría acelerarse. De hecho, en 2018 las ventas de automóviles de gasolina supusieron el 55.96% del total de turismos y todoterrenos (frente a un 35.83% de automóviles diésel) según datos publicados por ANFAC (2019: p. 42). En los once primeros meses de 2019 las ventas de automóviles de gasolina y diésel representaron, respectivamente, el 60.31% y el 27.76% del total de turismos y todoterrenos<sup>151</sup>. En esta tendencia se apuntan como posibles factores de incidencia la incertidumbre del potencial comprador ante las futuras restricciones a vehículos diésel anunciadas tanto por algunos gobiernos europeos (en materia de comercialización) como por ayuntamientos de grandes ciudades (en cuanto a su circulación en las urbes), una mayor sensibilización ciudadana sobre los efectos nocivos para la calidad del aire de las emisiones generadas por los motores de combustión interna (especialmente en el caso del diésel) y las mejoras técnicas experimentadas por los motores de gasolina en materia de reducción de consumo, que, junto con la disminución de la diferencia de los precios de venta al consumidor de ambos tipos de carburantes, contribuyen a igualar los costes energéticos de operación abonados por los usuarios.

<sup>151</sup> <https://anf.ac.com/cifras-clave/matriculaciones-turismos-y-todoterreno/#acumulados> [Acceso: 27/12/2019]



### 5.12.2. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de motos y ciclomotores

De forma similar a como se ha realizado con los automóviles particulares, en el caso de la opción modal de moto/ciclomotor también será preciso —de cara a incorporar la posible influencia de sus costes de operación por consumo energético— efectuar una segmentación básica según el tipo de fuente secundaria de energía que es utilizada para impulsar el vehículo, así como realizar algún tipo de previsión sobre como las proporciones de vehículos-km resultantes de la segmentación podrían evolucionar en el tiempo.

En primer lugar, la segmentación planteada para las motos y ciclomotores en función del tipo de fuente secundaria de energía que alimenta la propulsión del vehículo es más simple que en el caso de los automóviles, ya que solo es pertinente considerar motos o ciclomotores o bien con motor de gasolina o bien eléctrico. Pero, por otra parte, la información y previsiones disponibles sobre vehículos motorizados de dos ruedas son, en general, bastante menores que en el caso de los automóviles (especialmente en cuanto a pronósticos sobre la posible evolución futura de la expansión en el mercado de las motos y ciclomotores eléctricos).

Se procede a continuación a definir los datos de entrada empleados por el modelo desarrollado en relación con la segmentación por tipo de portador energético consumido y su posible evolución futura.

#### 5.12.2.1. Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica

Dada la simplicidad de la estructura de segmentación planteada para el caso de motos y ciclomotores, solo es necesario establecer la proporción o fracción de vehículos-km que, con respecto al volumen de kilómetros recorridos por el conjunto de motos y ciclomotores, corresponden a alimentación eléctrica externa. Este dato es susceptible de ser introducido en el modelo en forma de variable aleatoria, dadas las posibles incertidumbres con respecto a la composición del parque de motos y ciclomotores y —no menos relevante— sobre el diferente número medio de kilómetros por vehículo que podrían recorrer anualmente las motos/ciclomotores de uno y otro tipo. Para la modelización de esta fracción o proporción de vehículos-km como variable aleatoria se recurre nuevamente a una distribución triangular de probabilidad, que requiere ser especificada mediante su mínimo, máximo y moda. En consecuencia, se deben indicar los siguientes parámetros como datos de entrada del modelo:

$$\langle P_{memin}, P_{memax}, P_{memod} \rangle$$

donde  $P_{memin}$ ,  $P_{memax}$  y  $P_{memod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la fracción o proporción de vehículos-km que —con respecto al total recorrido por el conjunto de motos y ciclomotores— son efectuados por medio de alimentación eléctrica como fuente externa de energía, según los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Se trata de una variable de tipo adimensional, cuyos valores deben ser expresados numéricamente en el modelo en forma de proporción decimal.

Al igual que sucede en el caso del parque de automóviles, la fracción de motos y ciclomotores que utilizan alimentación eléctrica es actualmente todavía muy baja. Para tratar de cuantificar —al menos de manera orientativa— este dato, se puede recurrir en el contexto de España a las estadísticas sobre composición del parque vehicular de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2017). En las mismas se pueden consultar tanto el número de ciclomotores registrados (incluyendo ciclomotores de 3 ruedas y cuadriciclos ligeros) como el de motocicletas, pero solo para estas últimas (que representan el 61.8% del total de motocicletas y ciclomotores) es posible obtener una segmentación por tipo de carburante

(motocicletas de gasolina, de gas-oil <sup>152</sup> y un apartado genéricos de “otros”). En el conjunto de España, la categoría de “otros” (que podría asimilarse —a falta de más información— básicamente a motocicletas eléctricas) constituye únicamente el 0.218% del conjunto de motocicletas <sup>153</sup>. Además, se debe tener presente que estos datos se refieren únicamente a la composición del parque de vehículos, por lo que no proporcionan la información precisa sobre las distancias totales (veh-km) recorridas por las motocicletas de cada una de estas categorías.

En conclusión, puede suponerse que la fracción de vehículos-km que son recorridos en España en moto o ciclomotor mediante alimentación eléctrica, si bien no es conocida con exactitud, resulta actualmente casi insignificante.

### 5.12.2.2. Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica

Al igual que en el caso de los automóviles, resulta esperable que a lo largo del horizonte de evaluación se produzca una evolución —de tendencia previsiblemente creciente— en la proporción de vehículos-km que son efectuados gracias a alimentación eléctrica con respecto al kilometraje general del conjunto de motos y ciclomotores, por lo que la posibilidad de incorporar estas tendencias también debe entrar a formar parte del modelo. Al respecto, se adopta nuevamente un modelo de evolución con valores específicos de variación para cada año en particular, cuya forma funcional corresponde a la ecuación 5.12.

Por otra parte, los valores de evolución futura de esta fracción o proporción (cuantificados mediante las variaciones anuales de la misma, es decir,  $\mu_y$  en la ecuación 5.12) están inevitablemente sometidos a un alto grado de incertidumbre, de tal modo que dichas variaciones anuales han de ser tratadas como una variable aleatoria por parte del modelo. Se plantean para ello distribuciones triangulares de probabilidad, incorporando la posibilidad de especificar parámetros (mínimo, moda y máximo) distintos para cada uno de los años del horizonte o período de evaluación en previsión de que puedan tener lugar fases o etapas en las que la evolución de la variable muestre diferentes ritmos de variación. Por consiguiente, se deben indicar, como datos de entrada a valorar por el analista, los siguientes conjuntos de parámetros:

$$\langle iPmemin_y, iPmemax_y, iPmemod_y \rangle ; y=1, 2, \dots, Y_{ap}$$

donde  $iPmemin_y$ ,  $iPmemax_y$  e  $iPmemod_y$  son el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total llevado a cabo por el conjunto de motos y ciclomotores— que son recorridos mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, según las previsiones para el área de estudio.

En relación con los posibles valores orientativos de estas variaciones anuales, se ha encontrado que la información disponible públicamente sobre previsiones de crecimiento de la cuota de implantación de motocicletas y ciclomotores eléctricos en el mercado de vehículos motorizados de dos ruedas es ciertamente escasa, ya que algunos de los análisis sobre esta materia han sido desarrollados por compañías privadas de investigación de mercados (Global Market Insights, 2017; Global Industry Analysts, 2017). Como dato capaz de aportar algo de información sobre esta cuestión, se indica que según algunas estimaciones (Navigant Consulting, 2015b) las ventas anuales de motocicletas eléctricas en el mundo pasarían de 1.2 millones de unidades en 2015 a 1.5 millones en 2024, mientras que en el caso de *scooters* eléctricos se pasaría de 4.1 millones de unidades vendidas en 2015 a 4.4 millones en 2024. Este aumento aparentemente moderado puede estar causado por la posición predominante que

<sup>152</sup> La categoría de motocicletas de gas-oil aparece en los registros estadísticos de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2017), pero estas desempeñan un papel totalmente irrelevante (0.08% del total de motocicletas).

<sup>153</sup> En el caso de Galicia este porcentaje se sitúa en solo el 0.093%.

ocupan China y la región de Asia-Pacífico en el mercado de vehículos eléctricos de dos ruedas, donde este tipo de ciclomotores y motocicletas son ya mayoritarios (por tanto, el potencial de crecimiento en estos países, que representan grandes mercados para el sector, es bastante más reducido). De hecho, las estimaciones específicas para Estados Unidos (cuyo comportamiento en este sentido puede ser más comparable al previsible en Europa) indican un incremento de las ventas de motocicletas eléctricas desde 2,021 unidades en 2015 a 37,667 en 2024, y desde 4,934 unidades en 2015 a 21,756 en 2024 en el caso de *scooters* (Navigant Consulting, 2015a).

En cualquier caso, los datos reseñados parecen insuficientes para establecer unas tasas de variación anual de la proporción de vehículos-km razonablemente justificadas, más allá de servir para ilustrar las tendencias dominantes en cuanto a la creciente ‘electrificación’ de la movilidad motorizada.

### 5.12.3. Consumo de energía en vehículos eléctricos y proyecciones de reducción de consumo de combustible en motores de combustión interna

Un segundo factor fundamental a tener en cuenta en relación con los costes energéticos de operación de los vehículos motorizados particulares es el consumo promedio de los vehículos encuadrados en las diferentes categorías y segmentaciones (automóviles: gasolina, diésel, eléctricos; motos y ciclomotores: gasolina, eléctricos) por unidad de distancia recorrida. Como se expondrá a continuación, en algunos casos este consumo promediado es calculado internamente por el modelo y en otros debe ser introducido en forma de dato.

Para los vehículos (ya sean automóviles o motocicletas) con motores de combustión interna, el estado del conocimiento permite utilizar curvas o funciones que relacionan el consumo de combustible (gasolina o diésel) con la velocidad media de circulación. Dichas funciones han sido desarrolladas, entre otras posibles fuentes, por el Programa Europeo de Monitorización y Evaluación de la Agencia Europea de Medioambiente en su *‘Air Pollutant Emission Inventory Guidebook’* (EMEP/EEA, 2016), y estas han sido incorporadas al modelo para el cálculo del consumo promedio de automóviles diésel, de automóviles de gasolina, y de motos y ciclomotores (con motor de combustión interna de gasolina), en función de la velocidad media de trayecto (véase epígrafe 8.3.7.4). Por tanto, los parámetros relativos al consumo de dichos tipos de vehículos no requieren ser introducidos en el modelo como datos adicionales.

Por su parte, para los vehículos propulsados mediante alimentación eléctrica externa, todavía no están disponibles unas funciones estandarizadas que relacionen el consumo energético con la velocidad media de circulación (EMEP/EEA, 2016: p. 71). De hecho, el Departamento de Transportes del Reino Unido indica, en la sección dedicada a los parámetros de consumo de combustible y energía de su *‘TAG data book’* (DfT, 2017a: Sección A1.3.8), que el cuerpo de conocimientos sobre el consumo energético de automóviles eléctricos es todavía bastante limitado, por lo que se ha de asumir un consumo medio independiente de la velocidad. Esta cifra de consumo medio (o, más exactamente, su distribución de probabilidad) es la que se debe introducir en el modelo como dato externo. Esta misma situación se hace extensible también a las motos y ciclomotores eléctricos, para los que el conjunto de información disponible es quizás todavía más limitado.

En relación con la posible evolución futura del consumo medio de energía por unidad de distancia recorrida, cabe prever que —tal como ha venido sucediendo desde hace algunas décadas— se producirá una mejora en la eficiencia energética de los motores de combustión interna, que se traducirá en una reducción del consumo promedio de este tipo de vehículos. Esta posible reducción se incluye en el modelo en los casos de los automóviles de gasolina, automóviles diésel, y motos y ciclomotores de gasolina, requiriéndose al respecto la introducción de datos externos sobre la magnitud de estas posibles mejoras (reducciones relativas de consumo esperables en el año final del horizonte temporal o período de evaluación). En el caso de los vehículos de alimentación eléctrica se ha prescindido de considerar este posible efecto (al menos en cuanto a su incidencia sobre las variaciones en el coste privado por consumo energético asumido por los usuarios), ya que, por un lado, es más incierta la futura existencia de una

tendencia clara en este sentido<sup>154</sup>, y, por otra parte, la influencia de esta posible evolución sobre el coste privado percibido por el usuario sería muy reducida, puesto que estos costes son ya de por sí muy bajos en comparación con los vehículos convencionales con motores de combustión interna.

A continuación se definen, de forma más detallada, los datos de entrada relativos al consumo energético de vehículos motorizados particulares necesarios para la aplicación del modelo desarrollado.

### 5.12.3.1. Consumo promedio de energía en automóviles eléctricos

El consumo promedio de energía por parte de los automóviles que emplean electricidad de la red como fuente externa de alimentación está también sujeto a un cierto nivel de incertidumbre, tanto por la posible variabilidad en el consumo individual de los distintos modelos de automóviles eléctricos, como por la falta de conocimiento sobre la composición exacta del parque de automóviles eléctricos en cuanto a las cuotas de reparto entre distintos modelos. Así pues, este consumo debe ser tratado en el modelo preferentemente como una variable aleatoria, para la cual se adopta una distribución triangular de probabilidad. Dado que este tipo de distribuciones se caracterizan mediante sus valores de mínimo, máximo y moda, se han de especificar los siguientes parámetros como datos de entrada del modelo:

$$\langle EC_{cmin}, EC_{cmax}, EC_{cmod} \rangle$$

donde  $EC_{cmin}$ ,  $EC_{cmax}$  y  $EC_{cmod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del consumo promedio de energía (por unidad de distancia recorrida) del conjunto de automóviles que utilizan electricidad de la red como fuente externa de alimentación, según los datos disponibles o previstos para el área de estudio. Las unidades empleadas en el modelo para expresar numéricamente el valor de estas variables de entrada son kilowatios-hora por kilómetro [kW·h/km].

Como valor de referencia del consumo medio de automóviles eléctricos podría optarse por seguir los valores numéricos recomendados por el Departamento de Transportes del Reino Unido en su '*TAG data book*', donde se indicaba, tomando como base el año 2011, un consumo medio de 0.12564 kW·h/km (DfT, 2017a: Sección A1.3.8), mientras que la previsión para 2017 apuntaba a un consumo de 0.12994 kW·h/km (DfT, 2017a: Sección A1.3.11). No obstante, analizando datos de consumo de distintos modelos de automóviles eléctricos puros (BEVs/FEVs) extraídos de la '*Fuel Economy Guide 2017*' (DOE/EERE y EPA, 2017: pp. 35-36) —divulgada conjuntamente por la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Departamento de Energía y por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU.— puede observarse que el consumo energético de los modelos disponibles actualmente en el mercado es algo superior a las cifras indicadas por el '*TAG data book*' del Departamento de Transportes del Reino Unido. En la Tabla 5.5 se resumen —junto con algunas otras características relevantes— los datos de consumo en tráfico urbano y mixto o combinado de una muestra de estos vehículos. Los valores medios para dicha muestra resultan de 0.178 kW·h/km en tráfico urbano y de 0.193 kW·h/km en circulación mixta o combinada<sup>155</sup> (obsérvese que este comportamiento, con un consumo más reducido en tráfico urbano, difiere del que es habitual en motores de combustión interna).

En conclusión, se estima conveniente tomar valores más acordes a los datos de la Tabla 5.5 que a las cifras indicadas por el '*TAG data book*' del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Secciones A1.3.8 y A1.3.11).

<sup>154</sup> Probablemente los objetivos primordiales de los fabricantes de vehículos eléctricos puros se centren en el futuro (al menos a corto/medio plazo) en conseguir un importante incremento de la autonomía a través de mejoras en la capacidad de almacenamiento energético de las baterías (más que mediante la reducción de consumo), así como en disminuir los tiempos de recarga.

<sup>155</sup> La circulación mixta o combinada está compuesta, según el criterio de DOE/EERE y EPA (2017), por un 55% de recorrido urbano y un 45% de carretera o autopista.

**Tabla 5.5.** Consumo de energía de diversos modelos de automóviles eléctricos puros en tráfico urbano y mixto o combinado.

Marca	Modelo	Potencia del motor [kW]	Consumo [kW·h/km]		Autonomía [km]
			Urbano	Mixto	
BMW	i3 BEV (94 Amp-hr battery)	125	0.162	0.180	183
Fiat	500e	82	0.174	0.186	135
Ford	Focus Electric	107	0.174	0.193	185
Hyundai	Ioniq Electric	88	0.137	0.155	200
Kia	Soul Electric	81	0.174	0.199	150
Mercedes-Benz	B250e	132	0.242	0.249	140
Nissan	Leaf	80	0.168	0.186	172
Smart	fortwo electric drive coupe	60	0.168	0.193	93
Tesla	Model S (75 kW-hr battery pack)	285	0.217	0.211	401
Volkswagen	e-Golf	100	0.168	0.174	201

Fuente de datos: DOE/EERE y EPA (2017: pp. 35-36).

### 5.12.3.2. Consumo promedio de energía en motos y ciclomotores eléctricos

Similarmente a los automóviles eléctricos, el consumo promedio del segmento de motos y ciclomotores que son propulsados mediante energía eléctrica es también una variable que está sometida a un importante grado de incertidumbre, probablemente superior que en el caso de los automóviles, debido a la mayor variabilidad de características entre los diversos vehículos con significativa presencia en el grupo (desde pequeños ciclomotores hasta grandes motocicletas de altas prestaciones), y al menor nivel de información sistematizada que generalmente está disponible sobre este tipo de vehículos en comparación con los automóviles. En consecuencia, el consumo promedio del conjunto de motos y ciclomotores eléctricos ha de ser considerado, en el contexto de la modelización desarrollada, como una variable aleatoria. Se asume a tal objeto una distribución triangular de probabilidad, por lo que esta debe ser definida mediante los siguientes parámetros, que actúan como datos de entrada del modelo:

$$\langle EC_{mmin}, EC_{mmax}, EC_{mmod} \rangle$$

donde  $EC_{mmin}$ ,  $EC_{mmax}$  y  $EC_{mmod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del consumo promedio de energía (por unidad de distancia recorrida) del conjunto de motocicletas y ciclomotores eléctricos, de acuerdo a la composición del parque de este tipo de vehículos estimada o prevista para el área de estudio. Estos valores se expresan numéricamente en el modelo en unidades de kilowatios-hora por kilómetro [kW·h/km].

Para obtener valores orientativos del consumo de energía de motocicletas y ciclomotores eléctricos se recurre directamente a datos disponibles sobre las características y prestaciones de modelos particulares<sup>156</sup>. Dado que en el caso de motos y ciclomotores eléctricos en muchas ocasiones no se facilitan explícitamente los datos de consumo, este ha de ser estimado de manera aproximada como el cociente entre la capacidad de almacenamiento energético de la/-s batería/-s (kW·h) y la autonomía en ciudad (km). En la Tabla 5.6 se resumen estos datos para una muestra de modelos de motocicletas y ciclomotores eléctricos de varios tipos. El consumo urbano medio para dicha muestra –que, aunque se ha procurado que esté equilibrada en cuanto a presencia de diversas clases de motos y ciclomotores, no tiene por qué ser necesariamente representativa de las múltiples situaciones posibles– es de 0.0367 kW·h/km.

<sup>156</sup> Como fuente de dichos datos se ha utilizado la página-web 'electromaps': <https://www.electromaps.com/motos-electricas> [Acceso: agosto 2017]

**Tabla 5.6.** Consumo de energía estimado para diversos modelos de motocicletas y ciclomotores eléctricos en circulación urbana.

Marca y modelo	Potencia máxima [kW]	Capacidad de la batería [kW·h]	Autonomía en ciudad [km]	Consumo urb. estimado [kW·h/km]
BMW C Evolution (19 kW)	35	8	160	0.0500
Booster-bikes Aero Wing (2000 W)	2	2.4	110	0.0218
e-Volt Falcon	10	3.6	85	0.0420 <sup>(a)</sup>
Elecsi Tour (Batería Litio)	5	2.4	95	0.0253
Peugeot Scooters e-Vivacity 300	3	2	60	0.0300 <sup>(a)</sup>
Quazzar e-Silent	3	1.68	60	0.0280
Victory Motorcycles Empulse TT	40	9.31	206	0.0452
Volta BCN City	25	3	70	0.0429
Vortex NWR Plus	9	4.68	150	0.0312
Zero Motorcycles Zero S 2016 13.0	11	13	259	0.0502

<sup>(a)</sup> Dato de consumo indicado explícitamente (no calculado).

Fuente de datos: <https://www.electromaps.com/motos-electricas>

Los rangos en los que se sitúan los consumos de energía en circulación urbana recopilados en la Tabla 5.6 muestran un buen grado de conformidad con los resultados teóricos obtenidos por Walker y Roser (2015) mediante simulación computacional de ciclos de conducción para diversos tipos de vehículos de dos ruedas (convencionales de combustión interna, eléctricos puros, híbridos enchufables e híbridos no enchufables). En el caso de los ciclomotores o motocicletas eléctricas puras, el consumo de energía eléctrica obtenido por estos autores se sitúa entre 0.0182 y 0.0237 kW·h/km para el ciclo de conducción urbana ECE-15 (velocidades máximas no superiores a 50 km/h) y entre 0.0356 y 0.0450 kW·h/km para el ciclo UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*)<sup>157</sup>, que es más exigente al incluir picos de velocidad cercanos a 100 km/h. No obstante, también se ha informado de alguna prueba en condiciones reales en las que el consumo de energía ha sido notablemente mayor. Tal es el caso de Bishop *et al.* (2011), que reportan los resultados obtenidos de una campaña de monitorización sobre una pequeña flota de *scooters* eléctricos en condiciones reales de uso, llevada a cabo en 2010 en Oxford (Reino Unido). El consumo medio de energía hallado en esta investigación se eleva a 0.10 kW·h/km, si bien dicho valor incluiría ciertas ineficiencias en los procesos de carga/descarga de las baterías de tipo VRLA (baterías de ácido-plomo reguladas por válvula), menos eficaces que las de ión de litio (Li-Ion), que tienen actualmente una utilización mucho más extendida. El uso directo de energía por el sistema de propulsión fue, de todas formas, de 0.068 kW·h/km.

### 5.12.3.3. Reducción proporcional del consumo medio de combustible esperable al final del horizonte de evaluación

Por lo que respecta a la posible evolución futura del consumo medio de los diferentes vehículos con motores de combustión interna, esta se introduce en el modelo mediante la definición de la previsible variación relativa del consumo medio de combustible por unidad de distancia recorrida esperable en el año final del horizonte temporal o período de evaluación, medida en forma de porcentaje con respecto al consumo en el año base. En los años intermedios (entre el año base y el final del horizonte de evaluación) el modelo de cálculo adoptará simplemente una variación lineal entre ambos extremos.

La tendencia de evolución consistirá —al menos previsiblemente— en una reducción del consumo medio de combustible, propiciada por el desarrollo de mejoras técnicas en la eficiencia energética de los

<sup>157</sup> En los rangos obtenidos para cada ciclo de conducción, el valor inferior corresponde a vehículos con menor autonomía (batería de inferior capacidad y menor peso de la moto o ciclomotor) y el superior a vehículos con mayor autonomía (batería de más capacidad y mayor peso de la moto o ciclomotor).

nuevos modelos de vehículos puestos en el mercado —véanse someramente algunos de estos avances técnicos en DOE/EERE y EPA (2017: p. 4)— y la progresiva incorporación de estos nuevos modelos al parque vehicular en circulación.

A consecuencia de su carácter predictivo sobre factores exógenos futuros, la magnitud de esta reducción de consumo (o, en su caso, incremento si tuviese signo contrario) ha de ser tratada por el modelo desarrollado como una variable aleatoria, diferenciada para cualquiera de los tres tipos de vehículos que utilizan combustibles líquidos en motores de combustión interna (automóviles de gasolina, automóviles diésel, y motos y ciclomotores de gasolina). Se proponen al respecto, para cualquiera de los tres casos, distribuciones triangulares de probabilidad, de tal modo que a continuación se han de indicar los valores de mínimo, máximo y moda de cada una de ellas.

### 5.12.3.3.a. Reducción de consumo medio en automóviles de gasolina

En el caso de los automóviles de gasolina, se deben introducir como datos de entrada del modelo los siguientes parámetros:

$$\langle fcr_{gmin}, fcr_{gmax}, fcr_{gmod} \rangle$$

donde  $fcr_{gmin}$ ,  $fcr_{gmax}$  y  $fcr_{gmod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del porcentaje de reducción del consumo medio de combustible (por unidad de distancia recorrida) del parque vehicular de automóviles de gasolina esperable en el año final del horizonte o período de evaluación (es decir, en  $y=Yap$ ), determinado con respecto a su consumo en el año base.

Nótese que, con el criterio de signos adoptado en el modelo, valores positivos indican una disminución del consumo, mientras que valores negativos implicarían un aumento.

Para disponer de valores orientativos sobre esta posible reducción, se acude a las previsiones de mejora de eficiencia energética de vehículos contenidas dentro del '*TAG data book*' del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.10), donde se indican las variaciones anuales de consumo previstas para diferentes tipos de vehículos<sup>158</sup>. En el caso de los automóviles de gasolina, la reducción de consumo prevista para un horizonte máximo disponible de 2035 es del 24.3% (calculada con el 2017 como año de referencia). En la Tabla 5.7 (incorporada dentro del siguiente subepígrafe para incluir en la misma también a los automóviles diésel) se resumen las reducciones de consumo medio de gasolina alcanzadas hasta diferentes años (según dichas previsiones), tomando en todos los casos el 2017 como año de referencia.

### 5.12.3.3.b. Reducción de consumo medio en automóviles diésel

Para el caso de los automóviles diésel, los parámetros sobre reducción de consumo a introducir en el modelo como datos de entrada son los siguientes:

$$\langle fcr_{dmin}, fcr_{dmax}, fcr_{dmod} \rangle$$

donde  $fcr_{dmin}$ ,  $fcr_{dmax}$  y  $fcr_{dmod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del porcentaje de reducción del consumo medio de combustible (por unidad de distancia recorrida) del parque vehicular de automóviles diésel esperable en el año final del horizonte o período de evaluación (es decir, en  $y=Yap$ ), calculado con respecto a su consumo en el año base.

Al igual que en el caso de los automóviles de gasolina, para disponer de unos valores de referencia para coches diésel se puede recurrir a las previsiones de mejora de eficiencia energética de vehículos indicadas por el '*TAG data book*' del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.10). Para los automóviles diésel, la reducción de consumo prevista hasta un horizonte máximo disponible de 2035 resulta del 15.9% (con 2017 como año de referencia). Complementariamente, se glosan en la Tabla 5.7 (paralelamente a los automóviles de gasolina) las reducciones de consumo medio

<sup>158</sup> Téngase en cuenta que en la referencia citada el criterio de signos sobre esta cuestión es el opuesto al aquí utilizado.

de combustible diésel que se alcanzarían hasta diferentes años de acuerdo a dichas previsiones, tomando para ello el 2017 como año de referencia.

**Tabla 5.7.** Porcentajes previstos de reducción de consumo de combustible (por unidad de distancia recorrida) para diferentes horizontes temporales, en automóviles de gasolina y diésel.

Período (años inicial y final)	Reducción porcentual de consumo	
	Automóviles de gasolina	Automóviles diésel
2017-2025	16.9%	11.1%
2017-2030	22.2%	14.5%
2017-2035	24.3%	15.9%

Fuente de datos: DfT (2017a: Sección A1.3.10).

### 5.12.3.3.c. Reducción de consumo medio en motos y ciclomotores de gasolina

En el caso de las motos y ciclomotores con motor de combustión interna (de gasolina), se han de indicar los siguientes parámetros como datos de entrada del modelo:

$$\langle fcrmin, fcrmax, fcrmod \rangle$$

donde *fcrmin*, *fcrmax* y *fcrmod* son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del porcentaje de reducción del consumo medio de combustible (por unidad de distancia recorrida) del parque vehicular de motos y ciclomotores de gasolina esperable en el año final del horizonte o período de evaluación (es decir, en  $y=Yap$ ), establecido con respecto a su consumo en el año base.

A diferencia de lo que acontece con los automóviles de gasolina y diésel (así como con otros tipos de vehículos), en el 'TAG data book' del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a) no se incluye información sobre el consumo de motocicletas y ciclomotores, ni tampoco sobre su posible evolución a lo largo del tiempo. Es difícil por tanto indicar unas previsiones cuantitativas al respecto, aunque cabe presuponer que la reducción de consumo en motos y ciclomotores de gasolina sería, solo en el mejor de los casos, similar a la de los automóviles del mismo tipo de combustible. Parece más probable que dicha reducción sea sensiblemente más moderada que en el caso de los automóviles.

## 5.12.4. Precios de los combustibles y de la energía eléctrica

### 5.12.4.1. Precio inicial (año base) de venta de la gasolina

La variable *PRg*\* indica el precio medio de venta al consumidor de la gasolina en el año base, para la zona o área geográfica de estudio. Este precio se ha de expresar en el modelo en unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios) por litro de carburante [CU/l].

El precio nominal medio en España de la gasolina de 95 octanos era en 2017 (con datos del año completo) de 1.234 €/l, mientras que se situaba en 1.362 €/l para la gasolina de 98 octanos<sup>159</sup>. Dado que, según datos extraídos de CORES (2017: p. 35), el consumo de gasolina 95 en España en 2016 representó el 92.09% del consumo total de gasolinas de automoción (frente al 7.91% de la gasolina 98), es posible establecer un precio medio ponderado de 1.244 €/l.

<sup>159</sup> Datos consultados en: <http://www.dieselogasolina.com/Estadisticas/Historico> [Último acceso: 29/01/2020]  
Para el caso particular de la provincia de A Coruña, los precios medios eran de 1.260 €/l (gasolina 95) y de 1.386 €/l (gasolina 98).



### 5.12.4.2. Precio inicial (año base) de venta del combustible diésel

La variable  $PRd^*$  representa el precio medio de venta al consumidor del gasóleo de automoción en el año base, para la zona o área geográfica de estudio. Dicho precio debe ser expresado en el modelo en unidades monetarias constantes (del año adoptado como referencia para el nivel general de precios) por litro de combustible [CU/l].

En España, el precio nominal medio del gasóleo A era en 2017 (con datos del año completo) de 1.120 €/l, mientras que para el diésel 'premium' o gasóleo A+ alcanzaba 1.193 €/l<sup>160</sup>. Dado que no se dispone de estadísticas sobre las proporciones de uso de una u otra variedad comercial, la opción más recomendable consistiría en transferir las cuotas de reparto entre gasolina 95 (normal) y gasolina 98 ('premium') al caso de los gasóleos de automoción, obteniéndose de esta forma un precio medio ponderado de 1.126 €/l.

### 5.12.4.3. Precio inicial (año base) de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos

A consecuencia de las múltiples complejidades de tarificación de la energía eléctrica y las fuentes de incertidumbre que de ello se derivan, puede resultar más aconsejable que, a diferencia de lo propuesto para los combustibles líquidos, el precio medio de la electricidad consumida para la recarga de vehículos eléctricos sea considerada en el modelo como una variable aleatoria incluso para el año base. Así pues, se adopta para este fin una distribución triangular de probabilidad, de la que deberán especificarse sus valores de mínimo, máximo y moda. Por tanto, es preciso indicar, como datos de entrada del modelo, los siguientes parámetros:

$$\langle PRemin, PRemax, PRemod \rangle$$

donde  $PRemin$ ,  $PRemax$  y  $PRemod$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) del precio medio para los usuarios de vehículos eléctricos de la energía consumida en la recarga de las baterías, en el año base y en la zona o área geográfica de estudio. Estos valores han de ser expresados en el modelo en unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios) por kilowatio-hora de energía eléctrica [CU/kW·h].

Para establecer una referencia orientativa del precio en España de la energía eléctrica consumida durante la recarga doméstica de los vehículos, se ha adoptado como base la modalidad de Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC). Para determinar el precio medio, durante un determinado período de facturación, del término de energía bajo dicha modalidad se recurre a la herramienta-web LUMIOS<sup>161</sup>, de Red Eléctrica de España. Se asume al respecto una tarifa con discriminación horaria de 3 períodos (tarifa vehículo eléctrico), con un perfil de consumo en el que el 25% del tiempo de recarga del vehículo se realiza durante el período P1 (punta), el 35% durante el período P2 (valle) y el 40% en el período P3 (supervalle). Si se analiza un período de facturación entre el 01/01/2017 y el 31/12/2017 (suficientemente prolongado para neutralizar variaciones estacionales) se obtiene un precio promediado del término de energía activa (FEU) de 0.08765 €/kW·h (antes de impuestos)<sup>162</sup>. A continuación se deben repercutir, en primer lugar, el impuesto especial sobre la electricidad (5.11%) y, sobre el valor resultante, el tipo general de IVA del 21%. Se obtendría así un precio final para el consumidor en 2017 de 0.11148 €/kW·h.

No obstante, otro aspecto que podría ser tenido en cuenta es la posible disponibilidad y uso de puntos de recarga pública, que, para fomentar la implantación del vehículo eléctrico, podrían contar con precios bonificados o ser incluso gratuitos en algunos casos.

<sup>160</sup> Datos consultados en: <http://www.dieselogasolina.com/Estadisticas/Historico> [Último acceso: 29/01/2020]

En el caso particular de la provincia de A Coruña, los precios medios eran de 1.148 €/l (gasóleo A) y de 1.214 €/l (gasóleo A+ o 'premium').

<sup>161</sup> <https://www.esios.ree.es/es/lumios> [Último acceso: 29/01/2020]

<sup>162</sup> <https://tinyurl.com/s6jqnjt> [Último acceso: 29/01/2020]

#### 5.12.4.4. Evolución futura del precio de venta de los productos energéticos (en unidades monetarias constantes)

Para representar en el modelo las posibles tendencias futuras en el precio de venta (en unidades monetarias constantes) de los diferentes productos energéticos contemplados (gasolina, combustible diésel y energía eléctrica), se asume una evolución de tipo lineal<sup>163</sup> expresada genéricamente mediante una función discreta de la siguiente forma:

$$Z_Y = Z_{Y-1} + \frac{\eta(\%)\cdot Z_0}{100} = Z_0 + \frac{\eta(\%)\cdot Z_0}{100} \cdot (Y - Y_0) = Z_0 \cdot \left[ 1 + \frac{\eta(\%)}{100} \cdot (Y - Y_0) \right] \quad (5.13)$$

donde  $Z_Y$  indica el valor de la variable dependiente analizada (el precio en este caso) en el año  $Y$ ,  $Z_0$  es el valor inicial de dicha variable dependiente (en el año base  $Y_0$ ) y  $\eta$  representa la constante de variación anual de la variable dependiente, cuantificada como proporción porcentual del valor inicial o en el año base de la variable (es decir, de  $Z_0$ ).

Por otra parte, la proporción anual de variación ( $\eta$  en el contexto de la ecuación 5.13) del precio de venta de estos productos energéticos, debido a su dependencia con respecto a factores exógenos futuros y a las diversas fuentes de incertidumbre que pesan sobre cualquier predicción o transferencia de valores previstos, debe ser tratada en el modelo desarrollado como una variable aleatoria. En este sentido, se procederá a adoptar distribuciones triangulares de probabilidad en cada uno de los tres casos, debiendo definirse, para cada una de dichas distribuciones, los valores de mínimo, máximo y moda.

##### 5.12.4.4.a. Evolución futura del precio de venta de la gasolina

En relación con el precio futuro de venta de la gasolina, se han de introducir como datos de entrada del modelo los siguientes parámetros:

$$\langle iPRgmin, iPRgmax, iPRgmod \rangle$$

donde  $iPRgmin$ ,  $iPRgmax$  e  $iPRgmod$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media del precio de venta al consumidor de la gasolina (en términos reales, es decir, expresado en unidades monetarias constantes), cuantificada dicha variación como porcentaje con respecto al precio en el año base.

Al objeto de contar con una estimación aproximada de la posible evolución del precio de venta de la gasolina (valorado en unidades monetarias constantes), se recurre, de forma orientativa, a las previsiones sobre los precios de combustibles y electricidad incluidas en el 'TAG data book' del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.7). Dichas previsiones aparecen desagregadas entre el coste del recurso, impuestos especiales e Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA/VAT). El precio final de venta se calcula a partir de la suma del coste del recurso y el impuesto especial (que es una cantidad fija, independiente del coste del recurso), aplicándose sobre dicha suma el IVA correspondiente (20% en el caso del Reino Unido). Esta estructura de determinación del precio es similar a la utilizada en España, aunque varíen los importes de cada componente (por ejemplo, 21% de IVA actualmente en España). No obstante, dado que en el modelo las variaciones en el precio de los combustibles y energía eléctrica se definen en términos proporcionales (como porcentaje sobre el precio en el año base), la diferente tasa de IVA aplicada no afecta a la determinación de dichas variaciones (siempre y cuando el tipo de IVA se mantenga constante en cada país). Así pues, las variaciones porcentuales que puedan calcularse con respecto al precio en un determinado año base dependen realmente de la suma del coste del recurso y los impuestos especiales. El coste en sí del

<sup>163</sup> En un principio se había planteado la posibilidad de adoptar una evolución con respecto al tiempo de tipo exponencial (progresión geométrica), pero el análisis de las previsiones disponibles sobre el precio futuro de venta de los productos energéticos considerados (DfT, 2017a: Sección A1.3.7) ha desaconsejado esta opción, resultando más apropiada la evolución de tipo lineal.

recurso está sometido a los cambios de un mercado internacional altamente complejo, muy influido además por la estabilidad política de los países productores y exportadores de petróleo y las estrategias adoptadas por aquellos. Mientras, la evolución de los impuestos, relevante al considerar el coste para el usuario final, está directamente derivada de decisiones políticas del país consumidor. Además, una limitación adicional en relación con la serie de datos del ‘TAG data book’ consiste en que las previsiones sobre la evolución del coste del recurso solo consideran una variación real de dicho coste hasta 2030, mientras que a partir de dicho año asumen que este permanece constante (no así los impuestos especiales sobre hidrocarburos, que siguen una tendencia creciente desde 2017 en adelante, hasta finalizar el período máximo para el cual DfT ha incluido previsiones). Dada esta limitación, se va a adoptar como período de referencia para determinar un valor orientativo de variación anual media el comprendido entre 2017 y 2030, asumiendo que a partir de este último año la variación anual obtenida sería extrapolable en el tiempo.

Bajo este enfoque, e imponiendo que la función lineal pase efectivamente por el punto correspondiente al precio en el año inicial (valor fijo de partida<sup>164</sup>), el mejor ajuste de la serie de datos comprendida entre 2017 y 2030 se produce para un incremento anual equivalente al 2.09% del precio en el año inicial (2017 en este caso). Por tanto, este aumento del 2.09% podría tomarse —con las debidas cautelas sobre la transferibilidad de datos entre el Reino Unido y España en esta materia— como valor central orientativo de la variación anual (en términos reales) del precio de venta al consumidor de la gasolina.

#### 5.12.4.4.b. Evolución futura del precio de venta del combustible diésel

En el caso del combustible diésel, los datos de entrada a indicar en el modelo están constituidos por los siguientes parámetros:

$$\langle iPR_{dmin}, iPR_{dmax}, iPR_{dmod} \rangle$$

donde  $iPR_{dmin}$ ,  $iPR_{dmax}$  e  $iPR_{dmod}$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media del precio de venta al consumidor del gasóleo de automoción (en términos reales, es decir, indicado en unidades monetarias constantes), cuantificada dicha variación como porcentaje sobre su precio en el año base.

Al igual que en el caso de la gasolina, para establecer una estimación aproximada de la previsible variación anual del precio de venta del gasóleo de automoción (en unidades monetarias constantes) se puede acudir a las previsiones sobre los precios de combustibles y electricidad que forman parte del ‘TAG data book’ del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.7). En este sentido, son de aplicación las mismas indicaciones que se señalaron anteriormente para el caso de la gasolina, por lo que se toma la serie de previsiones comprendida entre 2017 y 2030 como período de referencia.

Con estas condiciones, e imponiendo que la función lineal haya de pasar por el punto que corresponde al precio en el año inicial (valor fijo de partida), el mejor ajuste a esta serie de datos se obtiene para un incremento anual que equivale al 2.23% del precio en el año inicial. Así pues, como valor central orientativo de la variación anual (en términos reales) del precio de venta al consumidor del combustible diésel se podría tomar, en ausencia de otras previsiones más específicas sobre un determinado caso de estudio, un incremento relativo del 2.23%.

#### 5.12.4.4.c. Evolución futura del precio de venta de la energía eléctrica

Por lo que respecta al precio futuro de venta de la energía eléctrica, se deben especificar, como datos de entrada del modelo, los valores de los siguientes parámetros:

$$\langle iPR_{emin}, iPR_{emax}, iPR_{emod} \rangle$$

<sup>164</sup> Este valor fijo corresponde, en la ecuación 5.10, a  $Z_0$ .

donde  $iPRemin$ ,  $iPRemax$  e  $iPRemod$  son el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual media del precio de la energía eléctrica (en términos reales, es decir, expresado en unidades monetarias constantes) consumida por los usuarios de vehículos eléctricos, cuantificada dicha variación como porcentaje con respecto a su precio en el año base.

La estimación aproximada sobre la posible evolución del precio de la energía eléctrica consumida (valorada en unidades monetarias constantes) se basa de nuevo en las previsiones sobre los precios de combustibles y electricidad contenidas en el ‘TAG data book’ del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017a: Sección A1.3.7). A diferencia de los carburantes, en el caso de la energía eléctrica no se aplica en el Reino Unido ningún impuesto especial sobre el precio del recurso (que incluye no solo costes de producción, sino también costes de operación y mantenimiento de la red, costes ambientales y sociales internalizados, etc.), mientras que, por su parte, el tipo de IVA se reduce al 5%. Por tanto, las variaciones anuales calculadas con respecto al precio en un determinado año inicial dependerían solamente de la evolución del coste del recurso (siempre y cuando el tipo de IVA se mantenga constante en el tiempo, tal como indican las previsiones aportadas por el ‘TAG data book’). En España, el precio de la energía consumida (término de energía activa) está afectado sucesivamente por el impuesto especial (5.11%) y por el IVA general (21%), pero, en términos proporcionales, también se cumple que las variaciones anuales en el precio final para el consumidor —calculadas porcentualmente con respecto al precio en un cierto año inicial— no dependen de dichos impuestos si sus porcentajes permanecen constantes a lo largo de los años. En conclusión, estas diferencias de impuestos entre ambos países no serían, por sí mismas, un obstáculo importante para la transferibilidad de variaciones relativas si se asume la hipótesis de tipos impositivos constantes a lo largo del tiempo.

Al igual que en los casos de la gasolina y del combustible diésel, por limitaciones de las previsiones disponibles se toma como período de referencia a efectos de determinar un valor orientativo de variación anual el comprendido entre 2017 y 2030, ya que a partir de dicho año no se señala variación alguna. Con esta serie de datos, e imponiendo que la función lineal deba pasar por el punto correspondiente al precio en el año inicial (valor fijo de partida), se obtiene que el mejor ajuste de la variación anual se produce para un incremento equivalente al 1.96% del precio en el año inicial. Por consiguiente, este valor podría considerarse, a falta de otras previsiones más particularizadas sobre un cierto caso de estudio, como valor central orientativo de la variación anual (en términos reales) del precio de la energía eléctrica consumida.

### 5.13. ESTIMACIÓN DE POSIBLES CAMBIOS EN OTROS COSTES MODALES

#### 5.13.1. *Bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional

En el caso de los nuevos modos de transporte público cuya potencial implantación se encuentra bajo estudio, además de las posibles ventajas o desventajas que estos puedan aportar al viajero en comparación con el autobús convencional en tráfico mixto en lo concerniente a los componentes del coste generalizado o atributos que van a ser expresamente contemplados en la formulación del modelo<sup>165</sup>, pueden existir mejoras en otros aspectos (generalmente más sutiles y de difícil cuantificación numérica objetiva) que sean valoradas positivamente por los potenciales usuarios del transporte público y que estén asociadas a estos nuevos modos (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT). A este tipo de características se les podría denominar ‘*soft factors*’, en contraposición con los atributos cuantitativos típicamente considerados (*hard factors*).

<sup>165</sup> Los componentes del coste generalizado del transporte público cuya posible variación entre escenarios va a ser incluida explícitamente en la formulación del modelo desarrollado responden a los siguientes atributos: tarifa desembolsada, tiempo de viaje a bordo del vehículo en condiciones base o estándar (tiempo objetivo), incremento del coste o desutilidad del tiempo de viaje a bordo por efecto del nivel de aglomeración o congestión de pasajeros en los vehículos, tiempo de espera en parada y deficiencias en la fiabilidad de horarios (propensión a retrasos).

En cualquier caso, las ganancias —o, en su caso, pérdidas— de utilidad que estas ventajas o desventajas comparativas ligadas a *'soft factors'* proporcionan al usuario no deberían ser obviadas en la valoración de beneficios para el viajero, ya que, además, pueden desempeñar un papel relevante en la determinación de la demanda captada por los nuevos modos de transporte público. Así pues, se introduce en el modelo una variable que intente recoger, de forma sintetizada, la valoración que los potenciales usuarios pueden realizar de este conjunto de ventajas o desventajas aportadas por cada uno de los nuevos modos —en relación con el autobús convencional preexistente— en el ámbito de los denominados *'soft factors'*. Esta variable toma la forma de un *bonus* modal asociado a los sistemas de metro ligero o tranvía y a los de BHLS o BRT con respecto al modo de referencia (autobús convencional en tráfico mixto). Este *bonus* modal, como se ha comentado, está destinado a valorar las diferencias entre cada uno de los nuevos sistemas y el modo de referencia en cuanto a aquellos atributos o características específicas de los modos de transporte público no contempladas explícitamente en la formulación del modelo.

En cuanto al tipo de cuestiones que podrían ser valoradas por los viajeros al margen de los atributos preponderantes o *'hard factors'*, se pueden incluir aspectos tan variados como el confort y estabilidad de marcha (ausencia de frenazos o aceleraciones bruscas, menores aceleraciones laterales, etc.), la seguridad viaria durante la circulación, la comodidad de los asientos, la posible disponibilidad de servicios complementarios a bordo de los vehículos (conexión inalámbrica a internet, enchufes, etc.), factores ambientales en el interior del vehículo (menor ruido, luminosidad, limpieza, temperatura controlada mediante climatización, etc.), la facilidad de uso del sistema de transporte (información disponible en internet, en paradas y a bordo del vehículo sobre la red, transbordos, posibles retrasos o incidencias en tiempo real, etc.), la mayor facilidad y comodidad de subida y bajada del vehículo mediante acceso a nivel en las estaciones o paradas (con piso bajo del vehículo y andén elevado)<sup>166</sup>, etc. También se puede considerar la valoración de aspectos de carácter psicológico, emocional o social, como el bienestar o satisfacción que puede sentir el usuario al estimar que está utilizando un medio de transporte más respetuoso con el medioambiente y con el entorno sociourbano (tracción eléctrica libre de emisiones atmosféricas in situ, mejor integración urbanística y paisajística, etc.) o la apreciación de la *'imagen de marca'* que el nuevo modo de transporte público proyecta hacia la sociedad.

En cierta medida, este *bonus* modal está relacionado con conceptos como el *'rail factor'* o el *'tram bonus'*, que son utilizados para referirse a un valor adicional —que se traduce en una preferencia intrínseca o inherente— que los viajeros asocian a los modos de tipo ferroviario en comparación con los sistemas basados en autobuses, a igualdad de nivel de servicio en cuanto a los atributos preponderantes o *'hard factors'*. Este tipo de concepto podría asimismo hacerse extensible al caso de los sistemas de tipo BHLS o BRT, en la medida en que estos sean percibidos más favorablemente por los viajeros que los sistemas convencionales de autobús en tráfico mixto, independientemente de las ventajas que aquellos puedan aportar a los usuarios en los atributos predominantes o *'hard factors'*. En los términos utilizados en los modelos de utilidad aleatoria, estos valores adicionales o preferencias intrínsecas se reflejarían en la existencia de constantes específicas de alternativa distintas entre sí para metro ligero o tranvía, para BHLS/BRT y para autobús convencional en tráfico mixto (esta última se podría igualar arbitrariamente a 0, al tomarse como referencia), habiendo adoptado coeficientes genéricos para los atributos principales del transporte público.

No obstante, la presencia y magnitud de estos *'rail factor'* o *'tram bonus'* no es una cuestión sobre la que exista un consenso generalizado en la literatura técnica que ha abordado este tema. Esta cuestión puede ser analizada desde diferentes enfoques metodológicos (Bunschoten, 2012: pp. 25-38; Anta, 2016: pp. 50-63), tales como el estudio de casos mediante comparación de datos tomados antes y después de la implantación del nuevo modo de transporte público, los meta-estudios (basados a su vez en un análisis sistemático de estudios anteriores), los estudios de percepciones basados en factores relativos a la psicología y el comportamiento humano, o los estudios basados en la modelización de la demanda,

<sup>166</sup> Esta característica puede resultar especialmente relevante para personas con dificultades de movilidad y para usuarios que transporten equipaje o lleven carritos de niño.

generalmente mediante la estimación de modelos de elección discreta (ya sea a través de preferencias reveladas, declaradas, o una combinación de ambas). Además, existe una elevada heterogeneidad en cuanto a las características concretas de los modos de transporte público que han sido comparados entre sí en este tipo de estudios (modos ferroviarios de alta capacidad, metro ligero o LRT, tranvía, BRT, autobús convencional, etc.), lo cual supone una dificultad añadida para la extracción de conclusiones generales.

Entre los estudios basados en la modelización de la demanda, se puede comenzar citando que Axhausen *et al.* (2001) encuentran una débil preferencia hacia las opciones ferroviarias (tranvía) en un estudio llevado a cabo en la ciudad alemana de Dresde. Por el contrario, Ben-Akiva y Morikawa (2002) no detectan una preferencia intrínseca hacia los modos ferroviarios (metro y ferrocarril de cercanías, frente a autobús) cuando se igualan atributos principales como el tiempo de viaje y el coste. Por su parte, en Jou *et al.* (2010) se observa, para la ciudad de Taipéi, una mayor propensión entre los viajeros de tipo *commuter* que sean usuarios habituales del transporte motorizado privado a cambiarse hacia un modo ferroviario de alta capacidad (MRT, *Mass Rapid Transit* de Taipéi) que hacia sistemas de autobús. Bunschoten (2012) abordó la determinación de la posible existencia de una valoración adicional de los viajeros hacia los modos de tipo tranvía frente al autobús (*tram bonus*) en varias ciudades de los Países Bajos mediante la realización de encuestas en preferencias declaradas, con cuyos datos se estimaron modelos de tipo logit multinomial (MNL) y logit mixto (ML). Los resultados apuntan a una preferencia media por el modo ferroviario, pero con una elevada dispersión entre individuos y con diferencias entre distintas ciudades. En este sentido, la preferencia por el tranvía aparece en las ciudades donde este tipo de modo está presente, probablemente por existir un mayor conocimiento y familiaridad con el mismo que en aquellas ciudades que no disponen de tranvía. Esto hace suponer que si se implanta este sistema en una nueva ciudad, la preferencia irá desarrollándose con el tiempo. Más recientemente, Anta (2016) estudia la posible existencia de una preferencia intrínseca hacia los modos ferroviarios (*rail factor*) en el ámbito de los sistemas de capacidad intermedia (metro ligero, LRT, frente a autobús de alto nivel de servicio, BHLS), mediante el desarrollo de encuestas en preferencias declaradas en varias ciudades españolas y francesas, dirigidas fundamentalmente a estudiantes universitarios como población objetivo. Con los datos recogidos se estiman distintos modelos de elección discreta, analizándose la capacidad explicativa de modelos logit multinomial (MNL), logit jerárquico/anidado (NL) y logit mixto (ML) sobre el comportamiento de los individuos de las diferentes muestras. Los resultados obtenidos indican una notable dependencia del contexto local, con una tendencia algo más favorable a los modos ferroviarios en el caso de las ciudades francesas y, por el contrario, más favorable al autobús en las ciudades españolas analizadas. Las conclusiones extraídas de este último estudio no permitirían por tanto afirmar que existiese un '*rail factor*' con validez general.

Entre los enfoques alternativos basados en percepciones o variables psicológicas, Beirão y Sarsfield-Cabral (2007) apuntan que los usuarios habituales de automóvil presentan una actitud más favorable al modo ferroviario (LRT) que a los sistemas de autobús. Sin embargo, los usuarios habituales de transporte público parecen prestar más atención a variables típicas del nivel de servicio como el coste o el tiempo de viaje. Por otra parte, Scherer (2011) trata de identificar diferencias en la imagen percibida de los modos tranvía y autobús mediante la aplicación de métodos de diferenciación semántica y análisis factorial. Para ello se realiza una encuesta en la que se solicita valorar en una escala Likert una serie de 22 características racionales y emocionales para cada uno de los dos modos. Sus resultados muestran que solamente para los usuarios habituales de transporte público se aprecia una diferencia significativa de valoración a favor del tranvía, mientras que para los usuarios ocasionales y los no usuarios dichas diferencias no resultan significativas. Posteriormente, Scherer y Dziekan (2012) analizan sendos estudios desarrollados en Suiza y Alemania con el objetivo de comprobar la posible existencia del '*rail factor*' y de clasificar los tipos de atribuciones (modos en los que los individuos perciben y valoran un producto o servicio) que explicarían su posible existencia. La investigación desarrollada identifica la existencia de un '*rail factor*' en los casos analizados, estando este altamente ligado a atribuciones de tipo emocional y social, que explicarían entre el 20% y el 50% de dicha preferencia.

En resumen, las referencias citadas ponen de manifiesto que no resulta posible establecer unas reglas o estándares que tengan una validez general en cuanto a la posible existencia, sentido y magnitud del valor adicional —comparativamente hablando— que los viajeros recibirían de los diferentes modos de transporte público analizados en la presente tesis (metro ligero o tranvía, BHLS o BRT y autobús convencional en tráfico mixto) si se fijase la hipótesis de un nivel de servicio equivalente en los atributos preponderantes o *'hard factors'*. Tal como se ha visto en la literatura referenciada, estas valoraciones presentan una elevada heterogeneidad (quizás favorecida también por las múltiples diferencias metodológicas) y, en todo caso, parecen depender fuertemente de características locales.

Por tanto, todos estos elementos conducen a la conveniencia de que los respectivos *bonus* modales asociados a los sistemas de metro ligero o tranvía y a los de BHLS o BRT con respecto al modo de referencia (autobús convencional en tráfico mixto) sean incorporados al modelo preferiblemente mediante un enfoque probabilístico, es decir, tomando la forma de variables aleatorias. Se adoptarán al respecto distribuciones triangulares de probabilidad, a caracterizar en cada caso mediante sus valores de mínimo, máximo y moda.

Una cuestión adicional a plantear es la forma específica en que este *bonus* modal debe ser incorporado a la formulación del modelo. En este sentido, se adopta el criterio de que sea aplicado como una constante (por cada viaje) expresada en forma de reducción equivalente de minutos generalizados de tiempo de viaje en el vehículo. Este criterio coincide, por ejemplo, con el indicado por Currie (2005) para el concepto denominado por este autor como factor específico de modo (*MSF, Mode Specific Factor*), que resulta prácticamente equivalente en su significado al *bonus* modal aquí definido. Además, la cuantificación en minutos generalizados de tiempo de viaje facilita la posible transferibilidad de valores entre estudios realizados en regiones o países con contextos socioeconómicos diferentes, minimizando las distorsiones introducidas por los efectos de renta que tendrían lugar si dichos valores se transfiriesen directamente en unidades monetarias. Será posteriormente, en el desarrollo del modelo, cuando se proceda a introducir la valoración monetizada de este *bonus* modal, al multiplicar estos minutos de reducción equivalente de tiempo de viaje por el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo de transporte público en condiciones base o estándar, cuyo valor medio habrá sido calculado a partir de los datos específicos definidos para el ámbito territorial objeto de estudio.

En conclusión, es preciso indicar, como datos de entrada aportados al modelo, los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle Bnsmin^m, Bnsmax^m, Bnsmod^m \rangle ; m \in \{R, B\}$$

donde  $Bnsmin^m$ ,  $Bnsmax^m$  y  $Bnsmod^m$  representan el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del *bonus* modal asociado a los sistemas de transporte público 'metro ligero o tranvía' (caso  $m=R$ ) y 'BHLS o BRT' (caso  $m=B$ ) con respecto al modo de referencia (autobús convencional en tráfico mixto), al objeto de recoger la valoración, por parte de los potenciales viajeros, de las diferencias entre cada uno de los nuevos sistemas y el modo de referencia en cuanto a aquellos atributos o características específicas de los modos de transporte público que no están explícitamente contempladas en la formulación del modelo.

Las unidades propuestas para expresar numéricamente en el modelo la cuantía de los parámetros referidos a estos *bonus* modales son minutos generalizados [min] de reducción equivalente del tiempo de viaje en el vehículo (valorado este en condiciones base o estándar). Nótese que el criterio de signos con el que se ha definido este *bonus* modal es tal que valores positivos del mismo significan una disminución relativa del coste generalizado de los nuevos modos de transporte público (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) con respecto al modo preexistente o de referencia (autobús convencional en tráfico mixto). Por tanto, valores positivos del *bonus* modal indican una mejor valoración de los nuevos modos por parte de los potenciales viajeros e, inversamente, valores negativos representarían una peor valoración de dichos modos.

Aunque, tal como se ha explicado previamente, no es posible generalizar la validez de unos determinados valores de *bonus* modal obtenidos en un determinado contexto o condiciones a cualesquiera otras circunstancias o ámbitos territoriales, conviene tener presente alguna referencia sobre la posible magnitud del mismo cuando este es obtenido en un marco metodológico que, en este aspecto particular, resulta compatible con el adoptado en la presente tesis. En este sentido, Bunschoten (2012) plantea obtener el valor del *bonus* modal asociado a los modos tranviarios (*tram bonus*) con respecto al autobús convencional como una constante específica de alternativa, con coeficientes genéricos para las siguientes variables del viaje en transporte público: tiempo de acceso (origen del viaje – parada de subida), frecuencia, tiempo de viaje en el vehículo, existencia de transbordo, tiempo de transbordo, y tiempo de dispersión a destino (parada de bajada – destino del viaje). Los datos de estimación proceden de encuestas *online* respondidas por habitantes de diversas ciudades holandesas (principalmente Ámsterdam, Róterdam y La Haya). Cuando los valores obtenidos para esta constante específica de alternativa se normalizan entre el coeficiente de la variable tiempo de viaje en el vehículo, los resultados indican que la preferencia por el modo tranviario equivale a 3.34 minutos de tiempo de viaje en el vehículo en el caso de la estimación realizada mediante un modelo logit multinomial (MNL), y a 3.22 minutos de media en el caso de aplicar un modelo logit mixto (ML). Estos valores corresponderían por tanto al *bonus* modal del modo tranvía (con respecto al autobús convencional) en el caso analizado por Bunschoten (2012: pp. 54-55, 64, 89). Por su parte, para los sistemas de tipo BHLS o BRT, si no se dispone de datos específicos en sentido contrario, podría tomarse simplemente como orientación que en muchos casos (pero no necesariamente en todos) su *bonus* modal se situaría dentro del intervalo entre un valor nulo (equivalente al autobús convencional de referencia) y el *bonus* modal asignado al sistema de metro ligero o tranvía, ya que aquellos suelen aglutinar características mixtas de una y otra clase de sistemas.

### 5.13.2. Evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo

Para incorporar la capacidad de tener en cuenta en el modelo la influencia de los potenciales cambios que puedan producirse, a lo largo del tiempo, en otros posibles costes de las opciones modales alternativas al uso del transporte público que sean diferentes de los costes contemplados expresamente en la modelización, se ha de introducir una nueva variable que recoja la variación, entre años consecutivos, prevista para dicho conjunto de posibles costes. Se trata de costes (o, más genéricamente, desutilidades expresadas cuantitativamente mediante unidades monetarias) que se consideran aplicados de forma externa con respecto a las capacidades de análisis del modelo desarrollado (es decir, costes exógenos al modelo), y que afectarían a los viajes realizados en las opciones modales distintas del transporte público<sup>167</sup>, ya sean estas mediante transporte motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor) o mediante alternativas no motorizadas o de ‘micromovilidad’ (peatonal y bicicleta o vehículos de movilidad personal).

En el caso de los modos de transporte motorizado privado, la potencial evolución de este tipo de costes estaría relacionada fundamentalmente con cambios en los costes de aparcamiento, posibles peajes urbanos o metropolitanos, o la implantación –por parte generalmente de las autoridades locales o regionales– de cualesquiera otras medidas destinadas a limitar el uso del vehículo motorizado privado en entornos urbanos.

Por otra parte, en el caso de los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’, este tipo de variaciones en los costes o desutilidades de la alternativa que están generadas por acciones externas al modelo son las únicas que se aplican en el cómputo de los cambios en el coste generalizado de dichas opciones modales, al no resultar viable incluir endógenamente en el modelo ningún otro tipo de cálculo al respecto. Entre los posibles factores de variación de esta clase de costes podría citarse, por ejemplo, la implantación en

<sup>167</sup> En el caso de los modos de transporte público, se asume que, bajo las condiciones de modelización planteadas para la comparación entre escenarios, todas las posibles variaciones o cambios en los componentes del coste generalizado para el usuario están incluidas expresamente en el modelo desarrollado, por lo que no se añade esta nueva variable.



un año determinado del horizonte o período de evaluación de carriles-bici que sigan el trayecto de alguno de los corredores o itinerarios analizados, ya que se traduciría, previsiblemente, en una disminución del coste generalizado de la opción de bicicleta y otros pequeños vehículos de movilidad personal, al reducirse los costes percibidos asociados a inseguridad vial, ruidos, etc., haciendo más agradable para el usuario de estos modos el tiempo transcurrido durante su viaje. Por su parte, la posible implantación de recorridos de preferencia peatonal, así como de medidas de calmado del tráfico, daría lugar a una reducción relativa del coste generalizado vinculado a los desplazamientos peatonales. En ambos casos, estos factores actuarían favoreciendo una mayor cuota de elección modal de las respectivas opciones.

En general, esta variable recogería fundamentalmente cambios en los costes que están asociados a decisiones sobre la política de transporte urbano y movilidad llevada a cabo por las administraciones públicas o autoridades competentes.

En cualquier caso, debe tenerse presente que la correspondiente variable ha de cuantificar las variaciones anuales de estos costes en términos reales, es decir, expresando los mismos en unidades monetarias constantes del año adoptado como referencia para el nivel general de precios.

Por otra parte, ha de tenerse en cuenta que, en cada caso particular, la determinación de valores para esta clase de variable está sujeta a múltiples fuentes de incertidumbre. Por un lado, sería preciso realizar pronósticos sobre el tipo de políticas de transporte urbano y movilidad que van a ser desarrolladas en el futuro por las administraciones competentes y, de ser posible, sobre las medidas concretas en que dichas políticas se van a materializar. Pero además, incluso aunque se conociesen estas medidas, la cuantificación de su incidencia en términos de costes generalizados puede resultar en muchos casos notablemente compleja e incierta.

En consecuencia, queda patente que la incorporación en el modelo de las variaciones anuales de estos costes modales de carácter exógeno requiere que estas sean tratadas como una variable aleatoria, para lo cual se establece un conjunto de distribuciones triangulares de probabilidad. Dado que cada una de estas distribuciones se especifica mediante su mínimo, máximo y moda, es preciso indicar, como datos a aportar al modelo, los valores previstos para los siguientes parámetros:

$$\langle \Delta Cexmin_{yijk}^m, \Delta Cexmax_{yijk}^m, \Delta Cexmod_{yijk}^m \rangle$$

con:

$$m \in \{C, M, V, P\} ; y = 1, 2, \dots, Y_{ap} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $\Delta Cexmin_{yijk}^m$ ,  $\Delta Cexmax_{yijk}^m$  y  $\Delta Cexmod_{yijk}^m$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación anual (en términos reales, es decir, valorada en unidades monetarias constantes) de otros posibles costes privados de la opción modal  $m$  (con  $m \in \{C, M, V, P\}$ ) que sean diferentes de los contemplados expresamente en la modelización, cuya aplicación estaría prevista para el año  $y$ <sup>168</sup> y afectaría a los viajes desarrollados sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Nótese que las variaciones en estos otros posibles componentes del coste generalizado se consideran aplicadas de forma exógena en relación con las capacidades de análisis del modelo, por lo que deben ser aportados como datos del mismo.

Las unidades a emplear en el modelo para la cuantificación numérica de los parámetros relativos a esta variable son unidades monetarias constantes [CU] por viaje. Las variaciones anuales referidas representan, por tanto, cambios (entre cada par de años consecutivos) en el coste medio por cada viajero.

<sup>168</sup> La variación aplicada en el año  $y$  debe entenderse como la diferencia entre los costes previstos para los años  $y$  e  $y-1$  (o, en su caso,  $y=1$  y el año base).

## 5.14. DATOS ADICIONALES PARA LA OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS $\lambda$ Y $\theta$ DEL MODELO DE DEMANDA

A continuación resulta preciso especificar adicionalmente un pequeño conjunto de datos que, en unión con aquellos otros relativos al año base, permiten el cálculo, calibración u obtención estimativa de los valores de los parámetros  $\lambda$  (parámetro de sensibilidad a las diferencias de coste generalizado de las alternativas en el reparto modal) y  $\theta$  (parámetro de ‘impedancia’, ‘fricción’ o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes), los cuales necesitan ser utilizados por la sección del modelo dedicada a la determinación de la demanda futura. Mayoritariamente estos datos adicionales hacen referencia a un año (o, en general, cualquier momento en el tiempo) anterior al propio año base, del cual se conozcan con una adecuada precisión los valores de las variables que a continuación se van a especificar. Aunque los datos pertenecientes a este año o momento previo de calibración se utilizan en el modelo exclusivamente para la obtención de valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$ , no se debe olvidar que estos parámetros juegan un papel de crucial importancia en la previsión del volumen de viajes en cada una de las opciones modales contempladas en el modelo, por lo que, en última instancia, estos datos adicionales desempeñan un papel crítico dentro del modelo. En conclusión, su importancia no debe ser en absoluto minusvalorada.

En general, sería preferible, en la práctica, que el año o momento previo utilizado como referencia para la calibración de parámetros de demanda se escogiese de tal modo que los valores de las variables concernientes a la cuota de reparto modal del transporte público no fuesen excesivamente similares a los datos homólogos correspondientes al año base, así como que los cambios en los costes generalizados de las distintas opciones modales (entre el año o momento previo de referencia para la calibración y el año base) no presenten todos ellos valores muy próximos a cero (especialmente en el caso del modo de transporte público). Se trataría de evitar de esta forma, en la medida de lo posible, que pequeñas oscilaciones o errores de medida en los valores de dichas variables cobren un peso muy relevante en la obtención de valores numéricos para los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$ .

La obtención de valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  del modelo de demanda se realizará de manera particularizada para los datos característicos del corredor, eje o itinerario servido por cada línea ( $i$ ), para cada uno de sus períodos horarios ( $j$ ) y para cada sentido de viaje ( $k$ ). Por otra parte, nótese que entre las variables que constituyen el conjunto de datos adicionales para la obtención de estos parámetros hay algunas para las cuales se considera que se puede adoptar un único valor fijo suficientemente fiable (es decir, se asume un enfoque de estilo determinista), y otras para las cuales, debido a su difícil estimación cuantitativa, resulta más adecuado indicar una posible función de distribución de probabilidad (enfoque de tipo aleatorio). Esta última clase de variables, al ser introducidas en las simulaciones propias del método de Montecarlo, provocan que el cálculo de los parámetros  $\lambda_{ijk}$  y  $\theta_{ijk}$  conduzca a resultados diferentes ( $\lambda_{rjk}$  y  $\theta_{rjk}$ ) en cada una de dichas simulaciones aleatorias ( $r$ ), de tal modo que el conjunto de valores obtenido para cada uno de dichos parámetros refleja, a su vez, una cierta distribución de probabilidad para el parámetro en cuestión.

En conclusión, se indica a continuación cuál es, dada la estructura del modelo planteado, el conjunto mínimo de datos necesarios para el cálculo de valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$ .

### 5.14.1. Proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

La variable  $Pcp^{ijk}$  indica la fracción o proporción de viajes realizados en transporte público por parte de usuarios cautivos del mismo con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo (mediante cualquiera de las cinco opciones modales contempladas) sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido de viaje  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i=LT \vee TypL_i=RT$ ;  $k=1$  si  $TypL_i=RO$ ), en el momento

correspondiente al año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros. Se trata de un dato de tipo adimensional, cuyo valor de entrada en el modelo ha de ser expresado en forma de proporción decimal.

Obsérvese, por tanto, que esta variable está estrechamente ligada, en cuanto a su significado, a  $Pcp^*_{ijk}$ , pero con la diferencia de que ambas están referidas a distintos momentos en el tiempo.

#### 5.14.2. Proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

La variable  $Pco^m_{ijk}$  señala la fracción o proporción que los viajes realizados por viajeros que puedan ser considerados cautivos del modo  $m$  de transporte privado o individual (es decir,  $m \in \{C, M, V, P\}$ ) representaban con respecto al conjunto general de desplazamientos efectuados (en cualquiera de las cinco opciones modales contempladas) sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ), en el momento del año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros. Al igual que en la variable anterior, estos datos son de tipo adimensional, debiendo ser introducidos sus valores numéricos en el modelo en forma de proporción decimal.

Esta variable se corresponde, en cuanto a su significado genérico, con  $Pco^*m_{ijk}$ , pero con la diferencia nuevamente de estar referidas una y otra a distintos momentos en el tiempo. Recuérdese asimismo que los datos introducidos deben satisfacer necesariamente, para cualquier posible combinación de índices  $i, j, k$ , la siguiente condición:  $Pcp^*_{ijk} + Pco^C_{ijk} + Pco^M_{ijk} + Pco^V_{ijk} + Pco^P_{ijk} < 1$ .

#### 5.14.3. Cuota modal del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

La variable  $MS^0_{ijk}$  indica la cuota de reparto modal general que, de acuerdo a los datos pertenecientes al año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros, correspondía al modo de transporte público preexistente (autobús convencional,  $m=0$ ) para el caso de aquellos viajes efectuados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  (con  $i = 1, 2, \dots, NL$ ), durante el período horario  $j$  (con  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$ ) y en el sentido  $k$  (donde  $k = 1, 2$  si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RT$ ;  $k = 1$  si  $TypL_i = RO$ ). Este dato adimensional debe introducirse numéricamente en el modelo como proporción decimal.

Esta variable equivale, en su significado genérico, a  $MS^*0_{ijk}$ , aunque debe tenerse en cuenta obviamente que ambas se refieren a diferentes momentos en el tiempo. Recuérdese al respecto que las cuotas de reparto modal general a las que aluden estas variables se cuantifican sobre el conjunto de viajes llevados a cabo en todas las opciones modales contempladas, con independencia de que el individuo que realiza el viaje sea un usuario cautivo de un determinado modo o un viajero con capacidad de elección entre alternativas (no cautivo). Asimismo, debe cumplirse por definición que la cuota de reparto modal general  $MS^0_{ijk}$  perteneciente al modo de transporte público (autobús convencional en estos casos) sea mayor que la fracción o proporción que los viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público constituyen con respecto al conjunto total de desplazamientos llevados a cabo, es decir:  $MS^0_{ijk} > Pcp^*_{ijk}$ .

#### 5.14.4. Variación media por viajero, entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, del coste generalizado de las opciones modales de transporte

Los cambios o variaciones en el coste o precio generalizado de las distintas opciones modales de transporte constituyen, en el modelo, el factor que determina las modificaciones en las cuotas de reparto modal no cautivo entre el grupo de viajeros con capacidad de escoger diferentes alternativas. Estas modificaciones en las cuotas de reparto modal no cautivo, junto con los posibles cambios en las proporciones del total de viajes que corresponden a viajeros cautivos de cada modo, conducen a su vez a variaciones en las cuotas de reparto modal general.

En consecuencia, la estimación cuantitativa de los cambios medios por viajero en los costes generalizados de las diferentes opciones modales entre el año previo de referencia y el año base desempeña un papel clave en el cálculo de valores para el parámetro  $\lambda$  (y subsecuentemente también para  $\theta$ ), ya que la magnitud y signo de dichos cambios están directamente vinculados a las correspondientes modificaciones en el reparto modal de la demanda.

Por tanto, es necesario aportar al modelo una valoración cuantitativa de los cambios observados en los costes generalizados de las distintas opciones modales, incluyendo todos aquellos elementos o componentes que puedan considerarse incluidos dentro de dicha medida (independientemente de que tales componentes sean tratados posteriormente por el modelo predictivo como un elemento endógeno o exógeno).

En el caso de la cuantificación de las variaciones observadas en el coste generalizado de la opción modal de transporte público (autobús convencional) se pueden destacar, como algunas de las principales fuentes potenciales de cambios en dicho coste por viajero<sup>169</sup>: posibles modificaciones en las tarifas; posibles cambios en el coste asociado al tiempo transcurrido a bordo del vehículo de transporte público; posibles incrementos relativos de este coste por efecto del nivel de aglomeración o congestión de pasajeros sufrido en los vehículos; posibles cambios en el coste experimentado a causa del tiempo de espera en parada; posibles modificaciones en el coste vinculado a deficiencias en la fiabilidad de horarios del transporte público; posibles variaciones en otros costes como los incurridos en los tramos o etapas de acceso a la línea de transporte público (origen del viaje – parada de subida) y en la etapa de dispersión hacia destino (parada de bajada – destino del viaje), incluyendo, en su caso, posibles modificaciones en el número o duración de los transbordos; etc.

Para los modos de transporte motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor), los cambios observados en los costes generalizados de dichas opciones modales pueden estar motivados principalmente por alguna de las siguientes componentes de coste<sup>170</sup>: el coste debido al tiempo medio de viaje consumido a bordo del vehículo motorizado privado, incluyendo posibles incrementos relativos por efecto de la congestión viaria experimentada; el coste asociado a la irregularidad, variabilidad o incertidumbre (falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de viaje; el coste privado originado por el consumo energético del vehículo (combustible y/o energía eléctrica); otros costes (exógenos con respecto al modelo predictivo) aplicados sobre la utilización de cada uno de estos modos de transporte motorizado privado, tales como precios de aparcamiento, posible peajes, etc.

La cuantificación más compleja e incierta es posiblemente la que afectaría a los cambios —si los hubiera habido— en los costes generalizados asociados a las opciones modales no motorizadas y de ‘micromovilidad’ (peatonal, y bicicleta o vehículos de movilidad personal). Este tipo de cambios (que son tratados como una variable totalmente exógena en lo que respecta al modelo predictivo) podrían haber sido generados, por ejemplo, por la puesta en servicio de carriles-bici en el entorno de los corredores o itinerarios analizados (que previsiblemente se traduciría en una reducción del coste generalizado percibido por los usuarios de la opción de bicicleta y vehículos de movilidad personal), o por la

<sup>169</sup> Véase también, con mayor detalle, el epígrafe 8.3.6.

<sup>170</sup> Véase también el epígrafe 8.3.8.1.

implantación de recorridos de preferencia peatonal (que daría lugar a una cierta disminución del coste generalizado percibido por aquellos que realicen su viaje a pie). Un posible aumento/disminución de los niveles de tráfico motorizado también sería susceptible de propiciar, respectivamente, un relativo incremento/reducción de los costes generalizados experimentados por los usuarios de las opciones modales no motorizadas y de ‘micromovilidad’.

En cualquier caso, ha de tenerse presente que la cuantificación de los posibles cambios observados en los costes generalizados de las opciones modales ha de efectuarse para el modelo en términos de valor real, utilizando por tanto para ello unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios).

Por otra parte, se hace patente que la medición y valoración cuantitativa, en términos monetarios, de todas estas posibles variaciones en los costes generalizados, debido a la complejidad de los factores implicados y a la probable carencia de conocimiento suficientemente preciso sobre todos ellos, no está en absoluto exenta de potenciales fuentes de incertidumbre e inexactitud. Consecuentemente, resulta más adecuado recurrir a la utilización de un enfoque en el que el valor estimado de dichos cambios en los costes modales pueda ser tratado como una variable aleatoria que responda a una determinada distribución de probabilidad. En consonancia con el criterio general del modelo desarrollado se adoptan distribuciones triangulares, definidas en cada caso mediante parámetros (mínimo, máximo y moda) que tomen valores específicos para cada corredor o itinerario servido por una determinada línea, para cada período horario y para cada sentido de viaje. Por tanto es necesario indicar, como datos aportados al modelo, los valores de los siguientes grupos de parámetros:

$$\langle \Phi GCmin_{ijk}^m, \Phi GCmax_{ijk}^m, \Phi GCmod_{ijk}^m \rangle$$

$$\text{con: } m \in \{0, C, M, V, P\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $\Phi GCmin_{ijk}^m$ ,  $\Phi GCmax_{ijk}^m$  y  $\Phi GCmod_{ijk}^m$  el mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad (triangular) de la variación observada, desde el año previo de referencia empleado para la calibración de parámetros hasta el año base, en el coste o precio generalizado medio por viajero asumido por los usuarios de la opción modal  $m$  de transporte, para el caso de los viajes llevados a cabo sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . De acuerdo a su significado, estos valores numéricos se introducen en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] por viaje.

#### 5.14.5. Ratio o cociente entre los parámetros $\theta$ y $\lambda$ del modelo de demanda

Tal como se había señalado previamente en los epígrafes 4.4.2 y 4.4.3.2, en el desarrollo e implementación práctica del modelo se opta por un enfoque simplificado para la obtención de valores estimativos del parámetro  $\theta$  de resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes (también conocido como parámetro de ‘impedancia’ o de ‘fricción’). Según este enfoque simplificado, los valores dados al parámetro  $\theta$  se determinarán en cada caso como una parte fraccional (comprendida entre 0 y 1) del valor obtenido para el parámetro  $\lambda$ , dado que por compatibilidad con la teoría del comportamiento de elección racional ha de cumplirse necesariamente  $0 < \theta \leq \lambda$  (Williams, 1977; Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 213). Esta restricción teórica implica por tanto que el ratio o cociente  $\theta/\lambda$  ha de estar siempre acotado entre 0 y 1<sup>171</sup>. Este carácter acotado facilita que se tome por conveniencia práctica dicho ratio o cociente

<sup>171</sup> Esta restricción de valores correctos entre 0 y 1 se relaciona con la que en el caso de los modelos de elección discreta de tipo logit jerárquico o anidado (HL/NL) afecta al ratio entre los factores de escala de dos niveles jerárquicos sucesivos tomados en orden descendente (véase en Ortúzar y Willumsen (2011: pp. 235-241), donde el parámetro denotado como  $\phi$  corresponde a dicho ratio y  $\beta$  designa el parámetro que en esta tesis se representa como  $\theta$ ). Atendiendo a este paralelismo, en el caso del modelo desarrollado el nivel superior incumbiría la decisión de realizar o no un viaje dentro del área de influencia de la línea analizada y el nivel inferior correspondería, en caso afirmativo, a la elección del modo de transporte para dicho viaje.

(que también puede ser interpretado como un factor de proporcionalidad de  $\theta_{ijk}$  con respecto a  $\lambda_{ijk}$ ) como la variable de entrada o dato que permitirá obtener los valores estimativos del parámetro  $\theta$  (a partir del respectivo valor efectivamente calculado para el parámetro  $\lambda$ ).

Así pues, en este punto procedería especificar, por parte del analista, los valores dados en cada caso al ratio o cociente  $\theta/\lambda$ . Aunque posteriormente se ofrecerán algunas indicaciones básicas o tendencias generales en cuanto a los posibles valores de dicho cociente, se hace evidente que, al basar en todo caso la elección cuantitativa de los mismos en criterios cualitativos poco específicos, resulta mucho más adecuado utilizar en el modelo un enfoque capaz de incorporar los importantes niveles de incertidumbre que se puedan generar en torno a esta cuestión. Por consiguiente, el valor del ratio o cociente entre los parámetros de demanda  $\theta$  y  $\lambda$  recibe en el modelo el tratamiento de variable aleatoria, proponiéndose al respecto distribuciones triangulares de probabilidad susceptibles de adoptar valores específicos de sus parámetros particulares (mínimo, máximo y moda) para cada corredor o itinerario servido por una determinada línea, para cada período horario y para cada sentido de viaje. Así pues, se deben indicar a criterio del analista, como datos del modelo, los valores de los siguientes grupos de parámetros adimensionales:

$$\langle RDPmin_{ijk}, RDPmax_{ijk}, RDPmod_{ijk} \rangle$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

siendo  $RDPmin_{ijk}$ ,  $RDPmax_{ijk}$  y  $RDPmod_{ijk}$  el mínimo, el máximo y la moda de la distribución de probabilidad (triangular) del ratio o cociente entre los parámetros de demanda  $\theta$  (parámetro de resistencia, ‘impedancia’ o ‘fricción’ al coste compuesto en la distribución de viajes) y  $\lambda$  (parámetro de sensibilidad del reparto modal a las diferencias en el coste generalizado de las opciones o alternativas), dadas las características de los viajes realizados sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Obsérvese que, por consistencia metodológica, han de respetarse siempre las siguientes limitaciones:  $RDPmin_{ijk} \geq 0 \wedge RDPmax_{ijk} \leq 1$ .

En general, la movilidad personal o transporte de viajeros, como actividad intermedia que es, sirve para posibilitar que los individuos realicen actividades presenciales en lugares distintos a aquel en el que se encuentren físicamente en un determinado momento. Estas actividades presenciales son, por tanto, las actividades finalistas que motivan la potencial realización del viaje. Así pues, según el tipo de actividades finalistas a desarrollar en el punto de atracción del viaje, los desplazamientos efectuados pueden ser clasificados, de una forma bastante básica, entre aquellos que responden a la realización de actividades de carácter obligatorio o necesario (movilidad obligada) y aquellos otros que están relacionados con actividades que, o bien son relativamente prescindibles, o bien podrían ser satisfechas en otros destinos alternativos que conllevaran un menor coste de viaje (movilidad no obligada, facultativa o discrecional). Esta diferenciación resulta de especial interés debido al distinto comportamiento de uno y otro tipo de desplazamientos ante los posibles cambios o variaciones en el coste (compuesto) o desutilidad esperada del viaje, ya que generalmente se asume que —a igualdad de cualquier otro factor— el volumen o número de viajes que se realizan por actividades o motivos obligatorios (movilidad obligada) es menos elástico con respecto a dichos cambios que en el caso de aquellos desplazamientos que corresponden a movilidad no obligada o facultativa. En términos del modelo planteado, estas diferencias de comportamiento se traducirían en distintos valores del ratio o cociente  $\theta/\lambda$  según las fracciones del conjunto general de viajes que se efectúen por movilidad obligada y por movilidad facultativa (de acuerdo a la premisa anterior, el valor de  $\theta/\lambda$  sería sensiblemente menor para los viajes realizados por motivos o actividades obligatorias que en el caso opuesto).

Así pues, desde un punto de vista práctico conviene plantear una relación —al menos a nivel cualitativo— entre la segmentación de la demanda de movilidad por tipos de viaje realizada en el epígrafe 5.8.4

(viajes de negocios o comerciales en tiempo de trabajo remunerado, viajes de tipo *commuting*, y viajes de la categoría genérica ‘otros’) y los posibles valores que presuntamente pueda asumir el ratio o cociente  $\theta/\lambda$ . Tal como ya se indicaba en el epígrafe 5.8.4, puede señalarse que la práctica totalidad de los desplazamientos clasificados como viajes de negocios o comerciales (es decir, viajes en tiempo de trabajo remunerado) se encuadrarían dentro de la movilidad obligada. Además, una amplia mayoría de los viajes de tipo *commuting* corresponderían normalmente también a movilidad obligada. Por su parte, es previsible que entre los viajes de la categoría ‘otros’ predominen los desplazamientos por movilidad no obligada o facultativa (ocio, compras no cotidianas, etc.), si bien es cierto que en ocasiones puede existir dentro de esta categoría una parte significativa de viajes que se encuadrarían más adecuadamente dentro del grupo de movilidad obligada (compras de productos básicos, desplazamientos a centros sanitarios, etc.). Por tanto, a grandes rasgos puede apuntarse que el valor del ratio o cociente  $\theta/\lambda$  tenderá a ser comparativamente menor en aquellos casos en los que exista una alta proporción de viajes de tipo *commuting* y de viajes de negocios o comerciales en tiempo de trabajo remunerado. Por el contrario, es esperable que el valor de  $\theta/\lambda$  tienda a ser comparativamente mayor a medida que la proporción de viajes de la categoría de ‘otros’ (ocio, compras, etc.) sea más elevada.

En resumen, conviene tener muy en cuenta la composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje indicada en el epígrafe 5.8.4 a la hora de seleccionar los posibles valores del mínimo, máximo y moda de la distribución de probabilidad del ratio o razón entre los parámetros  $\theta_{ijk}$  y  $\lambda_{ijk}$  del modelo de demanda, ya que ambas clases de datos presentarían generalmente un notable grado de interrelación, tal como se ha expuesto en el párrafo anterior.

## 5.15. PARÁMETROS NUMÉRICOS RELATIVOS A LA EJECUCIÓN DEL MODELO

### 5.15.1. Número de simulaciones aleatorias a ejecutar

La variable  $Nrs$  indica el número de simulaciones aleatorias del modelo que, en aplicación del método de Montecarlo, se realizarán agrupadamente.

### 5.15.2. Parámetros numéricos concernientes a la convergencia de las iteraciones

A continuación se definen, de forma relativamente sucinta, tres variables adicionales ( $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_q$  y  $\psi$ ) que actúan exclusivamente como parámetros numéricos encargados de controlar o regular diferentes aspectos concernientes a los procedimientos iterativos de cálculo utilizados en los módulos M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3. Para una comprensión más profunda del significado de estas tres variables se puede remitir al lector al epígrafe 8.4, donde es posible observar detalladamente las funciones desempeñadas por las mismas.

#### 5.15.2.1. Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo de las cuotas de reparto modal general

En los módulos de cálculo del modelo que operan a través de procedimientos de tipo iterativo (es decir, M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3), la variable  $\varepsilon_s$  regula la tolerancia (establecida en niveles absolutos) adoptada para la magnitud del avance o acercamiento (en valor absoluto) entre el resultado (*output*) obtenido para las cuotas de reparto modal general de cada una de las opciones modales en una determinada iteración y el valor de entrada (*input*) de esas mismas cuotas de reparto modal general en dicha iteración, a fin de determinar si se ha producido la convergencia del método iterativo a una solución suficientemente satisfactoria. Así pues, esta variable controla (junto con  $\varepsilon_q$ ) el nivel de precisión exigido a las soluciones (aproximadas) obtenidas en las sucesivas iteraciones para poder ser aceptadas como definitivas.

Al estar definida en niveles absolutos, la variable  $\varepsilon_s$  ha de presentar las mismas dimensiones que las propias cuotas de reparto modal general, de tal modo que es adimensional y debe ser expresada en el modelo como proporción decimal.

### 5.15.2.2. Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales

En los módulos de cálculo del modelo de naturaleza iterativa (M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3), la variable  $\varepsilon_Q$  controla la tolerancia (establecida en niveles absolutos) adoptada para la magnitud del avance o acercamiento (en valor absoluto) entre el resultado (*output*) obtenido para el volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales en una determinada iteración y el valor de entrada (*input*) de ese mismo volumen de viajes en la susodicha iteración, a fin de establecer si ha tenido lugar la convergencia del método iterativo a una solución considerada suficientemente satisfactoria. Por tanto,  $\varepsilon_Q$  regula (junto con  $\varepsilon_s$ ) el nivel de precisión que es requerido para que las soluciones (aproximadas) obtenidas en las sucesivas iteraciones puedan ser aceptadas como válidas.

Al estar definida en niveles absolutos, la variable  $\varepsilon_Q$  debe presentar las mismas dimensiones que los propios volúmenes totales de viajes por hora. Consecuentemente, sus unidades de entrada en el modelo se definen como personas (viajes) por hora [prs/h], por cada uno de los posibles sentidos de viaje.

### 5.15.2.3. Coeficiente de avance relativo entre iteraciones

En relación con los módulos de cálculo del modelo que utilizan procedimientos de tipo iterativo, la variable  $\psi$  representa un coeficiente de ponderación que regula la formación de los valores de entrada (*inputs*) utilizados por una determinada iteración distinta de la inicial para las cuotas de reparto modal general y el volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, a partir de la combinación ponderada de los pertinentes resultados (*outputs*) y valores de entrada (*inputs*) de la iteración inmediatamente anterior, que reciben respectivamente los pesos  $\psi$  y  $1-\psi$  (véase la formación detallada de dichos '*inputs*' en las ecuaciones 8.25.a, 8.25.b, 8.91.a y 8.91.b).

Este coeficiente adimensional ha de estar por definición comprendido siempre entre 0 y 1 ( $0 < \psi \leq 1$ ). Valores de  $\psi$  próximos a 1 tienden a proporcionar una convergencia más rápida hacia la solución definitiva, pero pueden incrementar el riesgo de inestabilidades en el método iterativo. Por el contrario, valores menores implican un avance más lento, pero parecen conllevar una mayor estabilidad en el proceso iterativo de búsqueda de una solución válida. De ahí que se haya denominado a esta variable coeficiente de avance relativo entre iteraciones.



## 6. Aleatorización de las simulaciones del modelo

### 6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se preparan los procesos destinados a la aleatorización estadística de las simulaciones del modelo, constituyendo por tanto la fase inicial de la aplicación del método de Montecarlo como procedimiento de tratamiento de la incertidumbre.

Para este fin resulta conveniente introducir en primer lugar (epígrafe 6.2) algunos desarrollos teóricos relacionados con la obtención de distribuciones triangulares simétricas como suma de dos variables aleatorias independientes con distribución uniforme sobre intervalos de igual anchura, incluyendo posteriormente el análisis de las correlaciones existentes entre las variables resultantes cuando una de las variables aleatorias que actúan como sumando es un elemento común en varias de estas posibles sumas de dos variables. También se han de definir, de cara a su posterior utilización a lo largo del modelo, ciertas funciones de transformación entre los valores extraídos de una variable aleatoria inicial de distribución conocida y los de otra variable final para la cual se deseen obtener, mediante dicha transformación, valores aleatorios que se ajusten a la distribución que se requiera para esta última variable. En concreto, en el caso del modelo desarrollado se han de definir, por un lado, una función de transformación de valores desde una variable con distribución uniforme a otra variable con distribución triangular, y, por otra parte, una función de transformación entre dos variables con distribuciones triangulares de diferentes parámetros.

A continuación, para el proceso propiamente dicho de aleatorización estadística de las simulaciones del modelo debe distinguirse, por una parte, la aleatorización directa de aquellos datos o variables de entrada sujetos a incertidumbre (epígrafe 6.3) y, por otro lado, la aleatorización primigenia o inicial de ciertas funciones o variables de cálculo del modelo que se consideran sometidas a una considerable incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización (epígrafe 6.4). En el primer caso, la aleatorización de las variables de entrada se completa en base a los parámetros de sus respectivas distribuciones de probabilidad, previamente especificados en el Capítulo 5. En el segundo caso, el proceso de aleatorización inicial o primigenia se materializa mediante la generación de variables aleatorias auxiliares y la extracción de valores de las mismas, los cuales son reservados para su posterior empleo —en el Capítulo 8— por parte de las funciones de cálculo del modelo sujetas a incertidumbre metodológica.

Además, a lo largo de todo este proceso de aleatorización han de ser previstas e incorporadas a la modelización las probables correlaciones entre variables, tanto si se definen como variables aleatorias distintas pero previsiblemente correlacionadas entre sí como si se trata de valores aleatorios de una misma variable correspondientes a alguna característica en común (por ejemplo, mismo corredor, eje o itinerario, mismo período horario, mismo sentido de viaje, misma opción modal de transporte, etc.).

## 6.2. BASES O FUNDAMENTOS TEÓRICO-PRÁCTICOS

### 6.2.1. Distribución triangular simétrica como suma de dos variables aleatorias independientes con distribución uniforme sobre intervalos de igual anchura

#### 6.2.1.1. Caso general

Una propiedad general y bien conocida, de notable utilidad a lo largo del desarrollo posterior de los procedimientos de aleatorización llevados a cabo en el modelo propuesto, consiste en que cualquier variable aleatoria obtenida como suma de otras dos variables aleatorias independientes entre sí y uniformemente distribuidas con dominio o soporte definido sobre intervalos de la misma anchura presenta una distribución triangular simétrica. Los parámetros característicos de esta distribución triangular son tales que su valor mínimo es la suma de los límites inferiores de los intervalos sobre los que se define cada una de las distribuciones uniformes, su valor máximo es la suma de los límites superiores de dichos intervalos, y su moda es la semisuma de los valores mínimo y máximo (o, dicho de otro modo, la suma de los cuatro límites de los intervalos de las distribuciones uniformes dividida entre dos). Por tanto, bajo las condiciones indicadas, se cumple la siguiente propiedad <sup>172</sup>:

$$\left. \begin{array}{l} X \sim U(a_X, b_X) \\ Y \sim U(a_Y, b_Y) \\ b_X - a_X = b_Y - a_Y \\ X, Y \text{ indep.} \end{array} \right\} \Rightarrow X+Y=Z / Z \sim \text{TR}(z_{\min}, z_{\max}, z_{\text{mod}}), \text{ siendo: } \begin{cases} z_{\min} = a_X + a_Y \\ z_{\max} = b_X + b_Y \\ z_{\text{mod}} = \frac{a_X + a_Y + b_X + b_Y}{2} \end{cases} \quad (6.1)$$

donde  $U(a,b)$  denota una distribución uniforme continua cuyo dominio o soporte es el intervalo  $(a,b)$ , mientras que se define la notación  $\text{TR}(c,d,e)$  para representar cualquier distribución triangular genérica cuyos parámetros característicos fuesen, por este mismo orden, el mínimo  $(c)$ , el máximo  $(d)$ , y la moda  $(e)$ .

#### 6.2.1.2. Caso particular: semisuma de dos variables con distribuciones uniformes estándar

En el caso particular en el que las dos variables independientes  $X$  e  $Y$  de la ecuación 6.1 sean variables aleatorias con distribuciones uniformes estándar, es decir, definidas sobre el intervalo  $(0,1)$ , su media aritmética o semisuma  $(X+Y/2)$  constituye una variable aleatoria cuya distribución triangular (simétrica) tiene un valor mínimo igual a 0, un máximo igual a 1 y una moda de valor  $1/2$ . Esta propiedad puede obtenerse directamente a partir de la ecuación 6.1 con  $a_X=a_Y=0$  y  $b_X=b_Y=1$ , así como teniendo en cuenta que si  $V$  es una variable aleatoria con distribución triangular de parámetros  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  y  $v_{\text{mod}}$ , la variable resultante de multiplicarla por un escalar positivo  $k$  ( $k=1/2$  en este caso) presenta otra distribución triangular con parámetros  $k \cdot v_{\min}$ ,  $k \cdot v_{\max}$  y  $k \cdot v_{\text{mod}}$ . En resumen:

$$\left. \begin{array}{l} X \sim U(0,1) \\ Y \sim U(0,1) \\ X, Y \text{ indep.} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{X+Y}{2} = Z / Z \sim \text{TR}(0, 1, 0.5) \quad (6.2)$$

<sup>172</sup> En origen, esta propiedad se fundamenta en que la función de densidad de probabilidad de la variable  $Z$  (siendo  $Z=X+Y$ ) puede obtenerse como la convolución de las funciones de densidad de las dos variables aleatorias independientes  $X$  e  $Y$  (es decir,  $f_X * f_Y$ ).

## 6.2.2. Transformación de valores entre dos distribuciones aleatorias distintas

### 6.2.2.1. Método de transformación basado en la función inversa de la distribución acumulada

En no pocas ocasiones puede resultar de interés extraer valores que correspondan a algún tipo de distribución que sea distinta de las directamente implementadas en los generadores computacionales de números pseudoaleatorios<sup>173</sup> (siendo estas, habitualmente, la distribución uniforme estándar y la distribución normal estándar, como mínimo). Para ello existen en general diversos métodos de transformación de valores, siendo uno de los más sencillos y útiles el método basado en la función inversa de la distribución acumulada (véase, por ejemplo, en Gentle (2003: pp. 102-109)). Este método suele ser particularmente simple cuando las dos variables aleatorias implicadas son continuas y corresponden a algún tipo de distribución cuya función de distribución acumulada tenga forma analítica explícita. En la práctica, es frecuente encontrar su uso a partir de una distribución uniforme estándar (véase, por ejemplo, Train (2009: pp. 206-207)), pero la versatilidad de este método permite aplicarlo también a la transformación de valores aleatorios que se ajusten a otros tipos de distribuciones.

Supóngase por tanto una variable aleatoria inicial  $X$ , de distribución conocida, para la cual se dispone de un conjunto de extracciones aleatorias, y otra variable aleatoria  $Y$  de la cual se desean obtener valores aleatorios que se ajusten a la distribución requerida. En su enfoque más general, el método se fundamenta en que a cada valor  $x$  extraído de la distribución aleatoria inicial o de partida se le ha de asignar, mediante la correspondiente función de transformación, un valor  $y$  de la distribución aleatoria final o de destino tal que  $x$  e  $y$  tomen el mismo valor en sus respectivas funciones de distribución acumulada. Es decir,  $y$  es el valor imagen de  $x$  si la probabilidad de que la variable aleatoria  $Y$  sea menor (o igual) que el valor  $y$  coincide con la probabilidad de que la variable aleatoria  $X$  sea menor (o igual) que el valor  $x$ . Por tanto, se ha de imponer la siguiente condición:

$$\Pr(Y \leq y) = \Pr(X \leq x) \Rightarrow F_Y(y) = F_X(x) \quad (6.3.a)$$

donde  $F_X$  y  $F_Y$  representan las respectivas funciones de distribución acumulada de las variables  $X$  e  $Y$ .

A continuación, aplicando la función inversa de la distribución acumulada de  $Y$  (es decir,  $F_Y^{-1}$ ) a ambos lados de la segunda igualdad de la ecuación 6.3.a se obtiene:

$$F_Y^{-1}(F_Y(y)) = F_Y^{-1}(F_X(x)) \Rightarrow y = F_Y^{-1}(F_X(x)) \quad (6.3.b)$$

La ecuación 6.3.b (véase una expresión equivalente en Gentle (2003: p. 103)) constituye la formulación genérica del método de transformación de valores aleatorios basado en la función inversa de la distribución acumulada.

### 6.2.2.2. Transformación de valores desde una distribución uniforme a una distribución triangular

#### 6.2.2.2.a. Caso general

A continuación se reelabora y desarrolla en esta tesis la aplicación del método de transformación de valores basado en la función inversa de la distribución acumulada al caso en el que la variable aleatoria inicial ( $X$ ) corresponda a una distribución uniforme (en principio genérica, no necesariamente estándar) y la variable aleatoria transformada ( $Y$ ) deba representar una distribución triangular de parámetros dados.

---

<sup>173</sup> En sentido estricto, los números obtenidos de estos generadores computacionales no son puramente aleatorios, sino que se obtienen a partir de ciertos algoritmos que simulan dicha aleatoriedad. De ahí el nombre de números pseudoaleatorios.

Por tanto, considérese ahora que la variable aleatoria inicial  $X$  responde a una distribución uniforme genérica, con soporte o dominio en un intervalo  $(a_x, b_x)$ , y que se desea que los valores  $y$  (a obtener por transformación de cada valor  $x$  extraído de dicha distribución uniforme) formen una determinada distribución triangular, definida mediante sus parámetros de mínimo ( $y_{min}$ ), máximo ( $y_{max}$ ) y moda ( $y_{mod}$ ). Se parte por tanto de la siguiente situación:

$$X \sim U(a_x, b_x) \longrightarrow F_X(x) = \frac{x - a_x}{b_x - a_x} \quad \forall x \in (a_x, b_x) \quad (6.4.a)$$

$$Y \sim TR(y_{min}, y_{max}, y_{mod}) \longrightarrow F_Y(y): \begin{cases} \text{si } y_{min} \leq y \leq y_{mod} : \\ F_Y(y) = \frac{(y - y_{min})^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} \\ \text{si } y_{mod} < y \leq y_{max} : \\ F_Y(y) = 1 - \frac{(y_{max} - y)^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} \end{cases} \quad (6.4.b)$$

Para obtener la correspondiente función de transformación  $y=g(x)$  ha de procederse a igualar las funciones de distribución acumulada de ambas variables y despejar  $y$ , tal como se pone de manifiesto en las ecuaciones 6.3.a y 6.3.b. Sin embargo, la función de distribución acumulada de la variable  $Y$  está definida por tramos, lo que obliga a distinguir dos casos distintos.

En el primer caso se comienza suponiendo que el valor  $y$  obtenido vaya a resultar menor (o igual) que la moda de la distribución de la variable  $Y$  (es decir,  $y \leq y_{mod}$ ). En este caso se aplica la siguiente igualdad:

$$\frac{(y - y_{min})^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} = \frac{x - a_x}{b_x - a_x} \quad \text{si } y \leq y_{mod} \quad (6.5.a)$$

Despejando el valor de  $y$  en la ecuación 6.5.a se obtiene:

$$y = y_{min} + \sqrt{\frac{x - a_x}{b_x - a_x} \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} \quad \text{si } y \leq y_{mod} \quad (6.5.b)$$

Finalmente se debe comprobar qué valores de  $x$  hacen que el valor  $y$  así obtenido sea efectivamente inferior o igual a  $y_{mod}$ . Despejando  $x$  en la desigualdad obtenida de la ecuación 6.5.b se llega al siguiente rango de validez de dicha ecuación:

$$x \leq a_x + \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \cdot (b_x - a_x) \quad (6.5.c)$$

Por su parte, en el segundo caso se ha de suponer que el valor  $y$  obtenido vaya a ser mayor que la moda de la distribución de la variable  $Y$  (es decir,  $y > y_{mod}$ ). Bajo dicho supuesto, sería de aplicación la siguiente igualdad:

$$1 - \frac{(y_{max} - y)^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} = \frac{x - a_x}{b_x - a_x} \quad \text{si } y > y_{mod} \quad (6.6.a)$$

En este caso, despejando el valor de  $y$  en la ecuación 6.6.a se obtiene:

$$y = y_{max} - \sqrt{\left(1 - \frac{x - a_x}{b_x - a_x}\right) \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} \quad \text{si } y > y_{mod} \quad (6.6.b)$$

A partir de la desigualdad emanada de la ecuación 6.6.b se puede comprobar que el rango de valores de  $x$  para los cuales es válida dicha ecuación viene dado por:

$$x > a_x + \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \cdot (b_x - a_x) \tag{6.6.c}$$

Recapitulando los dos posibles casos, se puede concluir que la función de transformación  $y=g(x)$  desde los valores de una distribución uniforme con soporte o dominio en el intervalo  $(a_x, b_x)$  a una distribución triangular de mínimo  $y_{min}$ , máximo  $y_{max}$ , y moda  $y_{mod}$  queda definida del siguiente modo:

$$y = g\left(x \mid a_x, b_x; y_{min}, y_{max}, y_{mod}\right) : \tag{6.7}$$

$$y : \begin{cases} \text{si } x \leq a_x + \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \cdot (b_x - a_x) : \\ \qquad y = y_{min} + \sqrt{\frac{x - a_x}{b_x - a_x} \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} \\ \text{si } x > a_x + \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \cdot (b_x - a_x) : \\ \qquad y = y_{max} - \sqrt{\left(1 - \frac{x - a_x}{b_x - a_x}\right) \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} \end{cases}$$

**6.2.2.2.b. Caso particular. Definición de la función triang<sup>1</sup>**

Un caso particular de especial interés y de habitual uso en la transformación de valores desde una distribución uniforme a una distribución triangular es aquel en el que la distribución uniforme de partida es una uniforme estándar, es decir, con dominio o soporte en el intervalo  $(0,1)$ . De hecho, dicho caso particular va a ser utilizado con frecuencia a lo largo del modelo, por lo que conviene definir una función específica que sistematice su uso. Esta función, a la que se le da el nombre de triang<sup>1</sup>, se basa en una particularización de la función  $g(x)$  definida en la ecuación 6.7, sin más que considerar  $a_x=0$  y  $b_x=1$ . Como en la nueva función particular triang<sup>1</sup> dichos parámetros  $a_x$  y  $b_x$  dejan de poder adoptar valores variables, se prescinde de su inclusión como argumentos de la misma, ya que dicha inclusión sería innecesaria y redundante.

Adicionalmente, se incorpora dentro de la función triang<sup>1</sup> el caso singular en el que, en los datos introducidos al modelo, se hubiesen establecido idénticos valores para el mínimo, máximo y moda de la distribución triangular de una variable de entrada, indicando con ello que a dicha variable se le prefiere asignar un valor fijo en lugar de un valor aleatorio. En este caso, en los argumentos de la función de transformación triang<sup>1</sup> se produciría la situación de que  $y_{min}=y_{max}=y_{mod}$ . En la práctica, esto implica que se anula la naturaleza aleatoria de la variable  $Y$  y esta pasa a regirse por un enfoque determinista (el único valor posible es aquel que se haya indicado simultáneamente como moda, mínimo y máximo). Desde un punto de vista predominantemente teórico, se puede considerar que la función de densidad  $f_Y(y)$  de la distribución triangular de destino está colapsando en ese caso en una función delta de Dirac<sup>174</sup> tal que  $f_Y(y)=\delta(y-y_{mod})$ . De cualquier forma, el resultado de la función triang<sup>1</sup> en estas situaciones ha de ser necesariamente igual al valor en el que coinciden mínimo, máximo y moda.

<sup>174</sup> La función delta de Dirac,  $\delta(x)$ , toma valor nulo para cualquier argumento  $x$  excepto para el 0, caso en el cual el valor de la función se define como infinito  $(+\infty)$ .

En resumen, se define la función  $\text{triang}^I(x | y_{\min}, y_{\max}, y_{\text{mod}})$  del siguiente modo:

$$y = \text{triang}^I(x | y_{\min}, y_{\max}, y_{\text{mod}}) : \quad (6.8)$$

$$y : \left\{ \begin{array}{l} \text{si } y_{\min} \neq y_{\max} : \\ \quad \text{si } x \leq \frac{y_{\text{mod}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} : \\ \quad \quad y = y_{\min} + \sqrt{x \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})} \\ \quad \text{si } x > \frac{y_{\text{mod}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} : \\ \quad \quad y = y_{\max} - \sqrt{(1-x) \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} \\ \text{si } y_{\min} = y_{\max} = y_{\text{mod}} : \\ \quad y = y_{\text{mod}} \end{array} \right.$$

Una expresión equivalente a la obtenida en la ecuación 6.8 (para el caso general  $y_{\min} \neq y_{\max}$ ) puede ser encontrada, por ejemplo, en Kotz y van Dorp (2004: p. 8).

### 6.2.2.3. Transformación de valores entre dos distribuciones triangulares de diferentes parámetros

A continuación, por su especial utilidad para la aleatorización del modelo elaborado en la presente tesis, se lleva a cabo el desarrollo del procedimiento de aplicación del método de transformación de valores basado en la función inversa de la distribución acumulada al caso en el que la variable aleatoria inicial ( $X$ ) venga dada por una distribución triangular de unos parámetros determinados  $y$ , y, al mismo tiempo, los valores de la variable aleatoria transformada ( $Y$ ) deban corresponder a otra distribución triangular de diferentes parámetros. Aunque se trata simplemente de una aplicación más del método de la función inversa de la distribución acumulada, cabe indicar que en la literatura consultada no ha sido encontrado previamente este desarrollo específico.

#### 6.2.2.3.a. Caso general

Así pues, una posible aplicación adicional del método de transformación basado en la función inversa de la distribución acumulada es la determinación de funciones que tomen un conjunto disponible de valores aleatorios  $x$  correspondientes a una determinada distribución triangular inicial o de partida, de parámetros conocidos  $(x_{\min}, x_{\max}, x_{\text{mod}})$ , y los transformen en otros valores  $y$ , los cuales se desea que estén ajustados a una distribución triangular de parámetros  $y_{\min}, y_{\max}$  e  $y_{\text{mod}}$ . La situación planteada se define por tanto de la siguiente forma:

$$X \sim \text{TR}(x_{\min}, x_{\max}, x_{\text{mod}}) \longrightarrow F_X(x) : \left\{ \begin{array}{l} \text{si } x_{\min} \leq x \leq x_{\text{mod}} : \\ \quad F_X(x) = \frac{(x - x_{\min})^2}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min})} \\ \text{si } x_{\text{mod}} < x \leq x_{\max} : \\ \quad F_X(x) = 1 - \frac{(x_{\max} - x)^2}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\max} - x_{\text{mod}})} \end{array} \right. \quad (6.9.a)$$

$$Y \sim \text{TR}(y_{\min}, y_{\max}, y_{\text{mod}}) \longrightarrow F_Y(y) : \begin{cases} \text{si } y_{\min} \leq y \leq y_{\text{mod}} : \\ F_Y(y) = \frac{(y - y_{\min})^2}{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})} \\ \text{si } y_{\text{mod}} < y \leq y_{\max} : \\ F_Y(y) = 1 - \frac{(y_{\max} - y)^2}{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} \end{cases} \quad (6.9.b)$$

La función de transformación, a la que se denomina en este caso  $y=h(x)$ , ha de obtenerse igualando las funciones de distribución acumulada de las variables  $X$  e  $Y$ , y despejando a continuación el valor de  $y$ , de acuerdo a las ecuaciones 6.3.a y 6.3.b. Pero en este caso tanto la función de distribución acumulada de la variable  $X$  como la de la variable  $Y$  están definidas en dos tramos diferentes, dando lugar a la posibilidad de que existan por tanto cuatro posibles situaciones distintas.

En la primera de estas situaciones se parte de que el valor de  $x$  sea menor (o igual) que la moda de la distribución de dicha variable ( $x \leq x_{\text{mod}}$ ), y se presupone además que el valor  $y$  resultante vaya a ser menor (o igual) que la moda de la distribución de  $Y$  (es decir,  $y \leq y_{\text{mod}}$ ). Bajo estas condiciones es de aplicación la siguiente igualdad:

$$\frac{(y - y_{\min})^2}{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})} = \frac{(x - x_{\min})^2}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min})} \quad \text{si } x \leq x_{\text{mod}} \wedge y \leq y_{\text{mod}} \quad (6.10.a)$$

Si a continuación se despeja el valor de  $y$  en la ecuación 6.10.a se obtiene:

$$y = y_{\min} + (x - x_{\min}) \cdot \sqrt{\frac{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min})}} \quad \text{si } x \leq x_{\text{mod}} \wedge y \leq y_{\text{mod}} \quad (6.10.b)$$

Finalmente se debe determinar qué valores de  $x$  (siendo  $x \leq x_{\text{mod}}$ ) hacen que el valor  $y$  obtenido de esta forma sea efectivamente inferior o igual a  $y_{\text{mod}}$ . A tal objeto, se despeja  $x$  en la segunda desigualdad de las condiciones impuestas por la ecuación 6.10.b y se termina obteniendo con ello el siguiente rango de validez para dicha ecuación:

$$x \leq x_{\text{mod}} \wedge x \leq x_{\min} + \sqrt{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min}) \cdot \frac{y_{\text{mod}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}} \quad (6.10.c)$$

En la segunda de las posibles situaciones también se parte de que el valor de  $x$  sea menor (o igual) que la moda de la distribución de la variable aleatoria  $X$  ( $x \leq x_{\text{mod}}$ ), pero se presupone ahora que el valor  $y$  a obtener vaya a ser mayor que la moda de la distribución de  $Y$  ( $y > y_{\text{mod}}$ ). En este caso se aplicaría la siguiente igualdad:

$$1 - \frac{(y_{\max} - y)^2}{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} = \frac{(x - x_{\min})^2}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min})} \quad \text{si } x \leq x_{\text{mod}} \wedge y > y_{\text{mod}} \quad (6.11.a)$$

Despejando ahora el valor de  $y$  en la ecuación 6.11.a se llega a:

$$y = y_{\max} - \sqrt{\left(1 - \frac{(x - x_{\min})^2}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot (x_{\text{mod}} - x_{\min})}\right) \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} \quad (6.11.b)$$

$$\text{si } x \leq x_{\text{mod}} \wedge y > y_{\text{mod}}$$

Por último se ha de determinar qué valores de  $x$  (siendo  $x \leq x_{mod}$ ) conducen a que el valor  $y$  así obtenido sea realmente mayor que  $y_{mod}$ . En base a la segunda desigualdad de las condiciones impuestas en la ecuación 6.11.b se deduce el siguiente rango de validez para dicha ecuación:

$$x \leq x_{mod} \wedge x > x_{min} + \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{mod} - x_{min}) \cdot \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}} \quad (6.11.c)$$

En el tercero de los posibles casos se parte de que el valor de  $x$  sea mayor que la moda de la distribución de dicha variable ( $x > x_{mod}$ ), y se presupone adicionalmente que el valor  $y$  a obtener como resultado vaya a ser menor (o igual) que la moda de la distribución de  $Y$  (es decir,  $y \leq y_{mod}$ ). Dadas estas condiciones, corresponde aplicar la siguiente igualdad:

$$\frac{(y - y_{min})^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} = 1 - \frac{(x_{max} - x)^2}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})} \quad \text{si } x > x_{mod} \wedge y \leq y_{mod} \quad (6.12.a)$$

A continuación, si se despeja el valor de  $y$  en la ecuación 6.12.a se obtiene:

$$y = y_{min} + \sqrt{\left(1 - \frac{(x_{max} - x)^2}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})}\right) \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} \quad (6.12.b)$$

$$\text{si } x > x_{mod} \wedge y \leq y_{mod}$$

Se debe analizar por último qué valores de  $x$  (siendo  $x > x_{mod}$ ) hacen que el valor  $y$  calculado de esta manera resulte efectivamente inferior o igual a  $y_{mod}$ . A partir de la segunda desigualdad de las condiciones impuestas por la ecuación 6.12.b se pueden obtener los valores de  $x$  que hacen que se cumpla dicha restricción, conduciendo al siguiente rango de validez para este tercer caso:

$$x > x_{mod} \wedge x \leq x_{max} - \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod}) \cdot \frac{y_{max} - y_{mod}}{y_{max} - y_{min}}} \quad (6.12.c)$$

En el cuarto y último caso también se debe partir de que el valor de  $x$  sea mayor que la moda de la distribución de la variable aleatoria  $X$  (es decir,  $x > x_{mod}$ ), pero ha de presuponerse ahora que el valor  $y$  que se obtenga resultará ser mayor que la moda de la distribución de  $Y$  ( $y > y_{mod}$ ). Por tanto procede basar este último caso en la siguiente igualdad:

$$1 - \frac{(y_{max} - y)^2}{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} = 1 - \frac{(x_{max} - x)^2}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})} \quad \text{si } x > x_{mod} \wedge y > y_{mod} \quad (6.13.a)$$

Despejando el valor de  $y$  en la ecuación 6.13.a se llega a:

$$y = y_{max} - (x_{max} - x) \cdot \sqrt{\frac{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})}} \quad \text{si } x > x_{mod} \wedge y > y_{mod} \quad (6.13.b)$$

Finalmente, es necesario determinar qué valores de  $x$  (siendo  $x > x_{mod}$ ) hacen que el valor  $y$  así obtenido sea realmente mayor que  $y_{mod}$ . Despejando  $x$  en la segunda desigualdad de las condiciones impuestas por la ecuación 6.13.b se establece el siguiente rango de validez para dicha ecuación:

$$x > x_{mod} \wedge x > x_{max} - \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod}) \cdot \frac{y_{max} - y_{mod}}{y_{max} - y_{min}}} \quad (6.13.c)$$

Para concluir, conviene recapitular los cuatro posibles casos que se pueden presentar en el cálculo de la función de transformación  $y=h(x)$  desde los valores de una distribución triangular de mínimo  $x_{min}$ ,



máximo  $x_{max}$  y moda  $x_{mod}$  a otra distribución triangular distinta con mínimo  $y_{min}$ , máximo  $y_{max}$  y moda  $y_{mod}$ . Se define por tanto dicha función de la siguiente forma:

$$y = h(x | x_{min}, x_{max}, x_{mod}; y_{min}, y_{max}, y_{mod}) :$$

$$y: \left\{ \begin{array}{l} \text{si } x \leq x_{mod} \wedge x \leq x_{min} + \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{mod} - x_{min}) \cdot \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}} : \\ \quad y = y_{min} + (x - x_{min}) \cdot \sqrt{\frac{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{mod} - x_{min})}} \\ \text{si } x \leq x_{mod} \wedge x > x_{min} + \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{mod} - x_{min}) \cdot \frac{y_{mod} - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}} : \\ \quad y = y_{max} - \sqrt{\left(1 - \frac{(x - x_{min})^2}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{mod} - x_{min})}\right) \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})} \\ \text{si } x > x_{mod} \wedge x \leq x_{max} - \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod}) \cdot \frac{y_{max} - y_{mod}}{y_{max} - y_{min}}} : \\ \quad y = y_{min} + \sqrt{\left(1 - \frac{(x_{max} - x)^2}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})}\right) \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{mod} - y_{min})} \\ \text{si } x > x_{mod} \wedge x > x_{max} - \sqrt{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod}) \cdot \frac{y_{max} - y_{mod}}{y_{max} - y_{min}}} : \\ \quad y = y_{max} - (x_{max} - x) \cdot \sqrt{\frac{(y_{max} - y_{min}) \cdot (y_{max} - y_{mod})}{(x_{max} - x_{min}) \cdot (x_{max} - x_{mod})}} \end{array} \right. \quad (6.14)$$

### 6.2.2.3.b. Caso particular. Definición de la función triang<sup>II</sup>

Una particularización de la función de transformación  $h(x)$  que va a ser utilizada profusamente a lo largo del desarrollo del modelo es aquella en la que la distribución triangular de partida (es decir, la de la variable aleatoria  $X$ ) tiene un valor mínimo de 0, un máximo de 1 y una moda de valor  $\frac{1}{2}$  (siendo por tanto una distribución simétrica). Por conveniencia, se define para este caso en concreto la función triang<sup>II</sup>, que se basa simplemente en una particularización de la función  $h(x)$  definida en la ecuación 6.14, en la cual se fijen los siguientes valores:  $x_{min}=0$ ,  $x_{max}=1$  y  $x_{mod}=0.5$ . Dado que en esta nueva función particular triang<sup>II</sup> los parámetros  $x_{min}$ ,  $x_{max}$  y  $x_{mod}$  han dejado de ser susceptibles de adoptar valores variables, resulta adecuado prescindir de su inclusión como argumentos.

Por otra parte, al igual que sucedía anteriormente en la función triang<sup>I</sup>, se ha de incorporar el caso singular en el que los datos introducidos al modelo hubiesen establecido idénticos valores para el mínimo, máximo y moda de la distribución triangular de una determinada variable de entrada, señalando de esta forma que a dicha variable se le asigna un valor fijo en vez de un valor aleatorio. En este caso, en los argumentos de la función triang<sup>II</sup> se tendría que  $y_{min}=y_{max}=y_{mod}$  y el único resultado posible de dicha función sería el valor que se haya indicado simultáneamente como moda, mínimo y máximo.

En consecuencia, se define en esta tesis la función triang<sup>II</sup>( $x | y_{min}, y_{max}, y_{mod}$ ) del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 y &= \text{triang}^{\text{II}}(x | y_{\min}, y_{\max}, y_{\text{mod}}) : \\
 &\left. \begin{aligned}
 &\text{si } y_{\min} \neq y_{\max} : \\
 &\quad \text{si } x \leq 0.5 \wedge x \leq \sqrt{0.5 \cdot \frac{y_{\text{mod}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}} : \\
 &\quad \quad y = y_{\min} + x \cdot \sqrt{2 \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})} \\
 &\quad \text{si } x \leq 0.5 \wedge x > \sqrt{0.5 \cdot \frac{y_{\text{mod}} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}} : \\
 &\quad \quad y = y_{\max} - \sqrt{(1 - 2 \cdot x^2) \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} \\
 &\quad \text{si } x > 0.5 \wedge x \leq 1 - \sqrt{0.5 \cdot \frac{y_{\max} - y_{\text{mod}}}{y_{\max} - y_{\min}}} : \\
 &\quad \quad y = y_{\min} + \sqrt{[1 - 2 \cdot (1 - x)^2] \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\text{mod}} - y_{\min})} \\
 &\quad \text{si } x > 0.5 \wedge x > 1 - \sqrt{0.5 \cdot \frac{y_{\max} - y_{\text{mod}}}{y_{\max} - y_{\min}}} : \\
 &\quad \quad y = y_{\max} - (1 - x) \cdot \sqrt{2 \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\text{mod}})} \\
 &\text{si } y_{\min} = y_{\max} = y_{\text{mod}} : \\
 &\quad y = y_{\text{mod}}
 \end{aligned} \right\} y : \tag{6.15}
 \end{aligned}$$

**6.2.3. Correlación entre dos variables aleatorias A y B, siendo A=m·X+n·Y y B=m·X+n·Z (con X, Y y Z independientes entre sí)**

**6.2.3.1. Caso general**

Se plantea ahora analizar la correlación entre dos variables A y B que estén formadas mediante la combinación lineal (con los mismos coeficientes m y n en ambos casos) de una pareja de variables aleatorias tales que una de dichas variables (X) sea común tanto a A como a B, y las otras variables aleatorias de cada pareja (Y y Z respectivamente) sean distintas entre sí. Además, se parte de la condición de que las variables aleatorias X, Y y Z son independientes entre sí (por lo que la covarianza de cada posible par es igual a 0). La inclusión en esta tesis del análisis estadístico que se desarrolla y presenta a continuación se debe a que el tipo de correlación (caracterizada a través del coeficiente de correlación de Pearson) que se establece entre dos variables aleatorias formadas de esta manera resultará de particular interés a lo largo del desarrollo de los procedimientos de aleatorización del modelo.

Así pues, se parte, en resumen, de la siguiente situación:

$$\begin{cases}
 A = m \cdot X + n \cdot Y \\
 B = m \cdot X + n \cdot Z \\
 X, Y, Z \text{ v. a. indep.} \Rightarrow \text{Cov}(X, Y) = \text{Cov}(X, Z) = \text{Cov}(Y, Z) = 0
 \end{cases} \tag{6.16}$$

Por su parte, el coeficiente de correlación de Pearson (denotado generalmente como  $\rho$ ) entre dos variables aleatorias cualesquiera es igual a su covarianza dividida entre el producto de las desviaciones típicas de cada variable<sup>175</sup>. Por consiguiente, se tiene:

$$\rho_{A,B} = \frac{\text{Cov}(A,B)}{\sigma_A \cdot \sigma_B} = \frac{\text{Cov}(A,B)}{\sqrt{\text{Var}(A) \cdot \text{Var}(B)}} \quad (6.17)$$

Por otra parte, recuérdese que la varianza de la combinación lineal de dos variables aleatorias cualesquiera  $V$  y  $W$  cumple la siguiente propiedad:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\alpha \cdot V + \beta \cdot W) &= \alpha^2 \cdot \text{Var}(V) + \beta^2 \cdot \text{Var}(W) + 2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \text{Cov}(V,W) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{Cov}(V,W) &= \frac{\text{Var}(\alpha \cdot V + \beta \cdot W) - \alpha^2 \cdot \text{Var}(V) - \beta^2 \cdot \text{Var}(W)}{2 \cdot \alpha \cdot \beta} \end{aligned} \quad (6.18.a)$$

Aplicando la segunda igualdad de la ecuación 6.18.a a las variables  $A$  y  $B$ , con  $\alpha=\beta=1$ , se obtiene:

$$\text{Cov}(A,B) = \frac{\text{Var}(A+B) - \text{Var}(A) - \text{Var}(B)}{2} \quad (6.18.b)$$

Dada la definición de las variables  $A$  y  $B$  (véase ecuación 6.16), se tiene:

$$\text{Var}(A+B) = \text{Var}(m \cdot X + n \cdot Y + m \cdot X + n \cdot Z) = \text{Var}[2 \cdot m \cdot X + n \cdot (Y+Z)] \quad (6.19.a)$$

Aplicando ahora la propiedad concerniente a la varianza de la combinación lineal de dos variables aleatorias (es decir, la primera parte de la ecuación 6.18.a) sobre el resultado de la ecuación 6.19.a, se puede expresar la varianza de  $A+B$  del siguiente modo:

$$\text{Var}(A+B) = 4 \cdot m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Y+Z) + \underbrace{4 \cdot m \cdot n \cdot \text{Cov}(X, Y+Z)}_0 \quad (6.19.b)$$

A su vez, la varianza de  $Y+Z$  es igual a:

$$\text{Var}(Y+Z) = \text{Var}(Y) + \text{Var}(Z) + \underbrace{2 \cdot \text{Cov}(Y,Z)}_0 = \text{Var}(Y) + \text{Var}(Z) \quad (6.19.c)$$

Reemplazando el resultado de la ecuación 6.19.c en 6.19.b se llega finalmente a la siguiente expresión para la varianza de  $A+B$ :

$$\text{Var}(A+B) = 4 \cdot m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Y) + n^2 \cdot \text{Var}(Z) \quad (6.19.d)$$

Continuando con el numerador de la ecuación 6.18.b, se tiene además:

$$\begin{aligned} \text{Var}(A) &= \text{Var}(m \cdot X + n \cdot Y) = m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Y) + \underbrace{2 \cdot m \cdot n \cdot \text{Cov}(X,Y)}_0 = \\ &= m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Y) \end{aligned} \quad (6.20.a)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(B) &= \text{Var}(m \cdot X + n \cdot Z) = m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Z) + \underbrace{2 \cdot m \cdot n \cdot \text{Cov}(X,Z)}_0 = \\ &= m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Z) \end{aligned} \quad (6.20.b)$$

<sup>175</sup> Los posibles valores del coeficiente de correlación de Pearson pueden variar entre  $-1$  y  $1$ , donde  $-1$  indica una correlación lineal negativa total o perfecta,  $1$  indica una correlación lineal positiva total o perfecta, y  $0$  indica una total ausencia de correlación lineal.

Sustituyendo las ecuaciones 6.19.d, 6.20.a y 6.20.b en 6.18.b, se obtiene finalmente para la covarianza de  $A$  y  $B$ :

$$\text{Cov}(A,B) = \frac{2 \cdot m^2 \cdot \text{Var}(X)}{2} = m^2 \cdot \text{Var}(X) \quad (6.21)$$

A continuación, se pasa a analizar el producto de las varianzas de  $A$  y  $B$ , cuya raíz cuadrada está presente en el denominador de la ecuación 6.17:

$$\begin{aligned} \text{Var}(A) \cdot \text{Var}(B) &= [m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Y)] \cdot [m^2 \cdot \text{Var}(X) + n^2 \cdot \text{Var}(Z)] = \\ &= m^4 \cdot \text{Var}(X)^2 + m^2 \cdot n^2 \cdot \text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Z) + m^2 \cdot n^2 \cdot \text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y) + n^4 \cdot \text{Var}(Y) \cdot \text{Var}(Z) = \\ &= m^4 \cdot \text{Var}(X)^2 + m^2 \cdot n^2 \cdot \text{Var}(X) \cdot [\text{Var}(Y) + \text{Var}(Z)] + n^4 \cdot \text{Var}(Y) \cdot \text{Var}(Z) \end{aligned} \quad (6.22)$$

Por último, sustituyendo los resultados de las ecuaciones 6.21 y 6.22 en 6.17, se obtiene en esta tesis la siguiente expresión general para el coeficiente de correlación de Pearson de estas dos variables  $A$  y  $B$ :

$$\rho_{A,B} = \frac{m^2 \cdot \text{Var}(X)}{\sqrt{m^4 \cdot \text{Var}(X)^2 + m^2 \cdot n^2 \cdot \text{Var}(X) \cdot [\text{Var}(Y) + \text{Var}(Z)] + n^4 \cdot \text{Var}(Y) \cdot \text{Var}(Z)}} \quad (6.23)$$

### 6.2.3.2. Particularizaciones

Supóngase ahora que las tres variables aleatorias independientes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  tienen la misma varianza, siendo esta un cierto valor  $\sigma^2$  (es decir,  $\text{Var}(X) = \text{Var}(Y) = \text{Var}(Z) = \sigma^2$ ). Introduciendo esta condición en la ecuación 6.23 se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \rho_{A,B} &= \frac{m^2 \cdot \sigma^2}{\sqrt{m^4 \cdot (\sigma^2)^2 + 2 \cdot m^2 \cdot n^2 \cdot (\sigma^2)^2 + n^4 \cdot (\sigma^2)^2}} = \frac{m^2 \cdot \sigma^2}{\sqrt{(m^4 + 2 \cdot m^2 \cdot n^2 + n^4) \cdot (\sigma^2)^2}} = \\ &= \frac{m^2 \cdot \sigma^2}{\sqrt{(m^2 + n^2)^2 \cdot (\sigma^2)^2}} = \frac{m^2 \cdot \sigma^2}{(m^2 + n^2) \cdot \sigma^2} = \frac{m^2}{m^2 + n^2} \end{aligned} \quad (6.24)$$

Por último, considérese el caso en el que, además, los coeficientes  $m$  y  $n$  valen ambos  $\frac{1}{2}$ , de forma que la variable  $A$  constituye la semisuma (o media aritmética) de  $X$  e  $Y$ , mientras que la variable  $B$  es la semisuma de  $X$  y  $Z$ . Bajo todas estas condiciones, se obtiene finalmente:

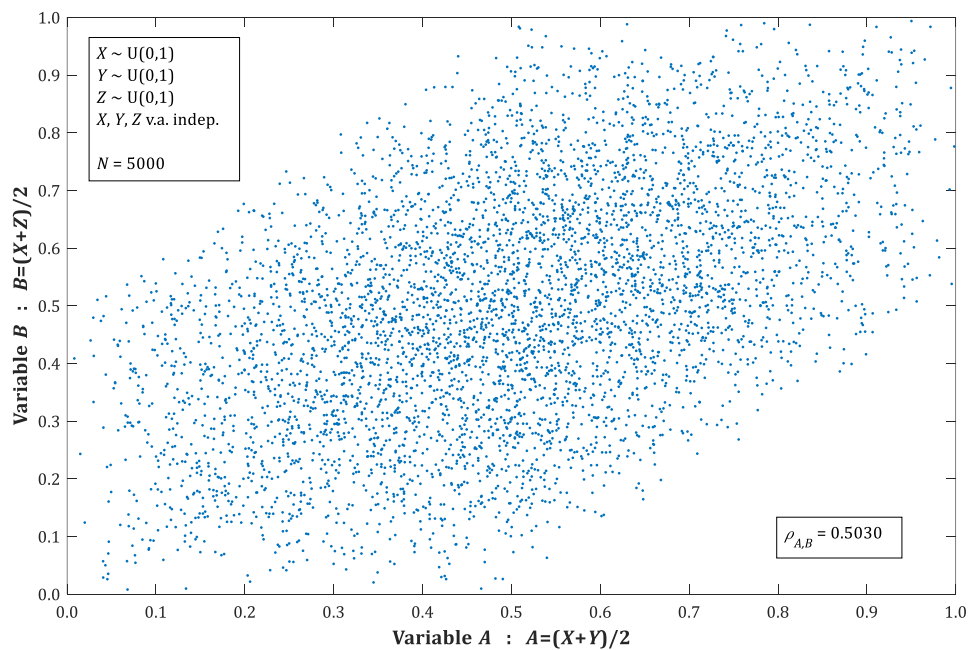
$$\left. \begin{array}{l} A = \frac{X+Y}{2} \\ B = \frac{X+Z}{2} \\ X, Y, Z \text{ v. a. indep.} \\ \text{Var}(X) = \text{Var}(Y) = \text{Var}(Z) \end{array} \right\} \Rightarrow \rho_{A,B} = \frac{(\frac{1}{2})^2}{(\frac{1}{2})^2 + (\frac{1}{2})^2} = \frac{1}{2} \quad (6.25)$$

En síntesis, el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables  $A$  y  $B$  que estén formadas mediante la semisuma, en cada caso, de una pareja de variables aleatorias tales que una de dichas variables ( $X$ ) sea común tanto a  $A$  como a  $B$ , y las otras variables aleatorias de cada pareja ( $Y$  y  $Z$  respectivamente) sean distintas entre sí, es igual a  $\frac{1}{2}$ , siempre y cuando  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  sean independientes entre sí y tengan las tres la misma varianza.

En relación directa con los procedimientos de aleatorización desarrollados posteriormente en el modelo, nótese que si  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  son tres variables aleatorias independientes con distribución uniforme estándar, las variables resultantes de las semisumas  $A=(X+Y)/2$  y  $B=(X+Z)/2$  van a presentar distribuciones triangulares (simétricas) con mínimo igual a 0, máximo igual a 1 y moda igual a  $1/2$  (tal como se vio en el epígrafe 6.2.1.2), y además sus valores van a estar correlacionados con un coeficiente de correlación lineal de Pearson igual a  $1/2$ .

Obsérvese, además, que si los coeficientes  $m$  y  $n$  presentasen valores distintos entre sí (de modo que el coeficiente de correlación lineal de Pearson obtenido entre  $A$  y  $B$  fuese distinto de  $1/2$ ), las variables aleatorias resultantes de las combinaciones lineales  $A=m\cdot X+n\cdot Y$  y  $B=m\cdot X+n\cdot Z$  (siendo  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  tres variables aleatorias independientes con distribución uniforme estándar) ya no corresponderían a distribuciones triangulares, de forma que para garantizar que las variables aleatorias  $A$  y  $B$  obtenidas de esta manera presenten distribuciones triangulares es necesario imponer también que el coeficiente de correlación entre ellas sea igual a  $1/2$ , resultando además simétricas. Esta limitación condicionará el coeficiente de correlación que en la práctica será posible imponer entre aquellas variables del modelo para las que se prevea la probable existencia de un cierto nivel de correlación, restringiendo los posibles valores del coeficiente de correlación lineal de Pearson a únicamente  $1/2$ .

Para concluir, se va a representar a continuación (Figura 6.1) el diagrama de dispersión bivalente de dos variables  $A$  y  $B$  (ambas con distribución triangular de mínimo 0, máximo 1 y moda  $1/2$ ) obtenidas de la forma anteriormente indicada ( $A=(X+Y)/2$  y  $B=(X+Z)/2$ ) a partir de tres variables aleatorias independientes ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) con distribución uniforme estándar, al objeto de que se pueda apreciar visualmente el nivel de correlación entre ellas.



**Figura 6.1.** Diagrama de dispersión bivalente de dos variables aleatorias  $A$  y  $B$  (ambas con distribución triangular de mínimo 0, máximo 1 y moda  $1/2$ ) obtenidas a partir de tres variables aleatorias independientes ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) con distribución uniforme estándar, mediante las semisumas  $A=(X+Y)/2$  y  $B=(X+Z)/2$ .

### 6.3. ALEATORIZACIÓN DE DATOS O VARIABLES DE ENTRADA

#### 6.3.1. Variables relativas a los vehículos o unidades de transporte público

##### 6.3.1.1. Aleatorización del porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación

La variable  $\rho_r^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del porcentaje de unidades de transporte del modo  $m$  (de transporte público) destinadas a servir de reserva o a permanecer previsiblemente fuera de servicio por estar sometidas a labores de mantenimiento o reparación, definido dicho porcentaje con respecto al número de unidades que en cada caso resulten estrictamente necesarias para la prestación del servicio.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $\rho_r^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adaptarse a una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $\rho_{min}^m$ ,  $\rho_{max}^m$  y  $\rho_{mod}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $\rho_r^m$  se basa en la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $Up1$ ) se considera común a cualquiera de los modos de transporte público y se puede vincular a las preferencias o actitudes generales del operador, en cuanto a la mayor o menor prudencia de este a la hora de seleccionar el porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación. Se relaciona por tanto con el riesgo que en general el operador esté dispuesto a asumir de no disponer de suficientes unidades de transporte en reserva en caso de necesidades especiales o de que alguna unidad se averíe o sufra un accidente. La segunda variable aleatoria primigenia ( $Up2^m$ ) introduce una variabilidad propia para cada modo de transporte público, en relación con las preferencias o actitudes singulares del operador hacia cada uno de dichos modos; es decir, el operador puede tener un mayor o menor grado de confianza subjetiva con respecto a la fiabilidad de funcionamiento de cada modo de transporte público, aunque siempre dentro del intervalo 'objetivo' ( $\rho_{min}^m, \rho_{max}^m$ ). En cualquier caso, sobre esta confianza específica intervienen también datos objetivos que normalmente serán conocidos por el operador, pero que sin embargo pueden no estar a disposición del analista. Así, en relación con el porcentaje de reserva se tendría en cuenta la frecuencia histórica de incidentes, que a su vez podrá ser función de las condiciones del trazado para cada modo, del tipo de conducción y de la propia fiabilidad de cada clase de material móvil. En relación con el mantenimiento, la cuestión fundamental estará condicionada por la periodicidad o programación del mismo (revisiones cada cierto número de kilómetros, el cual dependerá a su vez de las condiciones de la red y sobre todo de las características del material móvil).

Una vez combinadas ambas variables primigenias (mediante la semisuma de sus respectivos valores aleatorios) para dar lugar a una distribución triangular de probabilidad con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ , se cumple que, en el conjunto de simulaciones aleatorias, los valores extraídos de dicha distribución para los distintos modos  $m$  de transporte público están correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Una vez obtenidos los valores  $TR\rho_r^m$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), se efectúa la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $\rho_{min}^m$ , máximo  $\rho_{max}^m$  y moda  $\rho_{mod}^m$ ) mediante la aplicación de la función triang<sup>II</sup>.

Este procedimiento se expresa matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Up1 \sim U(0,1) \longrightarrow Up1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.26.a.i)$$

$$U\rho 2^m \sim U(0,1) \longrightarrow U\rho 2_r^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.26.a.ii)$$

$$TR\rho_r^m = (U\rho 1_r + U\rho 2_r^m) / 2 \quad (6.26.b)$$

$$\rho_r^m = \text{triang}^{\text{II}}(TR\rho_r^m \mid \rho \text{min}^m, \rho \text{max}^m, \rho \text{mod}^m) \quad (6.26.c)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.2. Variables referentes a los parámetros relacionados con el rendimiento operativo de los modos de transporte público

#### 6.3.2.1. Aleatorización del tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior

La variable  $pstn_{rijk}^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público del modo  $m$  (en condiciones de ausencia de congestión en el interior del mismo), dadas las características de los pasajeros que hacen uso de la línea  $i$  durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable se expresa numéricamente en el modelo en segundos por persona [s/prs].

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $pstn_{rijk}^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que los parámetros de mínimo, máximo y moda han sido establecidos previamente como  $pstnmin_{ijk}^m$ ,  $pstnmax_{ijk}^m$  y  $pstnmod_{ijk}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $pstn_{rijk}^m$  parte de dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $Upstn1^m$ ) se adopta de tal forma que sea propia de cada modo  $m$  de transporte público (en relación con las características de sus vehículos o unidades de transporte), mientras que la segunda ( $Upst2_{ijk}$ ) se particulariza para cada combinación específica de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ), y puede asociarse a la variabilidad o incertidumbre sobre las características propias de los usuarios que podrían influir en los tiempos de entrada o salida. A continuación se combinan ambas variables primigenias mediante su semisuma, dando lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Obsérvese que, dado un determinado modo  $m$  de transporte público, los valores tomados de esta distribución triangular correspondientes a dos triplas distintas de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ) están correlacionados entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias (coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Por su parte, fijada una determinada combinación de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ), los valores correspondientes a distintos modos  $m$  de transporte público también se correlacionan entre sí (con coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ) a lo largo de la serie de simulaciones.

Una vez calculados los valores aleatorios  $TRpstn_{rijk}^m$  de la distribución triangular de partida, se realiza la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $pstnmin_{ijk}^m$ , máximo  $pstnmax_{ijk}^m$  y moda  $pstnmod_{ijk}^m$ ), para lo cual se aplica la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

El procedimiento se define matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Upstn1^m \sim U(0,1) \longrightarrow Upstn1_r^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.27.a.i)$$

$$Upst2_{ijk} \sim U(0,1) \longrightarrow Upst2_{rijk} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.27.a.ii)$$

$$TRpstn_{rijk}^m = (Upstn1_r^m + Upst2_{rijk}^m) / 2 \quad (6.27.b)$$

$$pstn_{rijk}^m = \text{triang}^{\text{II}}(TRpstn_{rijk}^m \mid pstnmin_{ijk}^m, pstnmax_{ijk}^m, pstnmod_{ijk}^m) \quad (6.27.c)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.2.2. Aleatorización del factor de eficacia unitaria de los canales de paso

La variable  $fdp_m^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de eficacia unitaria a aplicar a los canales de paso de las unidades de transporte o vehículos pertenecientes al modo  $m$  de transporte público y a su subtipo o clase  $n$ , dado su correspondiente número limitante de canales (de entrada o de salida)  $Ndc_n^m$ . Se trata de una variable de tipo adimensional.

Por otra parte, para el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $fdp_m^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) se han de adaptar a una distribución triangular de probabilidad (siempre que  $Ndc_n^m > 1$ ), con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido definidos previamente como  $fdpmin_n^m$ ,  $fdpmax_n^m$  y  $fdpmod_n^m$ .

En este caso, para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $fdp_m^m$  se adopta la utilización de una única variable aleatoria primigenia uniformemente distribuida en el intervalo (0,1), empleada de forma común para todos los tipos de unidades de transporte o vehículos de cualquiera de los modos de transporte público. Esto se traduce en que, en cada uno de las simulaciones aleatorias individualizadas, el efecto aleatorio sobre los valores del factor de eficacia unitaria de los canales de paso será igual de favorable o desfavorable (con respecto a su distribución específica de parámetros  $fdpmin_n^m$ ,  $fdpmax_n^m$  y  $fdpmod_n^m$ ) para todos los tipos de vehículos o unidades de transporte público de cualquiera de los modos. Este criterio se relaciona con la forma en que se propuso la selección de los parámetros de mínimo, máximo y moda de las distribuciones, con valores orientativos en función del número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) con que estén equipadas las unidades de transporte previstas en cada caso, independientemente de su tipo y del modo en particular.

A continuación, a partir de la distribución uniforme de partida en el intervalo (0,1) se efectúa (si  $Ndc_n^m > 1$ ) la transformación de valores a la distribución triangular final (mínimo  $fdpmin_n^m$ , máximo  $fdpmax_n^m$  y moda  $fdpmod_n^m$ ) mediante la aplicación de la función  $\text{triang}^{\text{I}}$ . Pero si el número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) del tipo de unidad de transporte es de solamente uno ( $Ndc_n^m = 1$ ) no se debe aplicar ningún procedimiento de aleatorización, ya que el factor de eficacia unitaria del canal de paso ha de ser, en ese caso, necesariamente igual a la unidad.

Estos procedimientos se resumen por medio del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Ufdp \sim U(0, 1) \longrightarrow Ufdp_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.28.a)$$

Si  $Ndc_n^m = 1$ :

$$fdp_m^m = 1.00 \quad \forall r \quad (6.28.b.i)$$

Si  $Ndc_n^m > 1$ :

$$fdp_m^m = \text{triang}^{\text{I}}(Ufdp_r \mid fdpmin_n^m, fdpmax_n^m, fdpmod_n^m) \quad (6.28.b.ii)$$



con:

$$m \in \{0, R, B\} ; n = 1, 2, \dots, Nvt^m ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.2.3. Aleatorización del índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros

La variable  $bas_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros en el conjunto de paradas o estaciones de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Dicha variable es de tipo adimensional.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $bas_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido establecidos previamente como  $basmin_{ijk}$ ,  $basmax_{ijk}$  y  $basmod_{ijk}$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $bas_{rijk}$  se ha fundamentado en dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ . La primera de ellas ( $Ubas1_{ik}$ ) se ha considerado propia de cada itinerario entre terminales o cabeceras (de ida o de vuelta, si la línea es convencional de doble sentido), por lo que, en cada simulación aleatoria, toma un valor específico para cada dupla formada por línea ( $i$ ) y sentido de viaje ( $k$ ). Por su parte, la segunda de estas variables aleatorias primigenias ( $Ubas2_{ij}$ ) se asocia a cada período horario de operación en una determinada línea, de tal forma que, en cada simulación aleatoria, recibe un valor específico para cada dupla definida por los índices de línea ( $i$ ) y de uno de sus períodos horarios ( $j$ ). El siguiente paso consiste en combinar ambas variables primigenias mediante su semisuma, produciendo así la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Nótese que, de este modo, los valores aleatorios de esta distribución triangular que corresponden a una misma línea y sentido de viaje (pero a diferentes períodos horarios) están correlacionados entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias (coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Análogamente, los valores aleatorios de dicha distribución que corresponden a una misma línea y período horario (pero a diferentes sentidos de operación) también simulan estar correlacionados entre sí (de nuevo con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Una vez que han sido obtenidos los valores  $TRbas_{rijk}$  de la distribución triangular de partida, se ha de proceder a la transformación de los mismos a la distribución triangular final (mínimo  $basmin_{ijk}$ , máximo  $basmax_{ijk}$  y moda  $basmod_{ijk}$ ), para lo que basta con aplicar la función  $triang^{II}$ .

Este procedimiento se sistematiza mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Ubas1_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow Ubas1_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.29.a.i)$$

$$Ubas2_{ij} \sim U(0, 1) \longrightarrow Ubas2_{rij} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.29.a.ii)$$

$$TRbas_{rijk} = (Ubas1_{rik} + Ubas2_{rij}) / 2 \quad (6.29.b)$$

$$bas_{rijk} = \text{triang}^{II}(TRbas_{rijk} \mid basmin_{ijk}, basmax_{ijk}, basmod_{ijk}) \quad (6.29.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.2.4. Aleatorización del tiempo medio por parada para las operaciones de apertura y cierre de puertas

La variable  $oct_m^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del tiempo medio dedicado, por cada parada o estación, a las operaciones de apertura y cierre de puertas de las unidades de transporte o vehículos pertenecientes al modo  $m$  de transporte público y a su subtipo o clase  $n$ . Esta variable se expresa numéricamente en el modelo en segundos [s] (por parada).

Además, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $oct_m^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido previamente definidos como  $octmin_n^m$ ,  $octmax_n^m$  y  $octmod_n^m$ .

De forma similar a lo propuesto anteriormente para el factor de eficacia unitaria de los canales de paso, en el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $oct_m^m$  se opta por emplear una única variable aleatoria primigenia, distribuida uniformemente en el intervalo (0,1), la cual se utiliza compartidamente para todos los tipos de unidades de transporte o vehículos de cualquiera de los modos de transporte público. Esto implica que, en cada una de las simulaciones, el efecto aleatorio sobre los valores del tiempo medio por parada para apertura y cierre de puertas va a ser igual de favorable o desfavorable (con respecto a su distribución específica de parámetros  $octmin_n^m$ ,  $octmax_n^m$  y  $octmod_n^m$ ) para todos los tipos de vehículos o unidades de transporte público de cualquiera de los modos. Es decir, se asume que en la elección de las distribuciones específicas propuestas existiría un sesgo común (ya sea por exceso o por defecto) con respecto a los respectivos valores tomados en cada simulación.

Finalmente, a partir de la distribución uniforme de partida en el intervalo (0,1) se ha de realizar la transformación de valores a la distribución triangular final (mínimo  $octmin_n^m$ , máximo  $octmax_n^m$  y moda  $octmod_n^m$ ), empleando para ello la función  $triang^1$ .

En resumen, este procedimiento se rige por las siguientes ecuaciones:

$$Uoct \sim U(0, 1) \longrightarrow Uoct_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.30.a)$$

$$oct_m^m = \text{triang}^1(Uoct_r \mid octmin_n^m, octmax_n^m, octmod_n^m) \quad (6.30.b)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; n = 1, 2, \dots, Nvt^m ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.2.5. Aleatorización del coeficiente de tiempo de terminales

La variable  $\gamma_{rij}^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del coeficiente de tiempo de terminales que haya de ser aplicado para el diseño de la operación de la línea  $i$  durante el período horario  $j$ , supuesta la utilización del modo  $m$  de transporte público. Estos valores son adimensionales, siendo expresados en el modelo en forma de proporción decimal (no en formato porcentual).

Por otra parte, los valores de  $\gamma_{rij}^m$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido establecidos previamente como datos mediante  $\gamma min_{ij}^m$ ,  $\gamma max_{ij}^m$  y  $\gamma mod_{ij}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $\gamma_{rij}^m$  se desarrolla a partir de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de estas variables ( $U\gamma 1^m$ ) se asocia a la incertidumbre o aleatoriedad en las características generales de operación de cada modo  $m$  de transporte público, mientras que la segunda de ellas ( $U\gamma 2_{ij}$ ) hace referencia a la variabilidad aleatoria relacionada con las posibles características particulares de cada combinación de línea ( $i$ ) y

período horario ( $j$ ) en cuanto a la necesidades específicas de incluir en el ciclo de operación un mayor o menor tiempo de terminal. A continuación se han de combinar los valores de ambas variables aleatorias primigenias por medio de su semisuma, con lo que se obtienen los respectivos valores de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Con este procedimiento, fijado un determinado modo  $m$  de transporte público, los valores aleatorios de la distribución de partida correspondientes a duplas distintas de línea ( $i$ ) y período horario ( $j$ ) se correlacionan entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias a realizar (con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Por otra parte, fijada una determinada combinación de línea ( $i$ ) y período horario ( $j$ ), los valores aleatorios que corresponden a los diferentes modos  $m$  de transporte público también se encuentran correlacionados entre sí en la serie de simulaciones (de nuevo con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Tras haber obtenido los valores aleatorios  $TR\gamma_{rij}^m$  de la distribución triangular de partida, se ha de realizar la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $\gamma_{min_{ij}}^m$ , máximo  $\gamma_{max_{ij}}^m$  y moda  $\gamma_{mod_{ij}}^m$ ). Para ello se debe aplicar la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

Así pues, el proceso se sintetiza mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$U\gamma 1^m \sim U(0,1) \longrightarrow U\gamma 1_r^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.31.a.i)$$

$$U\gamma 2_{ij} \sim U(0,1) \longrightarrow U\gamma 2_{rij} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.31.a.ii)$$

$$TR\gamma_{rij}^m = (U\gamma 1_r^m + U\gamma 2_{rij}) / 2 \quad (6.31.b)$$

$$\gamma_{rij}^m = \text{triang}^{\text{II}}(TR\gamma_{rij}^m \mid \gamma_{min_{ij}}^m, \gamma_{max_{ij}}^m, \gamma_{mod_{ij}}^m) \quad (6.31.c)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.3. Variables relativas a la división del horizonte temporal de evaluación en fases o etapas

#### 6.3.3.1. Aleatorización de la velocidad media de avance en la implantación, en cada línea, de los nuevos modos de transporte público

La variable  $Vimp_{ri}^s$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la velocidad media de avance de la implantación, en la línea  $i$ , del nuevo modo de transporte público proyectado para el escenario  $s$ . Esta variable es expresada en el modelo en forma de número de kilómetros por año [km/a].

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $Vimp_{ri}^s$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ser concordantes con una determinada distribución triangular de probabilidad, de la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $Vimpmin_i^s$ ,  $Vimpmax_i^s$  y  $Vimpmod_i^s$ .

La generación de valores aleatorios para  $Vimp_{ri}^s$  se ha desarrollado a partir de dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UVimp1^s$ ) ha sido configurada de tal forma que, en cada simulación aleatoria, tome valores propios para cada uno de los escenarios ( $s=R$  o  $s=B$ ) en los que se procede a la implantación del nuevo modo de transporte público. Esta primera variable estaría reflejando por tanto la aleatoriedad en la influencia de las características generales de cada uno de los dos nuevos modos a implantar (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT), independientemente de la línea en cuestión. Por su parte, la segunda de estas variables aleatorias ( $UVimp2_i$ ) se relacionaría precisamente con la variabilidad o incertidumbre relativa a la influencia de las características particulares de cada línea (por ejemplo, estructura de la trama urbana, características del

viario, servicios urbanos afectados, infraestructuras singulares que es necesario atravesar, etc.) sobre el ritmo o velocidad de avance en la implantación de cualquiera de los dos nuevos modos. Por tanto, en cada simulación aleatoria recibe valores distintos para cada línea ( $i$ ) sin distinción entre modos o escenarios. En el siguiente paso se efectúa la combinación de los respectivos valores de ambas variables por medio de su semisuma, con lo que se da lugar a las distribuciones triangulares de partida (con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Uno de los efectos conseguidos a través de este procedimiento es que, dado un determinado modo a implantar ( $y$ , por tanto, fijado el índice de escenario  $s$ ), los valores aleatorios asignados a las distintas líneas se correlacionan entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se efectúen (con coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Por otra parte, dada una determinada línea (es decir, fijado el índice  $i$ ), los respectivos valores aleatorios correspondientes a los dos escenarios ('R' y 'B') también presentan una correlación entre sí (con coeficiente de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Finalmente, tras haber obtenido los valores  $TRVimp_{ri}^s$  de la distribución triangular de partida, se ha de proceder a la transformación de los mismos a la distribución triangular final (de mínimo  $Vimpmin_i^s$ , máximo  $Vimpmax_i^s$  y moda  $Vimpmod_i^s$ ) por medio de la función triang<sup>II</sup>.

En conclusión, el procedimiento aplicado se resume mediante las siguientes ecuaciones:

$$UVimp1^s \sim U(0, 1) \longrightarrow UVimp1_r^s = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.32.a.i)$$

$$UVimp2_i \sim U(0, 1) \longrightarrow UVimp2_{ri} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.32.a.ii)$$

$$TRVimp_{ri}^s = (UVimp1_r^s + UVimp2_{ri}) / 2 \quad (6.32.b)$$

$$Vimp_{ri}^s = \text{triang}^{II}(TRVimp_{ri}^s | Vimpmin_i^s, Vimpmax_i^s, Vimpmod_i^s) \quad (6.32.c)$$

con:

$$s \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.3.2. Aleatorización de la duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público

La variable  $Nic_r^s$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la duración (en años) de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público implantado en el caso del escenario  $s$ .

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $Nic_r^s$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una determinada distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente especificados mediante los correspondientes datos ( $Nicmin^s$ ,  $Nicmax^s$  y  $Nicmod^s$ , respectivamente).

También en este caso se desarrolla el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $Nic_r^s$  mediante el empleo de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas sobre el intervalo (0,1). La primera de dichas variables ( $UNic1$ ) se diseña al objeto de que, en cada simulación aleatoria, su valor se utilice de manera compartida para los dos escenarios en los que se introduce el servicio de un nuevo modo de transporte público. Se procura reflejar de esta forma la aleatoriedad o variabilidad relacionada con la posible influencia común de las características generales de la población de potenciales viajeros sobre la duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público, siendo aquellas independientes de cuál sea el nuevo modo que haya sido implantado. Por otra parte, la segunda variable aleatoria primigenia ( $UNic2^s$ ) toma, en cada simulación, valores específicos para cada uno de los dos escenarios, introduciendo con ello una fuente de variabili-

dad aleatoria concerniente a las características propias de cada uno de estos dos sistemas de transporte público que podrían influir sobre la celeridad con la que se desarrolla la fase de introducción y consolidación.

Se deben combinar a continuación los respectivos valores de estas dos variables aleatorias primigenias mediante su semisuma, lo cual conduce a la obtención de las distribuciones triangulares de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto obtenido como resultado es que, a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias, los sucesivos valores extraídos de dichas distribuciones para cada uno de estos dos escenarios (implantación de metro ligero o tranvía, y de BHLS o BRT) se correlacionan entre sí, presentando un coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

Por último, una vez calculados los valores  $TRNic_r^s$  de la distribución triangular de partida, tan solo resta transformar dichos valores a la distribución triangular final (de mínimo  $Nicmin^s$ , máximo  $Nicmax^s$  y moda  $Nicmod^s$ ), para lo que procede aplicar la función triang<sup>II</sup>.

En resumen, el procedimiento llevado a cabo se define a través del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UNic1 \sim U(0, 1) \longrightarrow UNic1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.33.a.i)$$

$$UNic2^s \sim U(0, 1) \longrightarrow UNic2_r^s = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.33.a.ii)$$

$$TRNic_r^s = (UNic1_r + UNic2_r^s) / 2 \quad (6.33.b)$$

$$Nic_r^s = \text{triang}^{II}(TRNic_r^s \mid Nicmin^s, Nicmax^s, Nicmod^s) \quad (6.33.c)$$

con:

$$s \in \{R, B\} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.4. Variables relativas a la movilidad y el reparto modal en los corredores o itinerarios afectados

#### 6.3.4.1. Aleatorización de la evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público

La variable  $iPcp_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación anual media, en puntos porcentuales, de la fracción o proporción que los viajes realizados en transporte público por usuarios cautivos del mismo representan sobre el conjunto general de desplazamientos efectuados en cualquiera de las opciones modales contempladas, de acuerdo a las posibles previsiones disponibles o llevadas a cabo para los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los distintos valores obtenidos de  $iPcp_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben adaptarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que los parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos por medio de  $iPcpmin_{ijk}$ ,  $iPcpmax_{ijk}$  e  $iPcpmod_{ijk}$ .

En el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $iPcp_{rijk}$  se opta por la utilización de una única variable aleatoria primigenia uniformemente distribuida en el intervalo  $(0,1)$ , que se aplica de forma común a todas las combinaciones de corredor, itinerario o trayecto de línea ( $i$ ), sentido de viaje ( $k$ ) y período horario ( $j$ ). Esto implica que, para cada una de las simulaciones aleatorias individualizadas, el efecto puramente aleatorio sobre los valores de la variación anual media de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público tendrá la misma intensidad (en relación a sus

distribuciones particularizadas con parámetros  $iPcpmin_{ijk}$ ,  $iPcpmax_{ijk}$  e  $iPcpmod_{ijk}$ ) para cualquiera de estas combinaciones de trayecto de línea, sentido de viaje y período horario. Es decir, en cada simulación aleatoria las proyecciones efectuadas sobre dicha variación anual media van a resultar igual de sesgadas —ya sea por exceso o por defecto— con respecto al valor realmente extraído. Este criterio se aplica en consideración de que los principales factores o circunstancias futuras impredecibles o de naturaleza aleatoria que pueden influir sobre la proporción de viajes efectuados por usuarios cautivos del transporte público afectarán de forma bastante similar a toda el área de estudio (distintas líneas y sentidos) y a los diferentes períodos horarios. Por ejemplo, entre estos factores o circunstancias futuras sometidas a incertidumbre y con efectos sensiblemente sistémicos podría destacarse la evolución general de las tendencias sociales hacia la posesión o no de vehículos motorizados particulares, o la influencia de los ciclos económicos en dicha posesión.

A continuación, a partir de la distribución uniforme de partida en el intervalo (0,1) se debe efectuar la transformación de valores a la distribución triangular final (con mínimo  $iPcpmin_{ijk}$ , máximo  $iPcpmax_{ijk}$  y moda  $iPcpmod_{ijk}$ ). Este tipo de transformación se realiza mediante la función  $triang^1$ .

En resumen, se aplican en este procedimiento las ecuaciones siguientes:

$$UiPcp \sim U(0,1) \longrightarrow UiPcp_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.34.a)$$

$$iPcp_{rijk} = \text{triang}^1(UiPcp_r \mid iPcpmin_{ijk}, iPcpmax_{ijk}, iPcpmod_{ijk}) \quad (6.34.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.3.4.2. Aleatorización de la evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual

La variable  $iPco^m_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación anual media, en puntos porcentuales, de la fracción o proporción que los viajes efectuados por viajeros cautivos del modo  $m$  de transporte privado o individual constituyen con respecto al conjunto general de desplazamientos realizados en cualquiera de las opciones modales contempladas, de acuerdo a las posibles previsiones disponibles o llevadas a cabo para los viajes que se desarrollan sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

En el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $iPco^m_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben componer una distribución triangular de probabilidad, de la cual se han establecido como datos sus correspondientes parámetros de mínimo ( $iPcomin^m_{ijk}$ ), máximo ( $iPcomax^m_{ijk}$ ) y moda ( $iPcomod^m_{ijk}$ ).

El procedimiento de generación de los distintos valores aleatorios de  $iPco^m_{rijk}$  va a estar basado en la combinación de una determinada pareja de variables aleatorias primigenias, cada una de las cuales está uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

En primer lugar, una de estas variables uniformes ( $UiPco1^m$ ) se configura de tal forma que tome valores aleatorios independientes para la variación futura de la proporción de viajes realizada por cautivos de cada uno de los modos  $m$  de transporte privado o individual, aplicándose cada uno de dichos valores —al igual que en el caso de la evolución de los viajes atribuibles a usuarios cautivos del transporte público— de manera común a todas las posibles combinaciones entre corredor, eje o itinerario coincidente con una línea ( $i$ ) de transporte público, sentido de viaje ( $k$ ) y período horario ( $j$ ). En consonancia con el caso de los usuarios cautivos del transporte público, este criterio de indistinción aleatoria entre corredores o itinerarios, sentidos de viaje y períodos horarios, responde al supuesto de que los factores o circunstan-

cias futuras más relevantes que, con carácter impredecible o aleatorio, puedan afectar a la proporción de viajes realizados por viajeros cautivos de cada uno de estos modos de transporte privado o individual actuarían de manera sensiblemente generalizada sobre toda el área de estudio (diferentes líneas y sentidos) y sobre los diversos períodos horarios, dejando que sean únicamente las diferentes previsiones particularizadas para el corredor o itinerario servido por cada línea, para cada período horario y para cada sentido de viaje las que introduzcan las diferencias entre las tasas de variación de la proporción de viajeros cautivos de cada modo correspondientes a distintas triplas de índices  $i,j,k$ .

Sin embargo, puede resultar fundado presuponer que se manifieste cierta correlación entre la evolución de las proporciones de viajes atribuibles a viajeros cautivos de aquellas opciones modales que, en relación con este aspecto, presenten determinadas características comunes o compartidas, como sería el caso, por una parte, de los modos motorizados privados (automóvil particular y moto o ciclomotor) y, por otro lado, de los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’ (bicicleta o pequeños vehículos urbanos de movilidad personal, y modo peatonal). Atendiendo a este planteamiento, se incorporan en el procedimiento de generación de valores dos nuevas variables aleatorias independientes uniformemente distribuidas. Una de ellas ( $UiPco2m$ ) se diseña de tal modo que, en cada simulación aleatoria, reciba valores específicos para la categoría de modos motorizados privados (es decir, valores aplicables conjuntamente tanto a automóvil particular como a moto o ciclomotor). Por su parte, los respectivos valores aleatorios extraídos de la otra variable ( $UiPco2n$ ) están destinados a ser aplicados a la categoría de modos no motorizados y de ‘micromovilidad’, empleándose por tanto de forma compartida para las opciones modales de bicicleta o vehículo de movilidad personal y de viaje a pie. Obsérvese, en cualquier caso, que se ha optado por no introducir tampoco mediante estas nuevas variables efectos aleatorios que afecten específicamente a cada corredor, eje o itinerario, sentido de viaje y período horario.

El siguiente paso radica en combinar, mediante la semisuma de sus respectivos valores, cada par de variables aleatorias primigenias:  $UiPco1^m$  con  $UiPco2m$  en el caso de los modos automóvil particular ( $m=C$ ) y moto o ciclomotor ( $m=M$ ), y  $UiPco1^m$  con  $UiPco2n$  para las opciones modales de bicicleta o vehículo de movilidad personal ( $m=V$ ) y de viaje peatonal ( $m=P$ ). Se obtienen de esta forma los valores aleatorios de las correspondientes distribuciones triangulares de partida (cada una de ellas de mínimo 0, máximo 1 y moda  $1/2$ ). De todo ello se deriva, por un lado, que el efecto puramente aleatorio sobre los valores de la variación anual media de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de un determinado modo vaya a tener, dada una simulación aleatoria en particular, la misma magnitud relativa (con respecto a sus distribuciones particulares con parámetros  $iPcomin_{ijk}^m$ ,  $iPcomax_{ijk}^m$  e  $iPcomod_{ijk}^m$ ) para cualquier posible combinación de corredor o itinerario, sentido de viaje y período horario. Por otra parte, se origina de esta forma que los valores aleatorios que se utilicen para calcular las tasas de variación anual de las proporciones de viajes atribuibles a viajeros cautivos de cada uno de los dos modos incluidos en una misma categoría (modos motorizados privados: automóvil particular y moto o ciclomotor; modos no motorizados y de ‘micromovilidad’: bicicleta o vehículo de movilidad personal y modo peatonal) vayan a correlacionarse entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias, con un coeficiente de correlación de Pearson de  $1/2$ .

Para completar el procedimiento, una vez que se hayan obtenido los valores aleatorios  $TRiPco_r^m$  de las distribuciones triangulares de partida, solo resta llevar a cabo la transformación de dichos valores a sus respectivas distribuciones triangulares finales (en cada caso con mínimo  $iPcomin_{ijk}^m$ , máximo  $iPcomax_{ijk}^m$  y moda  $iPcomod_{ijk}^m$ ). Corresponde aplicar a tal objeto la función triang<sup>II</sup>.

Así pues, el procedimiento planteado puede resumirse mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UiPco1^m \sim U(0, 1) \longrightarrow UiPco1_r^m = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.35.a)$$

Para modos motorizados privados:

$$UiPco2m \sim U(0, 1) \longrightarrow UiPco2m_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.35.b.i)$$

Para modos no motorizados y de ‘micromovilidad’:

$$UiPco2n \sim U(0, 1) \longrightarrow UiPco2n_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.35.b.ii)$$

Si  $m \in \{C, M\}$ :

$$TRiPco_r^m = (UiPco1_r^m + UiPco2m_r) / 2 \quad (6.35.c.i)$$

Si  $m \in \{V, P\}$ :

$$TRiPco_r^m = (UiPco1_r^m + UiPco2n_r) / 2 \quad (6.35.c.ii)$$

Para cualquier modo  $m \in \{C, M, V, P\}$ :

$$iPco_{rijk}^m = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPco_r^m \mid iPcomin_{ijk}^m, iPcomax_{ijk}^m, iPcomod_{ijk}^m) \quad (6.35.d)$$

A lo largo de esta serie de ecuaciones (6.35.a a 6.35.d), los índices utilizados  $(m, i, j, k, r)$  adoptan las siguientes combinaciones de valores:

$$m \in \{C, M, V, P\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.4.3. Aleatorización de la evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos (ajenos a los costes de transporte o atributos de viaje)

La variable  $IQex_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la tasa media de variación anual del volumen total de viajes por hora efectuados mediante cualquiera de las opciones modales de transporte sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , si dicha variación estuviese causada exclusivamente por factores identificados como exógenos al modelo. Esta tasa de variación se expresa en el modelo en forma de porcentaje (%).

Por otra parte, en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $IQex_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de formar una distribución triangular de probabilidad, con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido previamente establecidos como datos mediante  $IQexmin_{ijk}$ ,  $IQexmax_{ijk}$  e  $IQexmod_{ijk}$ .

Al igual que en el caso de la evolución de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público, el procedimiento de generación de valores aleatorios para  $IQex_{rijk}$  se desarrolla a partir de una única variable aleatoria primigenia, distribuida uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ , la cual se aplica de forma común para todas las posibles combinaciones de itinerario de línea ( $i$ ), sentido de viaje ( $k$ ) y período horario ( $j$ ). Esto conlleva que, en cada simulación aleatoria, las predicciones realizadas sobre dicha tasa de variación resultarán igual de sesgadas (por exceso o por defecto) con respecto al valor realmente extraído, para cualquiera de estas combinaciones de corredor, eje o itinerario, sentido de viaje y período horario. De nuevo, la adopción de este criterio se relaciona con el supuesto de que los principales condicionantes o factores futuros de carácter impredecible o aleatorio que podrían influir sobre la evolución (por circunstancias exógenas a las condiciones de transporte) del volumen total de viajes afecten de un modo sensiblemente similar al conjunto del área de estudio (distintas líneas y sentidos) y a los diferentes períodos horarios.

Finalmente, desde la distribución uniforme de partida se ha de realizar la transformación de valores a la distribución triangular final (mínimo  $IQexmin_{ijk}$ , máximo  $IQexmax_{ijk}$  y moda  $IQexmod_{ijk}$ ), para lo cual procede aplicar la función  $\text{triang}^{\text{I}}$ .

Estos pasos se resumen mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:



$$UIQex \sim U(0, 1) \longrightarrow UIQex_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.36.a)$$

$$IQex_{rijk} = \text{triang}^1(UIQex_r \mid IQexmin_{ijk}, IQexmax_{ijk}, IQexmod_{ijk}) \quad (6.36.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5. Variables relativas a las condiciones de circulación de vehículos motorizados en tráfico mixto

#### 6.3.5.1. Aleatorización de la velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico

La variable  $VF_{C_{rik}}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la velocidad promedio de trayecto (incluyendo demoras generadas en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del flujo) en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto, para automóviles particulares que recorran el corredor, eje o itinerario sobre el que presta servicio la línea  $i$  en el sentido de viaje  $k$ .

Paralelamente, la variable  $VF_{m_{rik}}$  presenta un significado análogo al de  $VF_{C_{rik}}$ , pero referido en este caso a motos y ciclomotores en lugar de a automóviles particulares.

Finalmente, la variable  $VF_{b_{rik}}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la velocidad promedio de trayecto (incluyendo demoras generadas en intersecciones y otros puntos de posible interrupción del flujo, así como las deceleraciones y aceleraciones para realizar las detenciones en todas las paradas) en condiciones de volumen nulo de tráfico mixto, para autobuses convencionales que realicen el recorrido de la línea  $i$  en el sentido  $k$ .

Estas variables se expresan numéricamente en el modelo en kilómetros por hora [km/h], en cualquiera de los tres casos. Por otra parte, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $VF_{C_{rik}}$ , de  $VF_{m_{rik}}$  y de  $VF_{b_{rik}}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a sus respectivas distribuciones triangulares de probabilidad, caracterizadas previamente como datos mediante sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $VF_{cmin_{ik}}$ ,  $VF_{cmax_{ik}}$  y  $VF_{cmod_{ik}}$  en el caso de los automóviles particulares;  $VF_{mmin_{ik}}$ ,  $VF_{mmax_{ik}}$  y  $VF_{mmod_{ik}}$  para la opción de motos o ciclomotores; y  $VF_{bmin_{ik}}$ ,  $VF_{bmax_{ik}}$  y  $VF_{bmod_{ik}}$  en el caso de los autobuses convencionales en tráfico mixto).

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $VF_{C_{rik}}$ ,  $VF_{m_{rik}}$  y  $VF_{b_{rik}}$  se va a basar, en cada uno de los tres casos, en la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1).

La primera de estas variables ( $UVF_{ik}$ ) se establece de forma que sea común a cualquiera de las tres variantes modales en tráfico mixto (automóvil particular, moto o ciclomotor y autobús convencional), resultando propia de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios sobre los que prestan servicio las líneas analizadas. Por tanto, se define con valores aleatorios distintos para cada dupla de índice de línea ( $i$ ) y de sentido de recorrido ( $k$ ). Por su parte, las segundas de dichas variables aleatorias primigenias ( $UVF_c$ ,  $UVF_m$  y  $UVF_b$ ) se definen de modo que presenten valores propios para cada una de estas tres variantes modales de circulación en tráfico mixto, sin distinción entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido.

El siguiente paso consiste en combinar, mediante su semisuma, los respectivos valores de cada par de variables aleatorias primigenias ( $UVF_{ik}$  con  $UVF_c$  para automóvil particular;  $UVF_{ik}$  con  $UVF_m$  para motos y ciclomotores; y  $UVF_{ik}$  con  $UVF_b$  para autobús convencional en tráfico mixto). Se obtienen así los

valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida (todas ellas de mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). La propiedad resultante es que, dado un determinado corredor, eje o itinerario en un cierto sentido de recorrido (es decir, fijados los índices  $i$  y  $k$ ), los valores aleatorios asignados a las distintas variantes modales en tráfico mixto (automóvil particular, moto o ciclomotor y autobús convencional) se correlacionan entre sí (de dos en dos) a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias a realizar (coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Por su parte, para cada una de estas tres variantes modales de tráfico mixto también existe correlación (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios correspondientes a diferentes corredores, ejes o itinerarios y sentidos de recorrido (es decir, a distintas duplas  $i,k$ ).

A continuación, una vez que se hayan obtenido los valores aleatorios  $TRVFc_{rik}$ ,  $TRVfm_{rik}$  y  $TRVfb_{rik}$  de cada distribución triangular de partida, se ha de proceder a la transformación de tales valores a las respectivas distribuciones triangulares finales. Para ello debe aplicarse, en cada uno de los casos, la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En síntesis, los procedimientos llevados a cabo se resumen matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UVF_{ik} \sim U(0,1) \longrightarrow UVF_{rik} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.37.a)$$

Para automóvil particular:

$$UVFc \sim U(0,1) \longrightarrow UVFc_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.37.b.i)$$

$$TRVFc_{rik} = (UVF_{rik} + UVFc_r) / 2 \quad (6.37.b.ii)$$

$$VFc_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TRVFc_{rik} \mid VFcmin_{ik}, VFcmax_{ik}, VFcmod_{ik}) \quad (6.37.b.iii)$$

Para moto o ciclomotor:

$$UVFm \sim U(0,1) \longrightarrow UVFm_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.37.c.i)$$

$$TRVfm_{rik} = (UVF_{rik} + UVFm_r) / 2 \quad (6.37.c.ii)$$

$$Vfm_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TRVfm_{rik} \mid Vfmmin_{ik}, Vfmmax_{ik}, Vfmmod_{ik}) \quad (6.37.c.iii)$$

Para autobús convencional en tráfico mixto:

$$UVFb \sim U(0,1) \longrightarrow UVFb_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.37.d.i)$$

$$TRVfb_{rik} = (UVF_{rik} + UVFb_r) / 2 \quad (6.37.d.ii)$$

$$Vfb_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TRVfb_{rik} \mid Vfbmin_{ik}, Vfbmax_{ik}, Vfbmod_{ik}) \quad (6.37.d.iii)$$

A lo largo de esta serie de ecuaciones (6.37.a a 6.37.d.iii), los índices utilizados ( $i,k,r$ ) toman las siguientes combinaciones de valores:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5.2. Aleatorización de la capacidad viaria inicial para tráfico mixto

La variable  $CMT^*_{rik}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , siendo recorridos en el sentido  $k$ , y dada la configuración actual o inicial (año base) de las infraestructuras

viarias. Las unidades en las que se expresa esta variable en el modelo son automóviles ligeros equivalentes (*Passenger Car Equivalent*) por hora [PCE/h] para cada sentido de viaje.

Además, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $CMT^*_{rik}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) se han de adaptar a una distribución triangular de probabilidad, con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido previamente definidos como  $CMTimin_{ik}$ ,  $CMTimax_{ik}$  y  $CMTimod_{ik}$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $CMT^*_{rik}$  se ha fundamentado en dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UCMTi1$ ) se ha planteado de tal forma que, en cada realización aleatoria, su valor se emplee de forma común para el conjunto de la red viaria del área de estudio, sin distinción específica entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido. Se puede interpretar por tanto, en cada simulación aleatoria, como la expresión de un cierto sesgo general o sistemático entre las estimaciones de capacidad realizadas y los valores de capacidad realmente utilizados en dicha simulación. Por su parte, la segunda de las variables aleatorias primigenias ( $UCMTi2_{ik}$ ) introduce una cierta variabilidad aleatoria propia de las características de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios sobre los que presten servicio las líneas analizadas. Por tanto, en cada simulación aleatoria recibe valores específicos distintos para cada dupla formada por los índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). A continuación se combinan los valores de ambas variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de los mismos, con lo que se da lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Obsérvese que, con este procedimiento, los valores aleatorios que corresponden a los diferentes corredores, ejes o itinerarios y/o a diferentes sentidos de recorrido (es decir, a distintas duplas  $i,k$ ) están correlacionados entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se realicen (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Tras haber obtenido los valores aleatorios  $TRCMTi_{rik}$  de la distribución triangular de partida, se debe efectuar la transformación de estos valores a la distribución triangular final (mínimo  $CMTimin_{ik}$ , máximo  $CMTimax_{ik}$  y moda  $CMTimod_{ik}$ ), aplicando para ello la función triang<sup>II</sup>.

El procedimiento llevado a cabo se rige, en resumen, por las siguientes ecuaciones:

$$UCMTi1 \sim U(0, 1) \longrightarrow UCMTi1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.38.a.i)$$

$$UCMTi2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow UCMTi2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.38.a.ii)$$

$$TRCMTi_{rik} = (UCMTi1_r + UCMTi2_{rik}) / 2 \quad (6.38.b)$$

$$CMT^*_{rik} = \text{triang}^{II}(TRCMTi_{rik} \mid CMTimin_{ik}, CMTimax_{ik}, CMTimod_{ik}) \quad (6.38.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5.3. Aleatorización de la capacidad viaria para tráfico mixto tras la implantación de los nuevos sistemas de transporte público

La variable  $CMTn^s_{rik}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la capacidad para tráfico mixto representativa del vial o viales de circulación en los que se inserta la línea  $i$ , siendo recorridos en el sentido  $k$ , dada la configuración de las infraestructuras viarias prevista en el escenario  $s$  tras la completa implantación del nuevo modo de transporte público en plataforma reservada. De nuevo, las unidades pertinentes para esta variable en el modelo son automóviles ligeros equivalentes por hora [PCE/h] en cada sentido de viaje.

Por otra parte, los valores de  $CMTn_{rik}^s$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido establecidos previamente como datos ( $CMTnmin_{ik}^s$ ,  $CMTnmax_{ik}^s$  y  $CMTnmod_{ik}^s$ ).

La generación de valores aleatorios para  $CMTn_{rik}^s$  se basa en dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ . La primera de ellas ( $UCMTn1^s$ ) se ha configurado de forma que sea propia de cada uno de los nuevos escenarios ( $s=R$  o  $s=B$ ). Estaría relacionada, por tanto, con las características generales de inserción de la infraestructura dedicada necesaria para cada uno de los nuevos modos de transporte público implantados en plataforma reservada y, en particular, con sus requerimientos de ocupación de espacio en la sección transversal del viario. Por su parte, la segunda de las variables aleatorias ( $UCMTn2_{rik}$ ) estaría vinculada a la variabilidad en las características particulares de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que prestan servicio las líneas analizadas, independientemente del nuevo modo a implantar. Por consiguiente, en cada simulación aleatoria adopta valores diferentes para cada dupla formada por los índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ), pero sin distinción entre escenarios 'R' y 'B'. El siguiente paso lleva a cabo la combinación de valores de ambas variables por medio de su semisuma, con lo que se origina la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto resultante consiste en que, dado un determinado corredor, eje o itinerario en un cierto sentido de recorrido (por tanto, fijados los índices  $i$  y  $k$ ), los valores aleatorios correspondientes a ambos escenarios ('R' y 'B') se correlacionan entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se realicen (con coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Complementariamente, para cada uno de estos dos escenarios también se produce una correlación (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios asignados a las diferentes combinaciones de corredor, eje o itinerario y sentido de recorrido (distintas duplas  $i,k$ ).

Finalmente, una vez que se hayan obtenido los valores  $TRCMTn_{rik}^s$  de la distribución triangular de partida, se efectúa la transformación de los mismos a la distribución triangular final (mínimo  $CMTnmin_{ik}^s$ , máximo  $CMTnmax_{ik}^s$  y moda  $CMTnmod_{ik}^s$ ) mediante la aplicación de la función triang<sup>II</sup>.

Así pues, el procedimiento se puede resumir mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UCMTn1^s \sim U(0, 1) \longrightarrow UCMTn1_r^s = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.39.a.i)$$

$$UCMTn2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow UCMTn2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.39.a.ii)$$

$$TRCMTn_{rik}^s = (UCMTn1_r^s + UCMTn2_{rik}) / 2 \quad (6.39.b)$$

$$CMTn_{rik}^s = \text{triang}^{II}(TRCMTn_{rik}^s \mid CMTnmin_{ik}^s, CMTnmax_{ik}^s, CMTnmod_{ik}^s) \quad (6.39.c)$$

con:

$$s \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.3.5.4. Aleatorización de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ de la fórmula BPR

##### 6.3.5.4.a. Parámetros $\alpha$

La variable  $\alpha_{f_{rik}}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del parámetro  $\alpha$  de la fórmula BPR aplicada al vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$  por vehículos motorizados de cuatro o más ruedas (automóviles particulares y autobuses convencionales en tráfico mixto).

Por su parte, la variable  $at_{rik}$  presenta un significado análogo al de  $af_{rik}$ , pero referido a la circulación de vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores) en lugar de a vehículos de cuatro o más ruedas.

Ambas variables son dimensionales. Además, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $af_{rik}$  y  $at_{rik}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a sus respectivas distribuciones triangulares de probabilidad. Estas han sido introducidas previamente mediante la definición, como datos, de sus parámetros de mínimo, máximo y moda:  $afmin_{ik}$ ,  $afmax_{ik}$  y  $afmod_{ik}$  en el caso de vehículos motorizados de cuatro o más ruedas, y  $atmin_{ik}$ ,  $atmax_{ik}$  y  $atmod_{ik}$  para la circulación de vehículos motorizados de dos ruedas.

De forma bastante similar al caso de las velocidades promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico, los procedimientos de generación de valores aleatorios de  $af_{rik}$  y  $at_{rik}$  van a estar basados, en ambos casos, en la combinación de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1).

La primera de estas variables aleatorias ( $U\alpha_{ik}$ ) se diseña de forma que su utilización sea común tanto a los vehículos motorizados de cuatro o más ruedas como a los de dos ruedas, considerándose propia de las características de la infraestructura vial sobre la que se desarrolle cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que prestan servicio las líneas objeto de estudio. Por ello, recibe en cada simulación valores aleatorios distintos para cada dupla de índice de línea ( $i$ ) y de sentido de recorrido ( $k$ ). Por otra parte, el segundo tipo de variables aleatorias primigenias ( $Uaf$  y  $Uat$ ) se configuran de tal modo que presenten valores propios para cada una de las dos clases generales de vehículos motorizados que se han distinguido al respecto (de cuatro o más ruedas y de dos ruedas), pero sin diferenciación entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido.

La siguiente operación consiste en combinar, mediante la semisuma de sus valores, cada par de variables aleatorias primigenias ( $U\alpha_{ik}$  con  $Uaf$  para la circulación de vehículos de cuatro o más ruedas; y  $U\alpha_{ik}$  con  $Uat$  para los motorizados de dos ruedas). Se obtienen así los valores de las distribuciones triangulares de partida (con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$  en ambos casos). El efecto obtenido es que, dado un determinado corredor, eje o itinerario con un cierto sentido de recorrido (esto es, fijados los índices  $i$  y  $k$ ), los valores aleatorios correspondientes a estas dos clases generales de vehículos motorizados están correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ). Paralelamente, para cada una de las clases generales de vehículos motorizados se presenta también correlación (coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios empleados para los distintos corredores, ejes o itinerarios y sentidos de recorrido (es decir, a diferentes duplas  $i,k$ ).

Por último, a partir de los valores  $TRaf_{rik}$  y  $TRat_{rik}$  de las correspondientes distribuciones triangulares de partida, se debe efectuar la transformación de dichos valores a las respectivas distribuciones triangulares finales (con  $afmin_{ik}$ ,  $afmax_{ik}$  y  $afmod_{ik}$  como mínimo, máximo y moda en el caso de vehículos motorizados de cuatro o más ruedas, y  $atmin_{ik}$ ,  $atmax_{ik}$  y  $atmod_{ik}$  para los vehículos motorizados de dos ruedas). Este tipo de transformación se realiza mediante la función triang<sup>II</sup>.

En resumen, el procedimiento seguido se sistematiza mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$U\alpha_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow U\alpha_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.40.a)$$

Para vehículos motorizados de cuatro o más ruedas (automóviles particulares y autobuses):

$$Uaf \sim U(0, 1) \longrightarrow Uaf_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.40.b.i)$$

$$TRaf_{rik} = (U\alpha_{rik} + Uaf_r) / 2 \quad (6.40.b.ii)$$

$$\alpha f_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TR\alpha f_{rik} \mid \alpha f_{min_{ik}}, \alpha f_{max_{ik}}, \alpha f_{mod_{ik}}) \quad (6.40.b.iii)$$

Para vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores):

$$U\alpha t \sim U(0, 1) \longrightarrow U\alpha t_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.40.c.i)$$

$$TR\alpha t_{rik} = (U\alpha_{rik} + U\alpha t_r) / 2 \quad (6.40.c.ii)$$

$$\alpha t_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TR\alpha t_{rik} \mid \alpha t_{min_{ik}}, \alpha t_{max_{ik}}, \alpha t_{mod_{ik}}) \quad (6.40.c.iii)$$

A lo largo de esta serie de ecuaciones (6.40.a a 6.40.c.iii), los índices en ellas presentes ( $i, k, r$ ) han de adoptar los siguientes valores:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5.4.b. Parámetros $\beta$

La variable  $\beta f_{rik}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del parámetro  $\beta$  de la fórmula BPR aplicada al vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$  por vehículos motorizados de cuatro o más ruedas (automóviles particulares y autobuses convencionales en tráfico mixto).

Por otra parte, la variable  $\beta t_{rik}$  tiene un significado análogo al de  $\beta f_{rik}$ , pero definido para la circulación de vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores) en lugar de para vehículos de cuatro o más ruedas.

Se trata, en ambos casos, de variables de tipo adimensional. Además, los valores de  $\beta f_{rik}$  y  $\beta t_{rik}$  deben adaptarse, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ), a sus respectivas distribuciones triangulares de probabilidad, previamente caracterizadas —a modo de datos— mediante sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $\beta f_{min_{ik}}$ ,  $\beta f_{max_{ik}}$  y  $\beta f_{mod_{ik}}$  para el caso de vehículos motorizados de cuatro o más ruedas;  $\beta t_{min_{ik}}$ ,  $\beta t_{max_{ik}}$  y  $\beta t_{mod_{ik}}$  en el caso de vehículos motorizados de dos ruedas).

Los procedimientos de generación de valores aleatorios para  $\beta f_{rik}$  y  $\beta t_{rik}$  son totalmente semejantes —en cuanto a estructura y criterios considerados— a los desarrollados anteriormente en el caso de  $\alpha f_{rik}$  y  $\alpha t_{rik}$ , sin más que reemplazar toda referencia al parámetro  $\alpha$  por el parámetro  $\beta$ . Es por ello que no se entra en más detalles explicativos sobre dichos procedimientos, que en cualquier caso quedan resumidos mediante la siguiente serie de ecuaciones:

$$U\beta_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow U\beta_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.41.a)$$

Para vehículos motorizados de cuatro o más ruedas (automóviles particulares y autobuses):

$$U\beta f \sim U(0, 1) \longrightarrow U\beta f_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.41.b.i)$$

$$TR\beta f_{rik} = (U\beta_{rik} + U\beta f_r) / 2 \quad (6.41.b.ii)$$

$$\beta f_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TR\beta f_{rik} \mid \beta f_{min_{ik}}, \beta f_{max_{ik}}, \beta f_{mod_{ik}}) \quad (6.41.b.iii)$$

Para vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores):

$$U\beta t \sim U(0, 1) \longrightarrow U\beta t_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.41.c.i)$$

$$TR\beta t_{rik} = (U\beta_{rik} + U\beta t_r) / 2 \quad (6.41.c.ii)$$

$$\beta t_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TR\beta t_{rik} \mid \beta tmin_{ik}, \beta tmax_{ik}, \beta tmod_{ik}) \quad (6.41.c.iii)$$

con los valores de los índices  $(i,k,r)$  que se señalan a continuación para todo este grupo de ecuaciones (6.41.a a 6.41.c.iii):

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5.5. Aleatorización de los factores de conversión a automóviles ligeros equivalentes

#### 6.3.5.5.a. Autobuses

La variable  $EFb_{rik}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de conversión —a efectos de incidencia sobre las variables de tráfico— de vehículos de tipo autobús a automóviles ligeros equivalentes (PCE), a aplicar a las características del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de la línea  $i$ , cuando aquellos son recorridos en el sentido  $k$ . Los valores de esta variable son adimensionales (estrictamente, automóviles ligeros equivalentes por cada vehículo de tipo autobús [PCE/veh]).

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $EFb_{rik}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido previamente definidos como  $EFbmin_{ik}$ ,  $EFbmax_{ik}$  y  $EFbmod_{ik}$ .

Para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $EFb_{rik}$  se ha optado por recurrir a dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo  $(0,1)$ . La primera de ellas ( $UEFb1$ ) se ha configurado de tal modo que, en cada realización aleatoria, su valor se aplique de forma común al conjunto de la red viaria del área de estudio, sin una distinción específica entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido. Su inclusión podría considerarse, por tanto, como el reflejo de un cierto sesgo general o sistemático que afecte, dentro de cada simulación aleatoria, a todos los factores de conversión entre autobuses y automóviles ligeros equivalentes. Por su parte, la segunda variable primigenia ( $UEFb2_{ik}$ ) incorpora aquella variabilidad aleatoria relacionada con la incertidumbre o falta de información sobre las características del vial o viales de circulación sobre los que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que prestan servicio las líneas analizadas. En consecuencia, recibe en cada simulación aleatoria valores específicos distintos para cada dupla formada por los índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). A continuación se han de combinar los valores de ambas variables aleatorias primigenias por medio de su semisuma, dando lugar con ello a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). De esta forma, los valores aleatorios correspondientes a los distintos corredores, ejes o itinerarios y sentidos de recorrido (es decir, a diferentes duplas  $i,k$ ) se correlacionan entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias (con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ).

Finalmente, una vez obtenidos los valores aleatorios  $TREFb_{rik}$  de la distribución triangular de partida, se debe proceder a la transformación de tales valores a la distribución triangular final (mínimo  $EFbmin_{ik}$ , máximo  $EFbmax_{ik}$  y moda  $EFbmod_{ik}$ ). Para ello se aplica simplemente la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, el procedimiento llevado a cabo se rige por las siguientes ecuaciones:

$$UEFb1 \sim U(0, 1) \longrightarrow UEFb1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.42.a.i)$$

$$UEFb2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow UEFb2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.42.a.ii)$$

$$TREFb_{rik} = (UEFb1_r + UEFb2_{rik}) / 2 \quad (6.42.b)$$

$$EFb_{rik} = \text{triang}^{\text{II}}(TREFb_{rik} \mid EFbmin_{ik}, EFbmax_{ik}, EFbmod_{ik}) \quad (6.42.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.5.5.b. Motos y ciclomotores

La variable  $EFm_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de conversión (a efectos de incidencia sobre las variables de tráfico) de vehículos de tipo moto o ciclomotor a automóviles ligeros equivalentes (PCE). Constituye una variable de tipo adimensional (estrictamente, automóviles ligeros equivalentes por cada vehículo de tipo moto o ciclomotor [PCE/veh]).

Por otra parte, los valores de  $EFm_r$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido previamente establecidos como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $EFmmin$ ,  $EFmmax$  y  $EFmmod$ ).

Debido a las características de la propia variable y de su estructura de datos (que no incorpora distribuciones diferenciadas según las características y sentido de recorrido del vial o viales de circulación que sirven de soporte físico al trayecto de cada línea, sino que propone una única distribución y por consiguiente un único valor para el conjunto de la red), resulta suficiente con adoptar una sola variable aleatoria primigenia –distribuida uniformemente en el intervalo (0,1)– para el proceso de generación de valores aleatorios de  $EFm_r$ .

Una vez extraídos los  $Nrs$  valores aleatorios de la variable primigenia ( $UEFm$ ), se ha de proceder a la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (con mínimo  $EFmmin$ , máximo  $EFmmax$  y moda  $EFmmod$ ). Esta transformación requiere la aplicación de la función  $\text{triang}^1$ .

Así pues, los procedimientos efectuados se resumirían mediante las siguientes ecuaciones:

$$UEFm \sim U(0, 1) \longrightarrow UEFm_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.43.a)$$

$$EFm_r = \text{triang}^1(UEFm_r \mid EFmmin, EFmmax, EFmmod) \quad (6.43.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

## 6.3.6. Variables relativas a las características adicionales de los viajes realizados en vehículo motorizado privado

### 6.3.6.1. Aleatorización del ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el corredor o itinerario en los desplazamientos realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de viaje por pasajero del transporte público

La variable  $lp_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  por parte de los viajes en vehículo motorizado privado efectuados durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , y la longitud media de desplazamiento de los pasajeros de la línea de transporte público en los viajes realizados en el mismo período horario y en el mismo sentido. Se trata, por tanto, de una variable adimensional.

Además, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $lp_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, en la que los parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $lpmin_{ijk}$ ,  $lpmax_{ijk}$  y  $lpmod_{ijk}$ .



La generación de valores aleatorios para  $lp_{rijk}$  se ha basado en dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1). El efecto que se ha pretendido representar es que exista un cierto nivel de correlación entre aquellos valores aleatorios utilizados para este ratio o razón que correspondan a un mismo corredor, eje o itinerario. Por tanto, la primera de las variables aleatorias primigenias ( $Ulp1_i$ ) se ha definido de tal modo que, en cada simulación aleatoria, su valor particular esté asociado a cada índice de línea ( $i$ ). La segunda de estas variables primigenias ( $Ulp2_{ijk}$ ) incorpora –para cada uno de estos corredores, ejes o itinerarios (vinculado a un determinado índice de línea  $i$ )– la variabilidad aleatoria correspondiente a diferentes períodos horarios ( $j$ ) y sentidos de viaje ( $k$ ). A continuación se combinan los valores de ambas variables primigenias mediante su semisuma, dando lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Nótese que, mediante el procedimiento seguido, se origina una correlación (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios asignados a un mismo corredor, eje o itinerario (mismo índice  $i$ ), pero no entre aquellos valores aleatorios que aunque compartan índices de período horario ( $j$ ) y de sentido ( $k$ ) pertenecen a diferentes corredores, ejes o itinerarios (por tanto, con distinto índice  $i$ ).

Por último, sobre los valores aleatorios  $TRlp_{rijk}$  obtenidos de la distribución triangular de partida se ha de efectuar la transformación a la distribución triangular final (mínimo  $lpmin_{ijk}$ , máximo  $lpmax_{ijk}$  y moda  $lpmod_{ijk}$ ), para lo que se les aplica simplemente la función triang<sup>II</sup>.

Por tanto, el procedimiento llevado a cabo se resume matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Ulp1_i \sim U(0,1) \longrightarrow Ulp1_{ri} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.44.a.i)$$

$$Ulp2_{ijk} \sim U(0,1) \longrightarrow Ulp2_{rijk} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.44.a.ii)$$

$$TRlp_{rijk} = (Ulp1_{ri} + Ulp2_{rijk}) / 2 \quad (6.44.b)$$

$$lp_{rijk} = \text{triang}^{II}(TRlp_{rijk} \mid lpmin_{ijk}, lpmax_{ijk}, lpmod_{ijk}) \quad (6.44.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.6.2. Aleatorización de la contribución de vehículos realizando viajes pasantes al ratio Volumen/Capacidad

La variable  $EEVC_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la fracción o proporción de la capacidad representativa del vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$  que es ocupada por vehículos (expresados en automóviles ligeros equivalentes, PCE) que realizan viajes pasantes durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable es de tipo adimensional, siendo expresada en el modelo en forma de proporción decimal.

Por otra parte, en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $EEVC_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adaptarse a una distribución triangular de probabilidad, con unos parámetros de mínimo, máximo y moda que han sido previamente establecidos como datos mediante  $EEVCmin_{ijk}$ ,  $EEVCmax_{ijk}$  y  $EEVCmod_{ijk}$ .

El procedimiento adoptado para la generación de valores aleatorios de  $EEVC_{rijk}$  sigue el mismo tipo de estructura que el desarrollado anteriormente para la variable  $lp_{rijk}$ , ya que se opta por reproducir un cierto grado de correlación entre aquellos valores aleatorios que correspondan a un mismo corredor, eje o itinerario. Así pues, se emplean de nuevo dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniforme-

mente en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UEE1_i$ ) se ha configurado al objeto de que su valor esté particularizado, en cada simulación aleatoria, para cada índice asociado al itinerario de una línea ( $i$ ). La otra variable primigenia ( $UEE2_{ijk}$ ) añade —para cada corredor, eje o itinerario representado por un índice de línea  $i$ — la variabilidad aleatoria vinculada a diferentes períodos horarios ( $j$ ) y sentidos de viaje ( $k$ ). El siguiente paso consiste en combinar los valores de ambas variables primigenias mediante su semisuma, produciendo así la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Se consigue de este modo representar una correlación (con coeficiente de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios correspondientes al mismo corredor, eje o itinerario (mismo índice  $i$ ). Se evita, además, que aparezca correlación entre aquellos valores aleatorios que comparten índices de período horario ( $j$ ) y de sentido ( $k$ ) pero hacen referencia a distintos corredores, ejes o itinerarios (es decir, con diferente índice  $i$ ).

Finalmente, tras haber obtenido los valores aleatorios  $TREE_{rijk}$  de la distribución triangular de partida, se ha de realizar la transformación de los mismos a la distribución triangular final (mínimo  $EEVCmin_{ijk}$ , máximo  $EEVCmax_{ijk}$  y moda  $EEVCmod_{ijk}$ ). Se aplica para ello la función triang<sup>II</sup>.

El procedimiento se desarrolla, por tanto, según el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UEE1_i \sim U(0, 1) \longrightarrow UEE1_{ri} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.45.a.i)$$

$$UEE2_{ijk} \sim U(0, 1) \longrightarrow UEE2_{rijk} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.45.a.ii)$$

$$TREE_{rijk} = (UEE1_{ri} + UEE2_{rijk}) / 2 \quad (6.45.b)$$

$$EEVC_{rijk} = \text{triang}^{II}(TREE_{rijk} \mid EEVCmin_{ijk}, EEVCmax_{ijk}, EEVCmod_{ijk}) \quad (6.45.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.6.3. Aleatorización de la tasa inicial (año base) de ocupación en automóvil particular

La variable  $OCc^*_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la tasa de ocupación de los automóviles particulares que transitan por el vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , de acuerdo a datos o estimaciones correspondientes al año base. Los valores numéricos de esta variable son expresados en número de personas por vehículo de tipo automóvil [prs/veh].

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $OCc^*_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos mediante  $OCcmin_{ijk}$ ,  $OCcmax_{ijk}$  y  $OCcmod_{ijk}$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $OCc^*_{rijk}$  se ha fundamentado en dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UOCc1$ ) se ha concebido de tal modo que, en cada realización aleatoria, su valor se utilice de forma común para el conjunto de la red viaria del área de estudio (sin distinción específica entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido) y para cualquier período horario. Por tanto, podría interpretarse como un reflejo de aquellos factores de naturaleza aleatoria (por falta de conocimiento explícito, incertidumbre sobre los mismos, etc.) que afecten con un carácter sensiblemente generalizado a los hábitos de utilización del automóvil particular del conjunto de la población del área de estudio. Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $UOCc2_{ijk}$ ) introduciría una cierta variabilidad aleatoria relacionada con los hábitos y características personales de los usuarios de automóvil particular de cada uno de

los corredores, ejes o itinerarios sobre los que presten servicio las líneas analizadas, en cada período horario y en cada sentido de viaje. Así pues, recibe, en cada simulación aleatoria, valores específicos distintos para cada tripla formada por los índices de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). A continuación se han de combinar los valores de las dos variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de dichos valores, con lo que se da lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto resultante es que todos los valores aleatorios que corresponden a diferentes corredores, ejes o itinerarios, diferentes períodos horarios y/o distintos sentidos de recorrido presentan una correlación entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se realicen (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

El último paso consiste en la transformación de los valores aleatorios  $TROCC_{rijk}$  procedentes de la distribución triangular de partida a la distribución triangular final (de mínimo  $OCcmin_{ijk}$ , máximo  $OCcmax_{ijk}$  y moda  $OCcmod_{ijk}$ ). Se aplica a tal objeto la función triang<sup>II</sup>.

En resumen, el procedimiento se rige por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UOCc1 \sim U(0, 1) \longrightarrow UOCc1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.46.a.i)$$

$$UOCc2_{ijk} \sim U(0, 1) \longrightarrow UOCc2_{rijk} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.46.a.ii)$$

$$TROCC_{rijk} = (UOCc1_r + UOCc2_{rijk}) / 2 \quad (6.46.b)$$

$$OCc^*_{rijk} = \text{triang}^{II}(TROCC_{rijk} \mid OCcmin_{ijk}, OCcmax_{ijk}, OCcmod_{ijk}) \quad (6.46.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.3.6.4. Aleatorización de la tasa de ocupación en moto o ciclomotor

La variable  $OCm_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la tasa de ocupación en motos y ciclomotores aplicable al área urbana o metropolitana en estudio. Se trata de una variable cuya expresión numérica corresponde a número de personas por cada vehículo de tipo moto o ciclomotor [prs/veh].

Además, en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $OCm_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben configurar una distribución triangular de probabilidad, de la cual se han establecido como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $OCmmin$ ,  $OCmmax$  y  $OCmmod$ ).

De acuerdo a las características de la variable y de su estructura de datos (que no incorpora distribuciones diferenciadas para cada corredor, eje o itinerario sobre el que presten servicio las líneas analizadas, cada período horario ni cada sentido de viaje, sino que considera una única distribución y con ello un único valor para el conjunto del área urbana o metropolitana), se ha de emplear en el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $OCm_r$  solamente una variable aleatoria primigenia, distribuida uniformemente en el intervalo (0,1).

Tras extraer los  $Nrs$  valores aleatorios de dicha variable primigenia ( $UOCm$ ), se ha de efectuar la transformación de los mismos a la distribución triangular final, caracterizada por su mínimo  $OCmmin$ , su máximo  $OCmmax$  y su moda  $OCmmod$ . Para este tipo de transformación se utiliza la función triang<sup>I</sup>.

En conclusión, procede aplicar las siguientes ecuaciones:

$$UOCm \sim U(0, 1) \longrightarrow UOCm_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.47.a)$$

$$OCm_r = \text{triang}^1(UOCm_r \mid OCmmin, OCmmax, OCmmod) \quad (6.47.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.6.5. Aleatorización de la evolución futura de la tasa de ocupación en automóvil particular

La variable  $iOCc_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación anual media (en número de personas por vehículo) de la tasa de ocupación de los automóviles particulares que recorren el vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ .

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $iOCc_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adoptar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos mediante  $iOCcmin_{ijk}$ ,  $iOCcmax_{ijk}$  e  $iOCcmmod_{ijk}$ .

Para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $iOCc_{rijk}$  se plantea la utilización de una única variable aleatoria primigenia uniformemente distribuida en el intervalo (0,1), la cual se aplica de forma común a todas las posibles combinaciones de corredor, eje o itinerario (representado por el índice de línea  $i$ ), sentido de viaje ( $k$ ) y período horario ( $j$ ). La adopción de este criterio conlleva que, en cada simulación individualizada, el efecto puramente aleatorio sobre los valores de la variación anual media de la tasa de ocupación en automóvil particular va a presentar la misma magnitud (en proporción a sus distribuciones particularizadas con parámetros  $iOCcmin_{ijk}$ ,  $iOCcmax_{ijk}$  e  $iOCcmmod_{ijk}$ ) para cualquiera de dichas combinaciones de corredor, eje o itinerario, sentido de viaje y período horario. Visto de otro modo, también puede interpretarse que, en cada simulación aleatoria, las proyecciones efectuadas sobre esta variación anual media resultarán igual de sesgadas (por exceso o por defecto con respecto al valor realmente extraído) para cada una de las posibles triplas formadas por los índices de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). La elección de este criterio se relaciona con el supuesto de que los principales factores o condicionantes futuros de carácter impredecible o aleatorio que podrían influir sobre la evolución de la tasa de ocupación en automóvil particular afecten de una forma sensiblemente similar al conjunto del área de estudio (distintos trayectos y sentidos de viaje) y a los diferentes períodos horarios.

Para completar el procedimiento, se ha de realizar la transformación de valores aleatorios desde la distribución uniforme de partida hasta la distribución triangular final (mínimo  $iOCcmin_{ijk}$ , máximo  $iOCcmax_{ijk}$  y moda  $iOCcmmod_{ijk}$ ). Se aplica para ello la función  $\text{triang}^1$ .

Así pues, el procedimiento llevado a cabo se resumiría mediante las siguientes ecuaciones:

$$UiOCc \sim U(0, 1) \longrightarrow UiOCc_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.48.a)$$

$$iOCc_{rijk} = \text{triang}^1(UiOCc_r \mid iOCcmin_{ijk}, iOCcmax_{ijk}, iOCcmmod_{ijk}) \quad (6.48.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.6.6. Aleatorización de la proporción de cumplimiento de la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses de transporte público desde paradas

La variable  $yc_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la fracción o proporción de ocasiones en las que a un autobús que se incorpora a la circulación en tráfico mixto desde una parada

entrante o en bahía de la línea  $i$  (recorrida en sentido  $k$ ) se le concede prioridad efectiva de reincorporación por parte de los conductores de vehículos motorizados privados que circulan durante el período horario  $j$ . Se trata por tanto de una variable adimensional, expresada en el modelo en forma de proporción decimal.

Por otra parte, los valores de  $yc_{rijk}$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido previamente establecidos como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $ycmin_{ijk}$ ,  $ycmax_{ijk}$  e  $ycmod_{ijk}$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $yc_{rijk}$  se ha basado en dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo  $(0,1)$ . La primera de ellas ( $Uyc1$ ) se configura de tal modo que, en cada realización aleatoria, su valor se emplee de forma común para el conjunto de la red de transporte público en autobús convencional del área de estudio (sin distinción específica entre itinerarios de líneas ni sentidos de recorrido) y para cualquier período horario. Puede relacionarse, por tanto, con el efecto de aquellos factores sujetos a incertidumbre o desconocimiento que afectarían de una forma sensiblemente generalizada (en el conjunto de la población del área de estudio) a los hábitos o actitudes de respeto a la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses. Por su parte, la segunda de estas variables primigenias ( $Uyc2_{ijk}$ ) incorporaría al procedimiento una cierta variabilidad aleatoria vinculada a los hábitos, actitudes y características particulares de los conductores de automóvil privado de cada uno de los corredores, ejes o itinerarios sobre los que presten servicio las líneas analizadas, en cada período horario y en cada sentido de viaje. En consecuencia, recibe en cada simulación aleatoria valores específicos diferentes para cada tripla formada por los índices de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Se deben combinar a continuación los valores de las dos variables aleatorias primigenias por medio de su semisuma, dando lugar con ello a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Nótese, en conclusión, que todos los valores aleatorios así obtenidos —aun correspondiendo a diferentes líneas, diferentes períodos horarios y/o distintos sentidos de recorrido— mantienen una correlación entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias (con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ).

Finalmente, tras haber obtenido los valores aleatorios  $TRyc_{rijk}$  de la distribución triangular de partida, se ha de efectuar la transformación de los mismos a la distribución triangular final (con mínimo  $ycmin_{ijk}$ , máximo  $ycmax_{ijk}$  y moda  $ycmod_{ijk}$ ). Procede aplicar por tanto la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, el procedimiento queda determinado mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$Uyc1 \sim U(0, 1) \longrightarrow Uyc1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.49.a.i)$$

$$Uyc2_{ijk} \sim U(0, 1) \longrightarrow Uyc2_{rijk} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.49.a.ii)$$

$$TRyc_{rijk} = (Uyc1_r + Uyc2_{rijk}) / 2 \quad (6.49.b)$$

$$yc_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}}(TRyc_{rijk} \mid ycmin_{ijk}, ycmax_{ijk}, ycmod_{ijk}) \quad (6.49.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.7. Variables referentes a los costes unitarios relacionados con el tiempo de viaje

#### 6.3.7.1. Aleatorización del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo *commuting*

La variable  $VTCpb_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) realizados en transporte público, aplicable al año base y al ámbito territorial del área urbana o metropolitana en estudio. Esta variable se cuantifica en el modelo en unidades monetarias constantes (referenciadas al nivel general de precios de un año específico) por hora [CU/h].

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $VTCpb_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adoptar una distribución triangular de probabilidad, en la que los parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $VTCpbmin$ ,  $VTCpbmax$  y  $VTCpbmod$ .

En base a la definición de la propia variable y de su estructura de datos (que no incluye distribuciones específicas para cada corredor, eje o itinerario sobre el que presten servicio las líneas analizadas, cada período horario ni cada sentido de viaje, sino que considera una única distribución y un único valor promedio para el conjunto de usuarios del transporte público del área urbana o metropolitana en viajes de tipo *commuting*), resulta apropiado para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $VTCpb_r$  adoptar una única variable aleatoria primigenia, la cual se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1).

Una vez se hayan extraído los  $Nrs$  valores aleatorios de la variable primigenia uniformemente distribuida ( $UVTCpb$ ), se ha de realizar la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $VTCpbmin$ , máximo  $VTCpbmax$  y moda  $VTCpbmod$ ). Para este tipo de transformación corresponde aplicar la función  $\text{triang}^1$ .

El procedimiento descrito se lleva a cabo, por tanto, mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UVTCpb \sim U(0,1) \longrightarrow UVTCpb_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.50.a)$$

$$VTCpb_r = \text{triang}^1(UVTCpb_r | VTCpbmin, VTCpbmax, VTCpbmod) \quad (6.50.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.3.7.2. Aleatorización del factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

La variable  $VROpb_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) efectuados en transporte público y el coste homólogo en viajes (en transporte público) de tipo *commuting*. Se trata por tanto de una variable adimensional.

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $VROpb_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido establecidos previamente como  $VROpbmin$ ,  $VROpbmax$  y  $VROpbmod$ .

Al igual que en el caso del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para viajes de tipo *commuting*, el procedimiento de generación de valores aleatorios para  $VROpb_r$  requiere emplear una sola variable aleatoria primigenia —uniformemente distribuida en el intervalo (0,1)— en concordancia

con la definición y estructura de datos de la propia variable  $VROpb_r$  (que presenta una única distribución y por consiguiente un único valor promedio para el conjunto de viajes en transporte público del área urbana o metropolitana en estudio).

A continuación, a partir de los valores extraídos de la variable aleatoria uniforme de partida ( $UVROpb$ ) se debe efectuar la transformación de los mismos a la distribución triangular final (con mínimo  $VROpbmin$ , máximo  $VROpbmax$  y moda  $VROpbmod$ ). Esta transformación se realiza mediante la función  $triang^1$ .

En resumen, se aplican en este procedimiento las ecuaciones siguientes:

$$UVROpb \sim U(0,1) \longrightarrow UVROpb_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.51.a)$$

$$VROpb_r = \text{triang}^1(UVROpb_r | VROpbmin, VROpbmax, VROpbmod) \quad (6.51.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.7.3. Aleatorización del factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

La variable  $VRBpb_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en viajes realizados dentro del tiempo de trabajo remunerado en transporte público y el coste homólogo en viajes (en transporte público) de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado). Esta variable también es adimensional.

Por otra parte, los valores de  $VRBpb_r$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos ( $VRBpbmin$ ,  $VRBpbmax$  y  $VRBpbmod$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $VRBpb_r$  precisa, al igual que en los dos casos anteriormente descritos (y por los mismos motivos), la utilización de una única variable aleatoria primigenia, uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

Finalmente, una vez extraídos los  $Nrs$  valores aleatorios de esta variable primigenia uniformemente distribuida ( $UVRBpb$ ), se ha de proceder a transformar dichos valores a la distribución triangular final (con mínimo  $VRBpbmin$ , máximo  $VRBpbmax$  y moda  $VRBpbmod$ ). En este tipo de transformación se aplica la función  $triang^1$ .

En conclusión, el procedimiento llevado a cabo se resume a través de las siguientes ecuaciones:

$$UVRBpb \sim U(0,1) \longrightarrow UVRBpb_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.52.a)$$

$$VRBpb_r = \text{triang}^1(UVRBpb_r | VRBpbmin, VRBpbmax, VRBpbmod) \quad (6.52.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.7.4. Aleatorización de los factores de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público

Los procedimientos de generación de valores aleatorios para los distintos factores de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público se van a basar, en cada uno de los tres casos (viajes de tipo *commuting*, otros tipos de

viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado, y viajes en tiempo de trabajo remunerado), en la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1).

La primera de las variables ( $UVRpr$ ) se establece de tal modo que su utilización sea común para cualquiera de estos tres factores de proporcionalidad. Se interpretaría por tanto como el reflejo de la influencia de aquellas características o condiciones aleatorias cuyos efectos (sobre estos factores de proporcionalidad) afectarían de forma generalizada a cualquiera de los tres tipos de viajes, siendo sensiblemente comunes al conjunto de viajeros del área de estudio. Por el contrario, el segundo elemento de cada pareja de variables primigenias se va a configurar de tal modo que, en cada simulación aleatoria, presente valores distintos para cada una de las tres clases de viajes (viajes de tipo *commuting*, otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado, y viajes en tiempo de trabajo remunerado).

Cuando se combinen, mediante su semisuma, los valores de cada par de variables aleatorias primigenias se habrán obtenido las respectivas distribuciones triangulares de partida, todas ellas de mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ . El efecto resultante habrá sido que los valores aleatorios empleados para los distintos factores de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público se correlacionen entre sí (de dos en dos) a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Así pues, se establece en primer lugar la variable aleatoria primigenia común a estos tres factores de proporcionalidad ( $UVRpr$ ) por medio de la siguiente expresión:

$$UVRpr \sim U(0, 1) \longrightarrow UVRpr_r = \text{rand}[U(0, 1)] ; r = 1, 2, \dots, Nrs \quad (6.53)$$

A continuación se completan los procedimientos de generación de valores aleatorios de cada uno de estos tres factores de proporcionalidad entre el coste del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público.

#### 6.3.7.4.a. Para viajes de tipo *commuting*

La variable  $VRCpr_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en desplazamientos de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado) efectuados en modos de transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (de tipo *commuting*) realizados en transporte público. Se trata de una variable adimensional.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $VRCpr_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de formar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos mediante  $VRCprmin$ ,  $VRCprmax$  y  $VRCprmod$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $VRCpr_r$  se completa a partir de una variable aleatoria primigenia específica para el factor de proporcionalidad en viajes de tipo *commuting* ( $UVRCpr$ ), que se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1). Los valores de esta última variable aleatoria han de combinarse, mediante semisuma, con los de la variable de uso común, procedentes de la ecuación 6.53. Se obtienen de este modo los valores  $TRVRCpr_r$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) específicos del factor de proporcionalidad en viajes de tipo *commuting*. Por último, solo resta transformar estos valores a la distribución triangular final (con mínimo  $VRCprmin$ , máximo  $VRCprmax$  y moda  $VRCprmod$ ) por medio de la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, se aplica en este procedimiento el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UVRCpr \sim U(0, 1) \longrightarrow UVRCpr_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.54.a)$$



$$TRVRCpr_r = (UVRpr_r + UVRCpr_r) / 2 \quad (6.54.b)$$

$$VRCpr_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRVRCpr_r \mid VRCpr_{\text{min}}, VRCpr_{\text{max}}, VRCpr_{\text{mod}}) \quad (6.54.c)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.3.7.4.b. Para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado

La variable  $VROpr_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) realizados en transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (del mismo tipo) efectuados en transporte público. Esta variable es, por tanto, adimensional.

Los valores de  $VROpr_r$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente establecidos como datos ( $VROpr_{\text{min}}, VROpr_{\text{max}}$  y  $VROpr_{\text{mod}}$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $VROpr_r$  sigue el mismo esquema que se describió anteriormente para el caso de los viajes de tipo *commuting* ( $VRCpr_r$ ), pero utilizando ahora una variable aleatoria primigenia ( $UVROpr$ ) específica para el factor de proporcionalidad en otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado. Esta variable se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1), y sus valores han de combinarse con los de la variable aleatoria de uso común (obtenidos de la ecuación 6.53) mediante la semisuma de ambos. Se calculan de esta forma los valores  $TRVROpr_r$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), los cuales han de ser transformados a la distribución triangular final (con mínimo  $VROpr_{\text{min}}$ , máximo  $VROpr_{\text{max}}$  y moda  $VROpr_{\text{mod}}$ ) a través de la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, se aplican para este procedimiento las siguientes ecuaciones:

$$UVROpr \sim U(0, 1) \longrightarrow UVROpr_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.55.a)$$

$$TRVROpr_r = (UVRpr_r + UVROpr_r) / 2 \quad (6.55.b)$$

$$VROpr_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRVROpr_r \mid VROpr_{\text{min}}, VROpr_{\text{max}}, VROpr_{\text{mod}}) \quad (6.55.c)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.3.7.4.c. Para viajes en tiempo de trabajo remunerado

La variable  $VRBpr_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en desplazamientos efectuados dentro del tiempo de trabajo remunerado en transporte motorizado privado y el coste homólogo en viajes (del mismo tipo, es decir, en tiempo de trabajo remunerado) realizados en transporte público. Esta variable también es adimensional.

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $VRBpr_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido previamente establecidos como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $VRBpr_{\text{min}}, VRBpr_{\text{max}}$  y  $VRBpr_{\text{mod}}$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $VRBpr_r$  sigue el mismo planteamiento que en los dos casos anteriores, debiendo ahora emplearse una variable aleatoria primigenia ( $UVRBpr$ ) específica para el factor de proporcionalidad en viajes realizados dentro del tiempo de trabajo remunerado. Dicha variable está uniformemente distribuida en el intervalo (0,1). Los valores extraídos

de la misma han de combinarse, mediante semisuma, con los de la variable de uso común, que proceden de la ecuación 6.53. Se obtienen con ello los valores  $TRVRBpr_r$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) específicos del factor de proporcionalidad correspondiente a viajes en tiempo de trabajo remunerado. Por último, se han de transformar estos valores a la distribución triangular final (con mínimo  $VRBprmin$ , máximo  $VRBprmax$  y moda  $VRBprmod$ ) mediante el uso de la función  $triang^I$ .

En síntesis, el procedimiento queda definido con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UVRBpr \sim U(0,1) \longrightarrow UVRBpr_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.56.a)$$

$$TRVRBpr_r = (UVRpr_r + UVRBpr_r) / 2 \quad (6.56.b)$$

$$VRBpr_r = \text{triang}^I(TRVRBpr_r \mid VRBprmin, VRBprmax, VRBprmod) \quad (6.56.c)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.7.5. Aleatorización de la valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público)

La variable  $WR_r^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de espera en las paradas o estaciones del modo  $m$  de transporte público y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar). Se trata por tanto de una variable adimensional.

Los valores de  $WR_r^m$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adoptar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente establecidos como datos ( $WRmin^m$ ,  $WRmax^m$  y  $WRmod^m$ ).

En el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $WR_r^m$  se opta por utilizar una única variable aleatoria primigenia, distribuida uniformemente en el intervalo (0,1), cuyo valor en cada realización aleatoria se aplica conjuntamente para todos los modos de transporte público considerados en el análisis (autobús convencional, BHLS/BRT y metro ligero o tranvía). Esto implica que, en cada una de las simulaciones, el efecto aleatorio sobre la valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada va a resultar igual de favorable o desfavorable (con respecto a las distribuciones específicas de parámetros  $WRmin^m$ ,  $WRmax^m$  y  $WRmod^m$ ) para cualquiera de los modos de transporte público. Desde otra perspectiva, esto podría interpretarse como que dicho efecto aleatorio está asociado principalmente a las preferencias globales de los viajeros (en cuanto a su valoración general del canje entre tiempo de espera en parada y tiempo a bordo del vehículo) y no al tipo de modo de transporte público en cuestión, ya que la posible influencia de este último ya ha quedado recogida a través de la selección de diferentes parámetros de mínimo, máximo y moda para cada uno de dichos modos (en función de las condiciones, más confortables o menos confortables, en las que se desarrolla la estancia en la parada o estación).

El paso siguiente consiste en transformar los valores aleatorios extraídos de la variable primigenia con distribución uniforme ( $UWR$ ) a las distribuciones triangulares finales (con mínimo  $WRmin^m$ , máximo  $WRmax^m$  y moda  $WRmod^m$ ). Para ello procede aplicar la función  $triang^I$ .

Por tanto, el procedimiento llevado a cabo se resume a través de las siguientes ecuaciones:

$$UWR \sim U(0,1) \longrightarrow UWR_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.57.a)$$

$$WR_r^m = \text{triang}^I(UWR_r \mid WRmin^m, WRmax^m, WRmod^m) \quad (6.57.b)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.7.6. Aleatorización de la valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje

Los procedimientos de generación de valores aleatorios utilizados para la valoración de costes unitarios asociados a la falta de fiabilidad de horarios o tiempos de viaje se van a fundamentar, en cada una de sus dos vertientes (tiempo medio de retraso en transporte público, variabilidad del tiempo de viaje en transporte motorizado privado), en la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, cada una de ellas uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

La primera de estas variables aleatorias ( $URC_{ijk}$ ) se vincula a los efectos aleatorios que afectarían a las características (principalmente aquellas relacionadas con la rigidez o flexibilidad de sus restricciones horarias) del conjunto general de viajeros que se desplazan en cada uno de los corredores, ejes o itinerarios (sobre los que prestan servicio las líneas analizadas), en cada período horario y en cada sentido de viaje, independientemente de que sean usuarios del transporte público o del transporte motorizado privado. Así pues, en cada simulación aleatoria recibe valores específicos distintos para cada tripla formada por los índices representativos de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ), pero comunes a la valoración tanto de la fiabilidad de horarios (por parte de los usuarios del transporte público) como de la predictibilidad de los tiempos de viaje (por parte de los viajeros en transporte motorizado privado).

Las dos variables aleatorias primigenias del segundo tipo ( $ULR$  y  $URRpr$ ) se seleccionan de tal modo que, en cada simulación, presenten valores distintos para cada una de las dos clases respectivas de valoraciones relacionadas con la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje (la del tiempo medio de retraso en el caso de los usuarios del transporte público, y la de la variabilidad del tiempo de viaje en el caso del transporte motorizado privado), pero sin diferenciación entre corredores, ejes o itinerarios, períodos horarios ni sentidos de recorrido.

Al combinar, mediante su semisuma, los valores de cada pareja de variables aleatorias primigenias se obtendrán las respectivas distribuciones triangulares de partida, todas ellas con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ . El efecto resultante consiste en que, dado un determinado corredor, eje o itinerario, un cierto sentido de recorrido y un determinado período horario (es decir, fijados los índices  $i, j, k$ ), los valores aleatorios correspondientes a las dos clases de valoraciones relativas a la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje van a estar correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias a realizar (con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ). Por otra parte, para cada uno de estos dos tipos de valoraciones de la fiabilidad (del tiempo medio de retraso en el caso del transporte público, y la de la variabilidad del tiempo de viaje en el transporte motorizado privado) va a existir también una correlación (coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios asignados a distintos corredores, ejes o itinerarios, distintos períodos horarios o diferentes sentidos de viaje (esto es, a diferentes triplas  $i, j, k$ ).

En conclusión, es necesario establecer en primer término la variable aleatoria primigenia  $URC_{ijk}$ , común a los dos tipos de valoraciones de la fiabilidad pero específica de cada tripla formada por los índices representativos de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Sus valores aleatorios se obtienen por tanto según la siguiente expresión:

$$URC_{ijk} \sim U(0, 1) \longrightarrow URC_{ijk} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.58)$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

Se completan a continuación los procedimientos de generación de valores aleatorios utilizados para la valoración de los costes unitarios del tiempo medio de retraso (en transporte público) y de la variabilidad del tiempo de viaje (en transporte motorizado privado).

**6.3.7.6.a. Coste unitario del tiempo medio de retraso (transporte público)**

La variable  $LR_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de retraso en transporte público sobre el horario programado o previsto y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar), consideradas las previsibles características —en cuanto a la rigidez o flexibilidad de sus restricciones horarias— de los usuarios de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Se trata de una variable adimensional.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $LR_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben formar una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido previamente definidos como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $LRmin_{ijk}$ ,  $LRmax_{ijk}$  y  $LRmod_{ijk}$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $LR_{rijk}$  se completa mediante una variable aleatoria primigenia específica para la valoración del coste unitario del tiempo medio de retraso en transporte público ( $ULR$ ), la cual se distribuye uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ . Los valores correspondientes a cada realización aleatoria de esta variable deben ser combinados, mediante semisuma, con los de la variable  $URC_{ijk}$ , de uso común para los dos tipos de valoraciones de la fiabilidad, pero específica de cada tripla formada por los índices representativos de línea ( $i$ ), de período horario ( $j$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Recuérdese que los valores de dicha variable proceden de la ecuación 6.58. Se obtienen de esta forma los valores  $TRLR_{rijk}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), específicos de la valoración del coste unitario del tiempo medio de retraso en transporte público. Por último, se han de transformar estos valores aleatorios a la distribución triangular final (con mínimo  $LRmin_{ijk}$ , máximo  $LRmax_{ijk}$  y moda  $LRmod_{ijk}$ ) mediante la función triang<sup>II</sup>.

En resumen, se aplican para completar este procedimiento las siguientes ecuaciones:

$$ULR \sim U(0, 1) \longrightarrow ULR_r = \text{rand}[U(0, 1)] \tag{6.59.a}$$

$$TRLR_{rijk} = (URC_{rijk} + ULR_r) / 2 \tag{6.59.b}$$

$$LR_{rijk} = \text{triang}^{II} \left( TRLR_{rijk} \mid LRmin_{ijk}, LRmax_{ijk}, LRmod_{ijk} \right) \tag{6.59.c}$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

**6.3.7.6.b. Coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje (transporte motorizado privado)**

La variable  $RRpr_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del ratio de valoración de la fiabilidad (*reliability ratio*) en transporte motorizado privado, es decir, del factor de proporcionalidad o cociente entre el coste percibido por el viajero por cada unidad de desviación típica del tiempo de viaje y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo medio de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar), dadas las previsibles características —en cuanto a la rigidez o flexibilidad de sus restricciones horarias— de los viajeros en transporte motorizado privado que efectúan sus desplazamientos en torno al corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Esta variable es también de tipo adimensional.

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $RRpr_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos ( $RRprmin_{ijk}$ ,  $RRprmax_{ijk}$  y  $RRprmod_{ijk}$ ).

Para completar el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $RRpr_{rijk}$  es preciso establecer una nueva variable aleatoria primigenia ( $URRpr$ ) específica para la valoración del coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje en transporte motorizado privado. Esta variable se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1), y sus valores han de combinarse, mediante semisuma, con los de la variable  $URC_{ijk}$  de uso común para los dos tipos de valoraciones de la fiabilidad (cuyos valores se obtienen en la ecuación 6.58). Se calculan de este modo los valores  $TRRRpr_{rijk}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), que a continuación han de ser transformados a la distribución triangular final (con mínimo  $RRprmin_{ijk}$ , máximo  $RRprmax_{ijk}$  y moda  $RRprmod_{ijk}$ ) por medio de la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En conclusión, el procedimiento queda definido con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$URRpr \sim U(0, 1) \longrightarrow URRpr_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.60.a)$$

$$TRRRpr_{rijk} = (URC_{rijk} + URRpr_r) / 2 \quad (6.60.b)$$

$$RRpr_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}}(TRRRpr_{rijk} \mid RRprmin_{ijk}, RRprmax_{ijk}, RRprmod_{ijk}) \quad (6.60.c)$$

$$\text{con: } i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.7.7. Aleatorización de la evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje

La variable  $IVTT_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la tasa media de variación anual del coste unitario del tiempo de viaje (en términos reales, es decir, expresado en unidades monetarias constantes). Los valores de esta variable se expresan en el modelo en formato porcentual (%).

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $IVTT_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) tienen que ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos ( $IVTTmin$ ,  $IVTTmax$  e  $IVTTmod$ ).

En concordancia con la definición de la variable y de su estructura de datos (que considera una única distribución y con ello un único valor de tasa de variación que se aplica a todos los tipos de viaje, tanto para transporte público como para transporte motorizado privado), se ha de adoptar, para el proceso de generación de valores aleatorios de  $IVTT_r$ , una única variable aleatoria primigenia, uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

Una vez se hayan extraído los  $Nrs$  valores aleatorios de esta variable primigenia ( $UIVTT$ ), se debe proceder a la transformación de tales valores a la distribución triangular final (con mínimo  $IVTTmin$ , máximo  $IVTTmax$  y moda  $IVTTmod$ ). En este tipo de transformación se aplica la función  $\text{triang}^{\text{I}}$ .

En conclusión, se aplican en este procedimiento las siguientes ecuaciones:

$$UIVTT \sim U(0, 1) \longrightarrow UIVTT_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.61.a)$$

$$IVTT_r = \text{triang}^{\text{I}}(UIVTT_r \mid IVTTmin, IVTTmax, IVTTmod) \quad (6.61.b)$$

$$\text{con: } r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.8. Variables referentes a los costes unitarios relacionados con el consumo de energía

#### 6.3.8.1. Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa

La variable  $Pce^*_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares— que son efectuados mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, de acuerdo a los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Esta variable es de tipo adimensional, siendo expresados sus valores en el modelo en forma de proporción decimal.

Además, los valores de  $Pce^*_r$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adoptar una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $Pcemin$ ,  $Pcemax$  y  $Pcemod$ .

En base al nivel de caracterización de la propia variable y de su estructura de datos (que no alcanza a diferenciar distribuciones específicas para cada corredor, eje o itinerario, cada período horario ni cada sentido de viaje, sino que adopta una única distribución y un único valor promedio para el conjunto de la red viaria del área de estudio), resulta suficiente, para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $Pce^*_r$ , con hacer uso de una única variable aleatoria primigenia, la cual se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1).

Finalmente, tras haber extraído los  $Nrs$  valores aleatorios de la variable primigenia uniformemente distribuida ( $UPce$ ), se ha de efectuar la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $Pcemin$ , máximo  $Pcemax$  y moda  $Pcemod$ ). En este tipo de transformación se aplica la función  $\text{triang}^1$ .

En resumen, el procedimiento queda definido con las siguientes ecuaciones:

$$UPce \sim U(0,1) \longrightarrow UPce_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.62.a)$$

$$Pce^*_r = \text{triang}^1(UPce_r \mid Pcemin, Pcemax, Pcemod) \quad (6.62.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.3.8.2. Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina)

La variable  $Pcgc^*_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total realizado por automóviles particulares utilizando combustibles convencionales (es decir, gasolina o diésel)— que son efectuados mediante el consumo de gasolina, de acuerdo a los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Se trata también de una variable adimensional, cuyos valores en el modelo se expresan en forma de proporción decimal.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $Pcgc^*_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido definidos previamente como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $Pcgcmin$ ,  $Pcgcmax$  y  $Pcgcmod$ ).

Al igual que en el caso relativo a la fracción inicial de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica externa, la estructura de datos de esta variable (con una única distribución y por consiguiente un único valor, por cada realización aleatoria, aplicable para el conjunto de la red viaria del área de

estudio) impone que se utilice solo una variable aleatoria primigenia —uniformemente distribuida en el intervalo (0,1)— para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $Pcgc^*_r$ .

Por último, una vez se hayan extraído los  $Nrs$  valores aleatorios correspondientes a esta variable primigenia ( $UPcgc$ ), se procede a la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (con mínimo  $Pcgcmin$ , máximo  $Pcgcmax$  y moda  $Pcgcmod$ ). Para esta transformación se emplea la función triang<sup>I</sup>.

Así pues, el procedimiento llevado a cabo se puede resumir mediante las siguientes ecuaciones:

$$UPcgc \sim U(0,1) \longrightarrow UPcgc_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.63.a)$$

$$Pcgc^*_r = \text{triang}^I(UPcgc_r \mid Pcgcmin, Pcgcmax, Pcgcmod) \quad (6.63.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.8.3. Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa

La variable  $iPce_{ry}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total llevado a cabo por automóviles particulares— que son recorridos mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, en base a las previsiones para el área de estudio.

Los valores de  $iPce_{ry}$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente establecidos como datos ( $iPcemin_y$ ,  $iPcemax_y$  e  $iPcmod_y$ ). Obsérvese que en el tratamiento de la evolución futura de la fracción de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica externa se había incorporado la posibilidad de definir distribuciones de probabilidad con diferentes valores de los parámetros para cada uno de los años del horizonte temporal de evaluación.

Para el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $iPce_{ry}$  se ha propuesto la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UiPce1$ ) se ha configurado de tal modo que, en cada realización aleatoria, su valor se emplee de forma común para todos y cada uno de los años contenidos en el horizonte o período de evaluación. Este valor estaría representando, por tanto, el efecto de una determinada tendencia general (favorable o desfavorable con respecto a las sucesivas distribuciones específicas de parámetros  $iPcemin_y$ ,  $iPcemax_y$  e  $iPcmod_y$ ) sostenida a lo largo del tiempo, la cual sería característica de cada simulación aleatoria. Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $UiPce2_y$ ) introduce una cierta variabilidad aleatoria propia de cada año en particular. Por consiguiente, en cada simulación aleatoria recibe valores distintos para cada índice de año ( $y$ ). A continuación se deben combinar los valores de ambas variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de los mismos, con lo que se da lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Nótese que, con este procedimiento, los valores aleatorios utilizados en una misma simulación para los sucesivos años del horizonte de evaluación son distintos entre sí, pero todos ellos están parcialmente afectados por una tendencia común, marcada por el valor  $UiPce1_r$ .

Finalmente, una vez obtenidos los valores aleatorios  $TRiPce_{ry}$  de la distribución triangular de partida, se debe proceder a la transformación de tales valores a la distribución triangular final (mínimo  $iPcemin_y$ , máximo  $iPcemax_y$  y moda  $iPcmod_y$ ). Se aplica para ello la función triang<sup>II</sup>.

En términos matemáticos, el procedimiento aplicado se define con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UiPce1 \sim U(0,1) \longrightarrow UiPce1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.64.a.i)$$

$$UiPce2_y \sim U(0,1) \longrightarrow UiPce2_{ry} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.64.a.ii)$$

$$TRiPce_{ry} = (UiPce1_r + UiPce2_{ry}) / 2 \quad (6.64.b)$$

$$iPce_{ry} = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPce_{ry} | iPcemin_y, iPcemax_y, iPcmod_y) \quad (6.64.c)$$

con:  $y=1, 2, \dots, Yap$  ;  $r=1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.3.8.4. Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina)

La variable  $iPcgc_{ry}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total efectuado por automóviles particulares utilizando combustibles convencionales (gasolina o diésel)— que son recorridos mediante consumo de gasolina, en base a las previsiones para el área de estudio.

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $iPcgc_{ry}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, de la cual han sido previamente definidos como datos sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $iPcgcm_{in,y}$ ,  $iPcgcm_{ax,y}$  e  $iPcgcm_{od,y}$ ). Nótese que dichos parámetros pueden adoptar diferentes valores para cada uno de los años del horizonte temporal de evaluación, dando lugar por tanto a distintas distribuciones triangulares.

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $iPcgc_{ry}$  se ajusta a una estructura análoga a la empleada anteriormente para  $iPce_{ry}$  en el caso concerniente a la evolución futura de la fracción de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica externa. Se utilizan por tanto dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1). La primera ( $UiPcgc1$ ) se define de tal modo que su valor aleatorio en cada realización se emplee de forma común para todos y cada uno de los años del horizonte o período de evaluación, por lo que estaría reflejando los efectos de una determinada tendencia general (en términos relativos a las distribuciones) mantenida a lo largo del tiempo. Por otra parte, la segunda variable primigenia ( $UiPcgc2_y$ ) incorpora la variabilidad aleatoria propia de cada año en particular, recibiendo valores diferentes para cada índice de año ( $y$ ). Se deben combinar a continuación, mediante su semisuma, los valores de ambas variables aleatorias primigenias, conformando así la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $1/2$ ). Recuérdese que, mediante este procedimiento, los valores aleatorios empleados en una misma simulación para los sucesivos años del horizonte de evaluación, aunque son diferentes entre sí, están todos ellos parcialmente afectados por una tendencia común.

Por último, tras haber calculado los valores aleatorios  $TRiPcgc_{ry}$  de la distribución triangular de partida, se ha de efectuar la transformación de los mismos a la distribución triangular final (con mínimo  $iPcgcm_{in,y}$ , máximo  $iPcgcm_{ax,y}$  y moda  $iPcgcm_{od,y}$ ). Se aplica por tanto la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, el procedimiento llevado a cabo se rige por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UiPcgc1 \sim U(0,1) \longrightarrow UiPcgc1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.65.a.i)$$

$$UiPcgc2_y \sim U(0,1) \longrightarrow UiPcgc2_{ry} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.65.a.ii)$$

$$TRiPcgc_{ry} = (UiPcgc1_r + UiPcgc2_{ry}) / 2 \quad (6.65.b)$$



$$iPcg_{r,y} = \text{triang}^{\text{II}}\left( \text{TRiPcg}_{r,y} \mid iPcg_{\text{min},y}, iPcg_{\text{max},y}, iPcg_{\text{mod},y} \right) \quad (6.65.c)$$

con:  $y=1,2, \dots, Y_{ap}$  ;  $r=1,2, \dots, N_{rs}$

### 6.3.8.5. Aleatorización de la fracción inicial (año base) de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica

La variable  $Pme^*_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la fracción o proporción de vehículos-km que –con respecto al total recorrido por el conjunto de motos y ciclomotores– son efectuados por medio de alimentación eléctrica como fuente externa de energía, de acuerdo a los datos disponibles para el año base en el área de estudio. Se trata de una variable adimensional, siendo expresados sus valores en el modelo en forma de proporción decimal.

Sobre el conjunto de las  $N_{rs}$  simulaciones aleatorias, los valores de  $Pme^*_r$  ( $r = 1, 2, \dots, N_{rs}$ ) han de adoptar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido definidos previamente como datos mediante  $Pm_{\text{min}}$ ,  $Pm_{\text{max}}$  y  $Pm_{\text{mod}}$ .

En el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $Pme^*_r$ , la estructura de datos de la variable (con una única distribución y por tanto un único valor, en cada realización aleatoria, aplicable como promedio al conjunto de la red viaria del área de estudio) impone la utilización de una sola variable aleatoria primigenia, uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

Así pues, una vez que se hayan extraído los  $N_{rs}$  valores aleatorios de dicha variable primigenia ( $UPme$ ), se ha de proceder a la transformación de tales valores a la distribución triangular final (con mínimo  $Pm_{\text{min}}$ , máximo  $Pm_{\text{max}}$  y moda  $Pm_{\text{mod}}$ ). Se emplea para este tipo de transformación la función  $\text{triang}^{\text{I}}$ .

En conclusión, el procedimiento aplicado se puede resumir mediante las siguientes ecuaciones:

$$UPme \sim U(0,1) \longrightarrow UPme_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.66.a)$$

$$Pme^*_r = \text{triang}^{\text{I}}(UPme_r \mid Pm_{\text{min}}, Pm_{\text{max}}, Pm_{\text{mod}}) \quad (6.66.b)$$

con:  $r=1,2, \dots, N_{rs}$

### 6.3.8.6. Aleatorización de la evolución futura de la fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica

La variable  $iPme_{r,y}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación (en puntos porcentuales) prevista para el año  $y$  en la fracción o proporción de vehículos-km –sobre el total llevado a cabo por el conjunto de motos y ciclomotores– que son recorridos mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, en base a las previsiones para el área de estudio.

Además, los valores de  $iPme_{r,y}$  en el conjunto de las  $N_{rs}$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, N_{rs}$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente establecidos como datos mediante  $iPm_{\text{min},y}$ ,  $iPm_{\text{max},y}$  e  $iPm_{\text{mod},y}$ . Nótese que estos parámetros pueden haber recibido distintos valores para cada uno de los años del horizonte o período de evaluación, determinando por tanto diferentes distribuciones triangulares.

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $iPme_{r,y}$  sigue un patrón similar al ya visto en los casos análogos relativos a la evolución futura de las fracciones de vehículos-km recorridos mediante alimentación eléctrica y mediante uso de gasolina en automóviles particulares. Así pues, se emplean dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). De ellas, la primera

( $UiPme1$ ) se configura de tal forma que su valor aleatorio se utilice, en cada simulación, para todos los años del horizonte de evaluación, representando con ello los efectos de una determinada tendencia general (en términos relativos a las distribuciones) sostenida a lo largo del tiempo. La segunda de las variables primigenias ( $UiPme2_y$ ) refleja la variabilidad aleatoria propia de cada año en particular, ya que recibe valores diferentes para cada índice de año ( $y$ ). A continuación es preciso combinar los valores de ambas variables aleatorias primigenias por medio de su semisuma, dando así lugar a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). En consecuencia, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida utilizados para los sucesivos años del horizonte o período de evaluación son, dentro de una misma simulación, distintos entre sí, pero todos ellos están afectados parcialmente por una tendencia común, determinada por el valor  $UiPme1_r$ .

Por último, una vez que se hayan obtenido los valores aleatorios  $TRiPme_{ry}$  de la distribución triangular de partida, se ha de efectuar la transformación de tales valores a la distribución triangular final (mínimo  $iPmemin_y$ , máximo  $iPmemax_y$  y moda  $iPmemod_y$ ), para lo cual se aplica la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

El procedimiento descrito se define matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UiPme1 \sim U(0,1) \longrightarrow UiPme1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.67.a.i)$$

$$UiPme2_y \sim U(0,1) \longrightarrow UiPme2_{ry} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.67.a.ii)$$

$$TRiPme_{ry} = (UiPme1_r + UiPme2_{ry}) / 2 \quad (6.67.b)$$

$$iPme_{ry} = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPme_{ry} \mid iPmemin_y, iPmemax_y, iPmemod_y) \quad (6.67.c)$$

con:  $y = 1, 2, \dots, Yap$  ;  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.8.7. Aleatorización del consumo promedio de energía en vehículos eléctricos (automóviles y motos/ciclomotores)

La variable  $ECC_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del consumo promedio de energía (por unidad de distancia recorrida) del conjunto de automóviles que utilizan electricidad de la red como fuente externa de alimentación, de acuerdo a los datos disponibles o previstos para el área de estudio.

Similarmente, la variable  $ECM_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del consumo promedio de energía (por unidad de distancia recorrida) del conjunto de motocicletas y ciclomotores eléctricos, de acuerdo a la composición del parque de este tipo concreto de vehículos estimada o prevista para el área de estudio.

En ambos casos, las unidades en las que se expresan numéricamente en el modelo estas variables son kilowatios-hora por kilómetro [ $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{km}$ ]. Por otra parte, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $ECC_r$  y de  $ECM_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ajustarse a sus respectivas distribuciones triangulares de probabilidad, definidas previamente mediante la indicación, como datos, de sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $ECcmin$ ,  $ECcmax$  y  $ECcmod$  en el caso de los automóviles eléctricos;  $ECmmin$ ,  $ECmmax$  y  $ECmmod$  para motos y ciclomotores eléctricos).

Los procedimientos de generación de valores aleatorios para  $ECC_r$  y  $ECM_r$  van a estar basados, en cada caso, en la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, cada una de ellas distribuida uniformemente en el intervalo (0,1).

La primera de las variables ( $UEC$ ) se diseña de forma que su participación en la obtención de valores aleatorios sea común para el consumo de energía en ambos tipos de vehículos eléctricos, tanto automóviles como motos o ciclomotores. Se puede relacionar por tanto con aquellos factores de carácter

aleatorio (por falta de conocimiento explícito, incertidumbres sobre los mismos, etc.) que afectarían de modo genérico a la eficiencia de los motores y sistemas de propulsión eléctricos, independientemente de que estos pertenezcan a automóviles o a motos y ciclomotores. Por su parte, las segundas variables aleatorias primigenias de dichas parejas ( $UECc$  y  $UECm$ ) se definen separadamente de tal modo que presenten valores propios para cada una de las dos clases de vehículos (automóviles por una parte, y motos o ciclomotores por otra). Se introduce así una variabilidad aleatoria específica de cada clase de vehículo, relacionada con las características o condiciones aleatorias que puedan afectar de forma sensiblemente diferente a uno u otro tipo.

El paso siguiente radica en combinar cada par de variables aleatorias primigenias ( $UEC$  con  $UECc$  para el caso de los automóviles eléctricos;  $UEC$  con  $UECm$  en el caso de motos y ciclomotores) mediante la semisuma de sus respectivos valores. Se obtienen de este modo los valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto resultante de este planteamiento consiste en que los valores aleatorios utilizados para el consumo energético de ambos tipos de vehículos eléctricos (automóviles por un lado, y motos o ciclomotores por otro) se correlacionen entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias a realizar, con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

Finalmente, tomando los valores aleatorios  $TRECC_r$  y  $TRECM_r$  de las distribuciones triangulares iniciales se ha de proceder a su transformación a las correspondientes distribuciones triangulares finales, definidas por sus respectivos parámetros de mínimo, máximo y moda. Se aplica para ello la función  $\text{triang}^{\text{II}}$  en ambos casos.

En conclusión, los procedimientos llevados a cabo se resumen matemáticamente mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UEC \sim U(0, 1) \longrightarrow UEC_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.68.a)$$

Para automóviles eléctricos:

$$UECc \sim U(0, 1) \longrightarrow UECc_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.68.b.i)$$

$$TRECC_r = (UEC_r + UECc_r) / 2 \quad (6.68.b.ii)$$

$$ECc_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRECC_r \mid ECcmin, ECcmax, ECcmod) \quad (6.68.b.iii)$$

Para motos y ciclomotores eléctricos:

$$UECm \sim U(0, 1) \longrightarrow UECm_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.68.c.i)$$

$$TRECM_r = (UEC_r + UECm_r) / 2 \quad (6.68.c.ii)$$

$$ECm_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRECM_r \mid ECmmin, ECmmax, ECmmod) \quad (6.68.c.iii)$$

A lo largo de esta serie de ecuaciones (6.68.a a 6.68.c.iii):  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.8.8. Aleatorización de la reducción proporcional del consumo medio de combustible esperable al final del horizonte de evaluación

La variable  $fcrgr_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del porcentaje de reducción del consumo medio de combustible (por unidad de distancia recorrida) del parque vehicular de automóviles de gasolina esperable en el año final del horizonte o período de evaluación (es decir, en  $y=Yap$ ), determinado con respecto a su consumo en el año base.

Paralelamente, la variable  $fcd_r$  presenta un significado homólogo al de  $fcr_r$ , pero referido en este caso a la reducción del consumo medio del parque vehicular de automóviles diésel, en lugar de a automóviles de gasolina.

Por último, la variable  $fcr_m_r$  denota también un significado homólogo al de las dos anteriores, pero en referencia en este caso a la reducción de consumo medio del parque vehicular de motos y ciclomotores de gasolina.

Dado el conjunto de las  $N_r$ s simulaciones aleatorias, los valores de  $fcr_r$ , de  $fcd_r$  y de  $fcr_m_r$  ( $r = 1, 2, \dots, N_r$ s) han de ajustarse a sus respectivas distribuciones triangulares de probabilidad, previamente caracterizadas mediante los datos correspondientes a sus parámetros de mínimo, máximo y moda ( $fcr_{gmin}$ ,  $fcr_{gmax}$  y  $fcr_{gmod}$  en el caso del parque de automóviles de gasolina;  $fcd_{min}$ ,  $fcd_{max}$  y  $fcd_{mod}$  en el caso de los automóviles diésel; y  $fcr_{mmin}$ ,  $fcr_{mmax}$  y  $fcr_{mmod}$  para el parque de motos y ciclomotores de gasolina).

Los procedimientos de generación de valores aleatorios para estas tres variables ( $fcr_r$ ,  $fcd_r$  y  $fcr_m_r$ ) van a fundamentarse, de nuevo, en la combinación, para cada uno de los casos, de una pareja de variables aleatorias primigenias, cada una de ellas uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

La primera variable de cada pareja ( $U_{fcr}$ ) se establece de forma que su utilización para la obtención de valores aleatorios de reducción de consumo de combustible sea común a los tres tipos de vehículos con motores de combustión interna (automóviles de gasolina, automóviles diésel, y motos y ciclomotores de gasolina). Puede relacionarse por tanto con los condicionantes o factores futuros de naturaleza impredecible o aleatoria que afectarían de un modo genérico a las mejoras a lo largo del tiempo de la eficiencia energética de los motores de combustión interna. Por otra parte, las segundas variables aleatorias primigenias de cada pareja ( $U_{fcr_g}$ ,  $U_{fcd}$  y  $U_{fcr_m}$ ) se configuran por separado al objeto de que presenten valores diferenciados para cada una de estas tres categorías de vehículos. Con ello se incorpora una variabilidad aleatoria específica de cada clase de vehículo, relacionada con las características particulares (tipo de motor: gasolina frente a diésel; tipo de vehículo: automóvil frente a moto/ciclomotor; edad promedio de cada parque vehicular, etc.) que pueden introducir diferencias en el modo en el que evolucione el consumo medio de cada una de estas categorías de vehículos.

A continuación se deben combinar, mediante la semisuma de sus respectivos valores, cada pareja de variables aleatorias primigenias ( $U_{fcr}$  con  $U_{fcr_g}$  en el caso de los automóviles de gasolina;  $U_{fcr}$  con  $U_{fcd}$  para los automóviles diésel; y  $U_{fcr}$  con  $U_{fcr_m}$  en el caso de motos y ciclomotores de gasolina). Se da lugar así a las distribuciones triangulares de partida (todas ellas de mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto obtenido con este diseño radica en que los valores aleatorios empleados para calcular la futura reducción de consumo medio de combustible de los distintos tipos de vehículos que hacen uso de motores de combustión interna (automóviles de gasolina, automóviles diésel, y motos o ciclomotores de gasolina) se correlacionarán entre sí (de dos en dos) a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se realicen (coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ).

Finalmente, una vez que se hayan obtenido los valores aleatorios ( $TR_{fcr_r}$ ,  $TR_{fcd_r}$  y  $TR_{fcr_m_r}$ ) de las distribuciones triangulares de partida, se debe realizar la transformación de dichos valores a sus respectivas distribuciones triangulares finales, caracterizadas en cada caso por sus propios parámetros de mínimo, máximo y moda. Se aplica a tal objeto la función triang<sup>II</sup>.

En resumen, el procedimiento aplicado queda definido por medio del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$U_{fcr} \sim U(0, 1) \longrightarrow U_{fcr_r} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.69.a)$$

Para el parque vehicular de automóviles de gasolina:

$$U_{fcr_g} \sim U(0, 1) \longrightarrow U_{fcr_g_r} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.69.b.i)$$

$$TRfcr_g_r = (Ufcr_r + Ufcr_g_r) / 2 \quad (6.69.b.ii)$$

$$fcr_g_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRfcr_g_r | fcr_g_{\text{min}}, fcr_g_{\text{max}}, fcr_g_{\text{mod}}) \quad (6.69.b.iii)$$

Para el parque vehicular de automóviles diésel:

$$Ufcr_d \sim U(0, 1) \longrightarrow Ufcr_d_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.69.c.i)$$

$$TRfcr_d_r = (Ufcr_r + Ufcr_d_r) / 2 \quad (6.69.c.ii)$$

$$fcr_d_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRfcr_d_r | fcr_d_{\text{min}}, fcr_d_{\text{max}}, fcr_d_{\text{mod}}) \quad (6.69.c.iii)$$

Para el parque vehicular de motos y ciclomotores de gasolina:

$$Ufcr_m \sim U(0, 1) \longrightarrow Ufcr_m_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.69.d.i)$$

$$TRfcr_m_r = (Ufcr_r + Ufcr_m_r) / 2 \quad (6.69.d.ii)$$

$$fcr_m_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRfcr_m_r | fcr_m_{\text{min}}, fcr_m_{\text{max}}, fcr_m_{\text{mod}}) \quad (6.69.d.iii)$$

A lo largo de todo este conjunto de ecuaciones (6.69.a a 6.69.d.iii):  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.8.9. Aleatorización del precio inicial (año base) de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos

La variable  $PRE^*_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del precio medio para los usuarios de vehículos eléctricos de la energía consumida en la recarga de las baterías, en el año base y en la zona o área geográfica de estudio. Esta variable se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios) por kilowatio-hora de energía eléctrica [CU/kW·h].

Los valores de  $PRE^*_r$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de formar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente establecidos como datos mediante  $PRE_{\text{min}}$ ,  $PRE_{\text{max}}$  y  $PRE_{\text{mod}}$ .

En el procedimiento de generación de valores aleatorios de  $PRE^*_r$ , la propia definición y estructura de datos de la variable (con una sola distribución y un único valor, por cada realización aleatoria, asignado en promedio a todos los usuarios de vehículos eléctricos de la zona o área geográfica de estudio) hace que deba emplearse una sola variable aleatoria primigenia, distribuida uniformemente en el intervalo (0,1).

Así pues, una vez se hayan extraído los  $Nrs$  valores aleatorios de la variable primigenia uniformemente distribuida ( $UPRe$ ), se ha de efectuar la transformación de dichos valores a la distribución triangular final (mínimo  $PRE_{\text{min}}$ , máximo  $PRE_{\text{max}}$  y moda  $PRE_{\text{mod}}$ ). Corresponde aplicar para ello la función  $\text{triang}^{\text{I}}$ .

Este procedimiento se rige en conclusión por las siguientes ecuaciones:

$$UPRe \sim U(0, 1) \longrightarrow UPre_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.70.a)$$

$$PRE^*_r = \text{triang}^{\text{I}}(UPRe_r | PRE_{\text{min}}, PRE_{\text{max}}, PRE_{\text{mod}}) \quad (6.70.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.8.10. Aleatorización de la evolución futura del precio de venta de los productos energéticos (gasolina, combustible diésel y energía eléctrica)

La variable  $iPRg_r$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación anual media del precio de venta al consumidor de la gasolina (en términos reales, es decir, expresado en unidades monetarias constantes), cuantificada dicha variación como porcentaje con respecto a su precio en el año base.

Por su parte, la variable  $iPRd_r$  presenta un significado homólogo al de  $iPRg_r$ , pero aplicado en este caso a la evolución del precio de venta al consumidor del gasóleo de automoción, en lugar de a la gasolina.

Por último, la variable  $iPRE_r$  presenta también un significado homólogo al de las dos anteriores, pero referido en este caso a la evolución del precio de la energía eléctrica consumida por los usuarios de vehículos eléctricos.

Sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $iPRg_r$ , de  $iPRd_r$  y de  $iPRE_r$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de adaptarse a sus correspondientes distribuciones triangulares de probabilidad, las cuales fueron especificadas previamente mediante la indicación, como datos, de sus respectivos parámetros de mínimo, máximo y moda ( $iPRg_{min}$ ,  $iPRg_{max}$  e  $iPRg_{mod}$  en el caso de la gasolina;  $iPRd_{min}$ ,  $iPRd_{max}$  e  $iPRd_{mod}$  en el caso del combustible diésel; e  $iPRE_{min}$ ,  $iPRE_{max}$  e  $iPRE_{mod}$  para la energía eléctrica).

Los procedimientos de generación de valores aleatorios para  $iPRg_r$ ,  $iPRd_r$  e  $iPRE_r$  van a estar relacionados entre sí, utilizándose, en cada caso, la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, donde cada una de dichas variables se distribuye uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ .

Por consiguiente, la primera de las variables primigenias ( $UiPR$ ) se plantea de tal modo que su participación en la obtención de valores aleatorios para la evolución futura de esta clase de precios sea común a los tres tipos de productos o formas de energía contempladas (gasolina, combustible diésel y energía eléctrica). Puede interpretarse por tanto como una representación de los efectos de aquellos factores o eventos futuros —de carácter incierto, impredecible o aleatorio— que podrían afectar de un modo sensiblemente generalizado a los precios de la energía. Por su parte, las variables aleatorias que constituyen el segundo elemento de cada pareja ( $UiPRg$ ,  $UiPRd$  y  $UiPRE$ ) se especifican por separado, de tal forma que dentro de cada simulación aleatoria presenten valores propios para cada uno de estos productos energéticos (gasolina, combustible diésel y energía eléctrica, respectivamente). Se introduce así la variabilidad aleatoria específica de cada tipo de producto o forma de energía, relacionada con los condicionantes o circunstancias particulares que puedan afectar de un modo específico a la evolución del precio de uno u otro producto energético.

En el siguiente paso se ha de combinar cada pareja de variables aleatorias primigenias ( $UiPR$  con  $UiPRg$  en el caso de la gasolina;  $UiPR$  con  $UiPRd$  para el combustible diésel; y  $UiPR$  con  $UiPRE$  en el caso de la energía eléctrica) mediante la semisuma de sus respectivos valores. Se obtienen de esta forma los valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto resultante de este diseño consiste en que los valores aleatorios empleados para la evolución futura del precio de cada una de estas tres clases de productos o formas de energía se correlacionarán entre sí (de dos en dos) a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias, presentando un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

Finalmente, tras haber calculado los valores aleatorios  $TRiPRg_r$ ,  $TRiPRd_r$  y  $TRiPRE_r$  vinculados a cada una de las distribuciones triangulares de partida, se ha de llevar a cabo la transformación de los mismos a las respectivas distribuciones triangulares finales, especificadas en cada caso mediante sus propios parámetros de mínimo, máximo y moda. Se utiliza para dichas transformaciones la función  $\text{triang}^{\text{II}}$ .

En resumen, el procedimiento descrito consiste en la aplicación del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UiPR \sim U(0,1) \longrightarrow UiPR_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.71.a)$$

Para el precio de venta de la gasolina:

$$UiPRg \sim U(0,1) \longrightarrow UiPRg_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.71.b.i)$$

$$TRiPRg_r = (UiPR_r + UiPRg_r) / 2 \quad (6.71.b.ii)$$

$$iPRg_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPRg_r \mid iPRg_{\text{min}}, iPRg_{\text{max}}, iPRg_{\text{mod}}) \quad (6.71.b.iii)$$

Para el precio de venta del combustible diésel:

$$UiPRd \sim U(0,1) \longrightarrow UiPRd_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.71.c.i)$$

$$TRiPRd_r = (UiPR_r + UiPRd_r) / 2 \quad (6.71.c.ii)$$

$$iPRd_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPRd_r \mid iPRd_{\text{min}}, iPRd_{\text{max}}, iPRd_{\text{mod}}) \quad (6.71.c.iii)$$

Para el precio de venta de la energía eléctrica:

$$UiPRE \sim U(0,1) \longrightarrow UiPRE_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.71.d.i)$$

$$TRiPRE_r = (UiPR_r + UiPRE_r) / 2 \quad (6.71.d.ii)$$

$$iPRE_r = \text{triang}^{\text{II}}(TRiPRE_r \mid iPRE_{\text{min}}, iPRE_{\text{max}}, iPRE_{\text{mod}}) \quad (6.71.d.iii)$$

A lo largo de toda esta serie de ecuaciones (6.71.a a 6.71.d.iii):  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

### 6.3.9. Variables relativas a la estimación de posibles cambios en otros costes modales

#### 6.3.9.1. Aleatorización del *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional

La variable  $Bns_r^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del *bonus* modal asociado a los sistemas de transporte público ‘metro ligero o tranvía’ (caso  $m=R$ ) y ‘BHLS o BRT’ (caso  $m=B$ ) con respecto al modo de referencia (autobús convencional en tráfico mixto). Recuérdese que esta variable recoge la valoración, por parte de los potenciales viajeros, de las diferencias entre cada uno de los nuevos sistemas y el modo de referencia en cuanto a aquellos atributos o características específicas de los modos de transporte público que no están explícitamente contempladas en la formulación del modelo (*soft factors*). Las unidades en las que se expresa numéricamente en el modelo la cuantía de esta variable son minutos generalizados [min] de reducción equivalente del tiempo de viaje en el vehículo (valorado este en condiciones base o estándar). Al definirse cuantitativamente como una reducción equivalente de tiempo de viaje, el criterio de signos es tal que valores positivos del *bonus* modal indican una mejor valoración de los nuevos modos por parte de los potenciales viajeros e, inversamente, valores negativos representarían una peor valoración de dichos modos.

Por otra parte, los valores de  $Bns_r^m$  en el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, en la que sus parámetros de mínimo, máximo y moda han sido previamente definidos como datos mediante  $Bns_{\text{min}}^m$ ,  $Bns_{\text{max}}^m$  y  $Bns_{\text{mod}}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios para  $Bns_r^m$  se ha basado en la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). La primera de ellas ( $UBns1$ ) se diseña de tal forma que su uso sea común a los dos nuevos modos de transporte público en plataforma reservada (metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT). Su efecto aleatorio se puede vincular a las posibles preferencias o valoraciones de los potenciales viajeros con respecto a aquellas características o atributos que se puedan considerar notablemente comunes a ambos modos. Por su parte, la segunda

variable aleatoria primigenia ( $UBns2^m$ ) introduce una variabilidad aleatoria propia para el *bonus* modal de cada uno de estos dos sistemas de transporte público, en relación con la aleatoriedad de las preferencias o valoraciones de los viajeros sobre aquellas características o atributos que sean específicas de uno de estos modos y no del otro, o que presenten diferentes niveles en uno y otro.

El paso siguiente consiste en combinar ambas variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de sus respectivos valores. Se obtienen de esta forma los valores aleatorios  $TRBns_r^m$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). El efecto resultante es que, a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias, los valores extraídos de dicha distribución para cada uno de estos dos modos de transporte público (metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT) se correlacionan entre sí, con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ .

Por último, solo resta transformar estos valores de la distribución triangular de partida a la distribución triangular final (con mínimo  $Bnsmin^m$ , máximo  $Bnsmax^m$  y moda  $Bnsmod^m$ ) por medio de la función  $triang^{II}$ .

En conclusión, el procedimiento descrito puede resumirse mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UBns1 \sim U(0,1) \longrightarrow UBns1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.72.a.i)$$

$$UBns2^m \sim U(0,1) \longrightarrow UBns2_r^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.72.a.ii)$$

$$TRBns_r^m = (UBns1_r + UBns2_r^m) / 2 \quad (6.72.b)$$

$$Bns_r^m = \text{triang}^{II} \left( TRBns_r^m \mid Bnsmin^m, Bnsmax^m, Bnsmod^m \right) \quad (6.72.c)$$

con:

$$m \in \{R, B\} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.9.2. Aleatorización de la evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo

La variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación anual (en términos reales, es decir, valorada en unidades monetarias constantes) de otros posibles costes privados de la opción modal  $m$  (con  $m \in \{C, M, V, P\}$ ) que sean diferentes de los contemplados expresamente en la modelización, cuya aplicación estaría prevista para el año  $y$  y afectaría a los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Esta variable se expresa numéricamente en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de ajustarse a una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda han sido en cada caso establecidos previamente como datos mediante  $\Delta Cexmin_{yijk}^m$ ,  $\Delta Cexmax_{yijk}^m$  y  $\Delta Cexmod_{yijk}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  se ha basado en dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1). El efecto que se pretende reproducir o representar es que exista un cierto nivel de correlación entre aquellos valores aleatorios utilizados para la evolución futura de estos costes exógenos que correspondan simultáneamente a un mismo año, a una misma opción modal y a un mismo corredor, eje o itinerario. Por consiguiente, la primera de las variables aleatorias primigenias ( $UCex1_{yi}^m$ ) se configura de tal forma que, en cada simulación aleatoria, presente un valor particularizado para cada posible combinación de índices de



modo ( $m$ ), de año ( $y$ ) y de corredor, eje o itinerario (correspondiente al índice de línea  $i$ ). Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $UCex2_{yijk}^m$ ) introduce —para cada combinación de modo, año, y corredor o itinerario— la variabilidad aleatoria que se vincularía a diferentes períodos horarios ( $j$ ) y distintos sentidos de viaje ( $k$ ).

A continuación se deben combinar ambas variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de sus respectivos valores, dando lugar de este modo a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Obsérvese que, mediante el procedimiento descrito, se genera a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias una correlación (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios asignados a una misma opción modal, a un mismo año y a un mismo corredor, eje o itinerario (mismos índices  $m, y, i$ ), pero se evita que exista correlación entre aquellos valores aleatorios que aunque compartan índices de período horario ( $j$ ) y de sentido ( $k$ ) corresponden a diferentes opciones modales, a distintos años o a diferentes corredores, ejes o itinerarios.

Finalmente, una vez obtenidos los valores aleatorios  $TRCex_{ryijk}^m$  de la distribución triangular de partida, se ha de realizar la transformación de los mismos a la distribución triangular final (con mínimo  $\Delta Cexmin_{yijk}^m$ , máximo  $\Delta Cexmax_{yijk}^m$  y moda  $\Delta Cexmod_{yijk}^m$ ). Para ello se aplica la función triang<sup>II</sup>.

Así pues, el procedimiento aplicado se rige por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$UCex1_{yi}^m \sim U(0, 1) \longrightarrow UCex1_{ryi}^m = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.73.a.i)$$

$$UCex2_{yijk}^m \sim U(0, 1) \longrightarrow UCex2_{ryijk}^m = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.73.a.ii)$$

$$TRCex_{ryijk}^m = (UCex1_{ryi}^m + UCex2_{ryijk}^m) / 2 \quad (6.73.b)$$

$$\Delta Cex_{ryijk}^m = \text{triang}^{II} \left( TRCex_{ryijk}^m \mid \Delta Cexmin_{yijk}^m, \Delta Cexmax_{yijk}^m, \Delta Cexmod_{yijk}^m \right) \quad (6.73.c)$$

con:

$$m \in \{C, M, V, P\} ; y = 1, 2, \dots, Yap ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ;$$

$$r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.10. Variables adicionales relativas a la obtención de valores de los parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda

#### 6.3.10.1. Aleatorización de la variación media por viajero, entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, del coste generalizado de las opciones modales de transporte

La variable  $\Phi GC_{rijk}^m$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , de la variación observada, desde el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros hasta el año base, en el coste o precio generalizado medio por viajero que es asumido por los usuarios de la opción modal  $m$  de transporte, para el caso de los viajes llevados a cabo sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable se expresa numéricamente en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

Dado el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $\Phi GC_{rijk}^m$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) han de conformar una distribución triangular de probabilidad, cuyos parámetros de mínimo, máximo y moda se han establecido previamente como datos a través de  $\Phi GCmin_{ijk}^m$ ,  $\Phi GCmax_{ijk}^m$  y  $\Phi GCmod_{ijk}^m$ .

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $\Phi GC_{rijk}^m$  está basado en la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1). El efecto que en este caso se ha buscado reproducir es la posible existencia de un cierto grado de correlación entre los valores aleatorios empleados para aquellas variaciones en el coste generalizado que correspondan simultáneamente a una misma opción modal y a un mismo corredor, eje o itinerario. Consecuentemente, la primera de las variables aleatorias primigenias ( $U\Phi GC1_i^m$ ) se debe diseñar al objeto de que, en cada simulación aleatoria, reciba un valor particularizado para cada posible combinación de índice de modo ( $m$ ) y de corredor, eje o itinerario (coincidente con el índice de línea  $i$ ). Por otra parte, la segunda de las variables primigenias ( $U\Phi GC2_{ijk}^m$ ) incorpora, para cada combinación entre opción modal y corredor, eje o itinerario, la variabilidad aleatoria adicional asociada a diferentes períodos horarios ( $j$ ) y distintos sentidos de viaje ( $k$ ).

A continuación se han de combinar ambas variables aleatorias primigenias mediante la semisuma de sus respectivos valores, para dar lugar con ello a la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Nótese que, a través del procedimiento planteado, se origina a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias una correlación (con coeficiente de Pearson de  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios asignados a una misma opción modal y a un mismo corredor, eje o itinerario (mismos índices  $m, i$ ), al tiempo que se evita que exista correlación entre aquellos valores aleatorios que, aunque compartan índices de período horario ( $j$ ) y de sentido ( $k$ ), conciernen a distintas opciones modales o a diferentes corredores, ejes o itinerarios.

Por último, tras haber obtenido los valores aleatorios  $TR\Phi GC_{rijk}^m$  de la distribución triangular de partida, se debe proceder a la transformación de los mismos a la distribución triangular final (con mínimo  $\Phi GCmin_{ijk}^m$ , máximo  $\Phi GCmax_{ijk}^m$  y moda  $\Phi GCmod_{ijk}^m$ ). Corresponde aplicar para ello la función triang<sup>II</sup>.

En conclusión, el procedimiento llevado a cabo se rige por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$U\Phi GC1_i^m \sim U(0,1) \longrightarrow U\Phi GC1_{ri}^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.74.a.i)$$

$$U\Phi GC2_{ijk}^m \sim U(0,1) \longrightarrow U\Phi GC2_{rijk}^m = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.74.a.ii)$$

$$TR\Phi GC_{rijk}^m = (U\Phi GC1_{ri}^m + U\Phi GC2_{rijk}^m) / 2 \quad (6.74.b)$$

$$\Phi GC_{rijk}^m = \text{triang}^{II}(TR\Phi GC_{rijk}^m \mid \Phi GCmin_{ijk}^m, \Phi GCmax_{ijk}^m, \Phi GCmod_{ijk}^m) \quad (6.74.c)$$

con:

$$m \in \{0, C, M, V, P\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.3.10.2. Aleatorización del ratio o cociente entre los parámetros $\theta$ y $\lambda$ del modelo de demanda

La variable  $RDP_{rijk}$  contiene un valor numérico aleatorio, para la simulación  $r$ , del ratio o razón entre los parámetros de demanda  $\theta$  (parámetro de resistencia, ‘impedancia’ o ‘fricción’ al coste compuesto en la distribución de viajes) y  $\lambda$  (parámetro de sensibilidad del reparto modal a las diferencias en el coste generalizado de las opciones o alternativas) en el caso de los viajes realizados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Así pues, sobre el conjunto de las  $Nrs$  simulaciones aleatorias, los valores de  $RDP_{rijk}$  ( $r = 1, 2, \dots, Nrs$ ) deben ser consistentes con la distribución triangular de probabilidad que en cada caso haya sido previamente especificada mediante los correspondientes datos de mínimo, máximo y moda ( $RDPmin_{ijk}$ ,  $RDPmax_{ijk}$  y  $RDPmod_{ijk}$ ).

El procedimiento de generación de valores aleatorios de  $RDP_{rijk}$  se ha fundamentado en el empleo de dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ . La primera de estas variables ( $URDP1$ ) se ha concebido de tal forma que su valor aleatorio en cada realización se utilice de forma compartida para cualquier posible combinación de corredor, eje o itinerario (coincidente con una línea de transporte público bajo análisis), de período horario y de sentido de viaje. De este modo, su inclusión en el proceso de aleatorización puede interpretarse como la representación de una probable tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico del tipo de procedimiento propuesto para la obtención de los valores del parámetro  $\theta$  de resistencia ('impedancia' o 'fricción') al coste compuesto en la distribución de viajes, al estar este basado en un enfoque simplificado que requiere, por parte del analista, la aportación de valores estimativos que –en ausencia de información más precisa– podrían estar sustentados en criterios cualitativos poco específicos. Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $URDP2_{ijk}$ ) se configura de modo que reciba valores aleatorios diferenciados para cada combinación específica de corredor o itinerario servido por una línea analizada de transporte público ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ). Su participación en el procedimiento de aleatorización se vincula a la posible variabilidad aleatoria en el sesgo o error metodológico particular característico del tipo de viajes realizados sobre un determinado corredor o itinerario, durante un cierto período horario y en un determinado sentido (en especial en conexión con la incertidumbre o desconocimiento sobre las características particulares de dichos viajes en cuanto a su posible segmentación o clasificación entre aquellos efectuados por movilidad obligada y aquellos otros que responden a movilidad no obligada, facultativa o discrecional, dado el distinto grado de elasticidad de unos y otros ante cambios o variaciones en el coste compuesto o desutilidad esperada del viaje).

A continuación procede combinar los valores de las dos variables aleatorias primigenias por medio de la semisuma de los mismos, obteniendo con ello, en cada caso, los valores  $TRRDP_{rijk}$  de la correspondiente distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Como resultado del procedimiento descrito, todos los valores aleatorios del ratio o cociente  $\theta/\lambda$  que correspondan a diferentes corredores, ejes o itinerarios, diferentes períodos horarios y/o distintos sentidos de recorrido presentan sin embargo una correlación entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias que se realicen (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ).

Para concluir, los valores  $TRRDP_{rijk}$  de la distribución triangular de partida han de someterse a la transformación que conduce a la distribución triangular final (mínimo  $RDPmin_{ijk}$ , máximo  $RDPmax_{ijk}$  y moda  $RDPmod_{ijk}$ ), para lo que procede emplear en este caso la función  $triang^{II}$ .

En resumen, el procedimiento efectuado puede especificarse a través del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$URDP1 \sim U(0,1) \longrightarrow URDP1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.75.a.i)$$

$$URDP2_{ijk} \sim U(0,1) \longrightarrow URDP2_{rijk} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.75.a.ii)$$

$$TRRDP_{rijk} = (URDP1_r + URDP2_{rijk}) / 2 \quad (6.75.b)$$

$$RDP_{rijk} = \text{triang}^{II}(TRRDP_{rijk} \mid RDPmin_{ijk}, RDPmax_{ijk}, RDPmod_{ijk}) \quad (6.75.c)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

## 6.4. ALEATORIZACIÓN PRIMIGENIA DE FUNCIONES DE CÁLCULO PROPIAS DEL MODELO

### 6.4.1. Aleatorización de funciones del modelo a utilizar en los cálculos preliminares

#### 6.4.1.1. Aleatorización primigenia de la función normalizada para la asignación de la cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio

El procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a su utilización posterior durante la determinación, en las diferentes simulaciones aleatorias, de las funciones normalizadas empleadas para la asignación de la cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio, precisa de la definición de un único tipo de variable aleatoria primigenia, uniformemente distribuida en el intervalo  $(0,1)$ . Esta variable aleatoria recibe el nombre de  $U_{psp_l}$ , donde el subíndice  $l$  toma valores naturales entre 1 y el número entero de años de duración máxima de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (entre todas las simulaciones aleatorias y cualquiera de los escenarios 'R' y 'B')<sup>176</sup>. Este número se determina a partir del valor máximo de la variable  $Nic_r^s$ , aplicándole al mismo (en general un número real) una función de redondeo hacia el entero más cercano.

Nótese que en este caso particular no se considera oportuno establecer ningún grado de correlación entre los números aleatorios asignados a diferentes valores del subíndice  $l$ . Además, en la obtención aleatorizada de las antedichas funciones van a ser empleados directamente los valores extraídos de la distribución uniforme, por lo que no procede aplicar ninguna función de transformación de los mismos hacia distribuciones triangulares.

Así pues, el procedimiento necesario en este caso se reduce a la siguiente ecuación:

$$U_{psp_l} \sim U(0, 1) \longrightarrow U_{psp_{rl}} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.76)$$

con:

$$l = 1, 2, \dots, \text{nint}\left(\max\left\{\max_{r=1, \dots, Nrs} (Nic_r^R), \max_{r=1, \dots, Nrs} (Nic_r^B)\right\}\right); r = 1, 2, \dots, Nrs$$

siendo  $\text{nint}(x)$  la función de redondeo que toma como argumento un número real  $x$  y lo aproxima al entero más cercano (*nearest integer*).

### 6.4.2. Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con el rendimiento operativo de los modos de transporte público

#### 6.4.2.1. Aleatorización primigenia del incremento del tiempo medio por persona y movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público por efecto de la densidad media de pasajeros de pie prevista

El procedimiento de generación de valores aleatorios a utilizar posteriormente para el cálculo, en cada simulación, del incremento del tiempo medio por persona y movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público por efecto de la densidad media de pasajeros de pie prevista a bordo del vehículo se fundamenta en el empleo de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo  $(0,1)$ .

<sup>176</sup> Esto implica que, dependiendo de la simulación aleatoria y del escenario, algunos de los valores extraídos se quedarán sin ser utilizados, pero este hecho no supone en la ejecución práctica ningún tipo de inconveniente.

La primera de dichas variables ( $Upstd1$ ) se configura de tal modo que su valor aleatorio en cada realización se utilice de forma común para cualquier posible combinación de línea, de período horario y de sentido de viaje. Su inclusión en el procedimiento puede interpretarse como la representación de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico del tipo de modelización utilizado para el cálculo de la variable objeto de análisis (funciones cuadráticas de mínimo, máximo y moda, con sus respectivos coeficientes). La segunda de las variables primigenias ( $Upst2_{ijk}$ ) recibe valores particularizados para cada combinación específica de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ), y puede asociarse a la posible variabilidad aleatoria en el sesgo o error metodológico que sea propio de unas determinadas condiciones particulares (las existentes en una línea durante un cierto período horario y en un determinado sentido de viaje), en relación principalmente con las características de los usuarios que podrían influir en los tiempos de entrada o salida. Obsérvese, por otra parte, que como segunda variable aleatoria primigenia se ha adoptado la misma que se había empleado ya para la aleatorización del tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior (variable  $pstn_{rijk}^m$ ). Sus valores proceden por tanto de la ecuación 6.27.a.ii.

El siguiente paso consiste en combinar los respectivos valores de estas dos variables por medio de su semisuma, obteniéndose así los valores aleatorios  $TRpstd_{rijk}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), la cual sirve de base para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales, que a su vez son objeto de cálculo por parte del modelo. El efecto resultante en la distribución triangular de partida consiste en que los valores correspondientes a dos triplas distintas de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ) están correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias que se realicen (con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Además, fijada una determinada combinación de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ), los valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida utilizados para el tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo en ausencia de congestión en el interior y para el incremento de dicho tiempo por efecto de la densidad media de pasajeros de pie también presentan una correlación entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones, de nuevo con un coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

En conclusión, el procedimiento planteado implica la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$Upstd1 \sim U(0,1) \longrightarrow Upstd1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.77.a)$$

$$TRpstd_{rijk} = (Upstd1_r + Upst2_{rijk}) / 2 \quad (6.77.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.2.2. Aleatorización primigenia de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía

El procedimiento de generación de los valores aleatorios que se emplean posteriormente para el cálculo, en cada simulación, de la demora media de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía se basa en la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1).

La primera de las variables ( $Urd1$ ) se plantea de modo que, en cada realización aleatoria, su valor sea utilizado compartidamente por cualquier posible combinación de línea y sentido de viaje, por lo que puede interpretarse como el reflejo de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico del procedimiento empleado para el cálculo de la demora media de reincorporación

(funciones cuadráticas de mínimo, máximo y moda, con sus respectivos coeficientes). Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $Urd2_{ik}$ ) incorporaría la posible variabilidad aleatoria del sesgo o error metodológico particular relacionado con las características de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios sobre los que presten servicio las líneas analizadas. Por tanto, se configura de tal forma que reciba valores aleatorios distintos para cada dupla de índice de línea ( $i$ ) y de sentido de recorrido ( $k$ ).

A continuación se debe proceder a combinar los correspondientes valores de ambas variables mediante la semisuma de los mismos, dando lugar a los valores aleatorios  $TRrd_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores van a servir como base para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales, las cuales han de ser endógenamente calculadas por el modelo. A consecuencia de la combinación de variables primigenias, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida que correspondan a dos duplas distintas de línea ( $i$ ) y sentido de recorrido ( $k$ ) van a presentar una correlación entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias a efectuar, con un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ .

Así pues, el procedimiento descrito puede resumirse mediante las siguientes ecuaciones:

$$Urd1 \sim U(0, 1) \longrightarrow Urd1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.78.a.i)$$

$$Urd2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow Urd2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.78.a.ii)$$

$$TRrd_{rik} = (Urd1_r + Urd2_{rik}) / 2 \quad (6.78.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.2.3. Aleatorización primigenia del coeficiente para la mayoración del tiempo teórico ideal de recorrido en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica

El procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a ser utilizados posteriormente en el cálculo, en cada simulación aleatoria, del coeficiente de mayoración del tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica se configura en base a dos variables aleatorias primigenias, las cuales se distribuyen uniformemente en el intervalo (0,1).

Al igual que en casos anteriores, la primera de dichas variables primigenias ( $U\omega 1$ ) se establece con el propósito de que en cada simulación aleatoria se utilice su valor de forma compartida para cualquier posible combinación de línea y sentido de viaje. Por consiguiente, puede interpretarse como la representación de una tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación utilizada para evaluar este coeficiente de mayoración (funciones cuadráticas o valores constantes de mínimo, máximo y moda, dependiendo del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte). La segunda de las variables primigenias ( $U\omega 2_{ik}$ ) introduce la posible variabilidad aleatoria en el sesgo o error metodológico particular que se relacionaría con las características de las infraestructuras viarias sobre las que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que prestan servicio las líneas analizadas (por ejemplo, la densidad de intersecciones a nivel por unidad de longitud de la línea, el volumen de tráfico en las vías intersecadas, las posibles limitaciones impuestas por el trazado de cada línea, etc.). Por tanto, en cada simulación aleatoria esta segunda variable recibe valores diferenciados para cada combinación específica de línea ( $i$ ) y sentido de viaje ( $k$ ).

El paso siguiente implica la combinación de los respectivos valores de estas dos variables a través de su semisuma, calculándose de este modo los valores aleatorios  $TR\omega_{rik}$  de la distribución triangular de

partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores se van a emplear posteriormente para su transformación a las distribuciones triangulares finales, que serán calculadas endógenamente por el modelo en función del intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte. El efecto resultante de esta combinación de variables primigenias consiste en que los valores aleatorios de la distribución triangular de partida correspondientes a duplas diferentes de línea ( $i$ ) y sentido de recorrido ( $k$ ) van a estar correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias que se lleven a cabo (coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ).

En resumen, el procedimiento aplicado se rige por las siguientes ecuaciones:

$$U\omega 1 \sim U(0,1) \longrightarrow U\omega 1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.79.a.i)$$

$$U\omega 2_{ik} \sim U(0,1) \longrightarrow U\omega 2_{rik} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.79.a.ii)$$

$$TR\omega_{rik} = (U\omega 1_r + U\omega 2_{rik}) / 2 \quad (6.79.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.2.4. Aleatorización primigenia del factor para la mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de la parada

El procedimiento de generación de valores aleatorios a emplear posteriormente para el cálculo, en cada simulación, del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de la parada se fundamenta nuevamente en la utilización de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1).

La primera variable ( $U\tau 1$ ) se diseña de forma que su valor en cada realización aleatoria sea utilizado compartidamente por todas las posibles combinaciones de línea y sentido de viaje, interpretándose como el reflejo de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico del procedimiento empleado para el cálculo de este factor de mayoración (funciones cuadráticas de mínimo, máximo y moda, con sus respectivos coeficientes). Por otra parte, la segunda variable primigenia ( $U\tau 2_{ik}$ ) se configura al objeto de que reciba valores particularizados para cada posible combinación de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Esta segunda variable representaría la variabilidad aleatoria en el sesgo o error metodológico específico que estaría relacionado principalmente con los condicionantes particulares de operación y con las características de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que presten servicio las líneas estudiadas.

A continuación se han de combinar, mediante su semisuma, los respectivos valores de estas dos variables primigenias, obteniéndose los valores aleatorios  $TR\tau_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Dichos valores sirven de base para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función del cociente entre el intervalo de operación programado y el intervalo mínimo de diseño de la línea). Debido a este procedimiento de combinación de variables, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida correspondientes a dos duplas cualesquiera de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de recorrido ( $k$ ) se correlacionarán entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias, con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

En conclusión, el procedimiento propuesto se puede resumir a través de las siguientes ecuaciones:

$$U\tau 1 \sim U(0,1) \longrightarrow U\tau 1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.80.a.i)$$

$$U\tau_{2_{ik}} \sim U(0, 1) \longrightarrow U\tau_{2_{rik}} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.80.a.ii)$$

$$TR\tau_{rik} = (U\tau_{1_r} + U\tau_{2_{rik}}) / 2 \quad (6.80.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.4.3. Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con el incremento del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos

Los procedimientos de generación de los valores aleatorios destinados a ser empleados posteriormente en el cálculo, en cada simulación aleatoria, de los distintos factores multiplicadores del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos van a estar relacionados entre sí. En este sentido, se van a distinguir dos multiplicadores parciales: uno que afecta a los pasajeros que viajen sentados pero en presencia de otros pasajeros de pie, y otro que afecta a los propios pasajeros que tienen que viajar de pie por no disponer de asientos libres (generalmente con un valor del multiplicador notablemente superior al anterior). Para cada uno de ambos casos se va a utilizar la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, donde cada una de dichas variables se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1).

En virtud de la relación que se pretende representar entre los valores aleatorios a utilizar para ambos factores multiplicadores, la primera de las variables primigenias (*UMc*) se diseña de tal forma que en cada simulación participe compartidamente en la obtención de los valores aleatorios correspondientes a cada uno de los dos multiplicadores. Su inclusión en el procedimiento se puede interpretar como el reflejo de un sesgo metodológico común en la modelización utilizada para el cálculo de ambos factores multiplicadores (sesgo relacionado con los coeficientes de las respectivas funciones lineales de mínimo, máximo y moda, cuya selección propuesta está basada en una misma fuente de datos).

Por su parte, las segundas variables aleatorias primigenias (*UMcns* y *UMcss*) se configuran separadamente de tal modo que, en cada simulación, reciban valores distintos para cada una de las dos clases de factores multiplicadores del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público a causa del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos (el que afecta a los pasajeros que viajan sentados pero con presencia de otros pasajeros de pie, y el que afecta a los propios pasajeros de pie).

Cuando se combinen, mediante su semisuma, los respectivos valores de cada pareja de variables aleatorias primigenias se obtendrán las correspondientes distribuciones triangulares de partida, con mínimo 0, máximo 1 y moda ½. Como resultado de este procedimiento de combinación, los valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida correspondientes a los dos tipos de factores multiplicadores van a presentar una correlación entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias que se realicen (con un coeficiente de correlación de Pearson de ½).

En conclusión, es preciso establecer en primer lugar la variable aleatoria primigenia *UMc*, común a estas dos clases de factores multiplicadores. Sus valores aleatorios se obtienen según la siguiente expresión:

$$UMc \sim U(0, 1) \longrightarrow UMc_r = \text{rand}[U(0, 1)] ; r = 1, 2, \dots, Nrs \quad (6.81)$$

A continuación se completan los procedimientos de generación de valores aleatorios destinados al cálculo de cada uno de los dos multiplicadores del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos.



#### 6.4.3.1. Aleatorización primigenia del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie

El procedimiento de generación de valores aleatorios a emplear posteriormente para el cálculo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie se completa a partir de una variable aleatoria primigenia específica para dicho factor multiplicador. Esta variable ( $UMcns$ ) se distribuye uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ , y su presencia responde a la posible variabilidad aleatoria en el error o sesgo metodológico específico de este factor multiplicador en concreto, que puede ser sensiblemente diferente del error o sesgo metodológico del factor multiplicador aplicable a los propios pasajeros de pie (aunque previsiblemente ambos estén correlacionados entre sí, tal como se indicó anteriormente).

Los valores aleatorios de la variable específica  $UMcns$  han de combinarse, mediante semisuma, con los de la variable de uso común ( $UMc$ ), procedentes de la ecuación 6.81. Se obtienen de este modo los valores aleatorios  $TRMcns_r$ , de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), los cuales serán utilizados como base para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función de las densidades medias de pasajeros de pie experimentadas por los viajeros).

En resumen, se aplican para completar este procedimiento las siguientes ecuaciones:

$$UMcns \sim U(0,1) \longrightarrow UMcns_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.82.a)$$

$$TRMcns_r = (UMc_r + UMcns_r) / 2 \quad (6.82.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.4.3.2. Aleatorización primigenia del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie

Para completar el procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a ser utilizados posteriormente en el cálculo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie es necesaria una variable aleatoria primigenia específica para dicho factor multiplicador. Esta variable ( $UMcss$ ) se distribuye uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ . Su inclusión se relaciona, tal como en el caso anterior, con la posible variabilidad aleatoria en el error o sesgo metodológico específico de este factor multiplicador en particular.

Seguidamente, los valores aleatorios de esta variable específica ( $UMcss$ ) deben ser combinados con los de la variable  $UMc$  de uso común (extraídos de la ecuación 6.81) mediante la semisuma de sus valores respectivos. De esta forma se obtienen los valores aleatorios  $TRMcss_r$ , de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos últimos van a ser empleados posteriormente para su transformación a las distribuciones triangulares finales, que serán calculadas endógenamente por el modelo en función de las densidades medias de pasajeros de pie experimentadas por los viajeros.

Por tanto, el procedimiento descrito se completa a través de las siguientes ecuaciones:

$$UMcss \sim U(0,1) \longrightarrow UMc_{ss,r} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.83.a)$$

$$TRMc_{ss,r} = (UMc_r + UMc_{ss,r}) / 2 \quad (6.83.b)$$

con:  $r = 1, 2, \dots, Nrs$

#### 6.4.4. Aleatorización de funciones del modelo relativas a los tiempos de espera en parada y de retraso medio en transporte público

##### 6.4.4.1. Aleatorización primigenia del tiempo medio de espera en parada para el usuario del transporte público

El procedimiento de generación de los valores aleatorios que se utilicen posteriormente para el cálculo, en cada simulación, del tiempo medio de espera en parada de los usuarios del transporte público se ha desarrollado en base a dos variables aleatorias primigenias, cada una de las cuales se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1).

La primera de estas variables ( $Utw1$ ) se plantea al objeto de que su valor aleatorio en cada realización se utilice de forma compartida para cualquier posible combinación de línea, de período horario y de sentido de viaje. Así pues, su presencia en el procedimiento puede interpretarse como la representación de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación propuesta para el cálculo del tiempo medio de espera (en relación con el tipo de funciones de mínimo, máximo y moda, junto con sus respectivos coeficientes recomendados). Por su parte, la segunda de las variables primigenias ( $Utw2_{ijk}$ ) se configura de modo que reciba valores aleatorios diferenciados para cada combinación específica de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ). Su participación en el procedimiento se relaciona con la posible variabilidad aleatoria en el sesgo o error metodológico característico de una determinada línea durante un cierto período horario y en un determinado sentido de viaje, en conexión con la incertidumbre o desconocimiento sobre las características particulares de sus usuarios que podrían influir en los tiempos de espera (fundamentalmente su mayor o menor propensión a intentar ajustar su llegada a la parada al horario previsto para el paso del vehículo o unidad de transporte, dado un intervalo de operación determinado).

En el siguiente paso se combinan los respectivos valores de estas dos variables por medio de su semisuma, calculándose así los valores aleatorios  $TRtw_{rijk}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores deberán ser utilizados para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales, las cuales van a ser calculadas endógenamente por el modelo en función del intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte. Como efecto resultante del procedimiento de combinación de variables primigenias, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida correspondientes a dos triplas diferentes de línea ( $i$ ), período horario ( $j$ ) y sentido de viaje ( $k$ ) van a estar correlacionados entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias, presentando un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

En síntesis, el procedimiento aplicado se rige por las siguientes ecuaciones:

$$Utw1 \sim U(0,1) \longrightarrow Utw1_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.84.a.i)$$

$$Utw2_{ijk} \sim U(0,1) \longrightarrow Utw2_{rijk} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.84.a.ii)$$

$$TRtw_{rijk} = (Utw1_r + Utw2_{rijk}) / 2 \quad (6.84.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.4.2. Aleatorización primigenia del tiempo de retraso medio en autobús convencional (operación en tráfico mixto)

El procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a su posterior utilización para el cálculo, en cada simulación aleatoria, del tiempo medio de retraso en autobús convencional operado en tráfico mixto se basa en la combinación de dos variables aleatorias primigenias, uniformemente distribuidas en el intervalo (0,1).

La primera de las variables ( $U_{lrm1}$ ) se diseña de tal modo que el valor recibido en cada realización aleatoria sea empleado de forma común por todas las posibles combinaciones de línea y sentido de viaje, por lo que puede interpretarse como el reflejo de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación propuesta para la estimación del tiempo de retraso medio en autobús convencional en tráfico mixto (polinomios de segundo grado para el mínimo, máximo y moda en función de un índice combinado de utilización de las capacidades del vial de circulación y de la línea de transporte público, con los respectivos coeficientes). Por su parte, la segunda variable primigenia ( $U_{lrm2_{ik}}$ ) se configura de tal forma que reciba valores singularizados para cada posible combinación de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Dicha variable estaría relacionada con la variabilidad aleatoria en aquellos sesgos o errores metodológicos específicos que se vincularían principalmente a las características de la infraestructura vial sobre la que se desarrolla cada uno de los corredores, ejes o itinerarios en los que presten servicio las líneas analizadas, así como a otros posibles condicionantes particulares de operación.

A continuación se debe proceder a combinar los respectivos valores de estas dos variables primigenias por medio de su semisuma, con lo que se obtienen los valores aleatorios  $TRlrm_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores sirven finalmente de base para su posterior transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función de indicadores de utilización efectiva de las capacidades del vial de circulación y de la línea de transporte público). Como resultado de este procedimiento de combinación de variables, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida que correspondan a dos duplas cualesquiera de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ) se correlacionarán entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias a realizar, con un coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ .

Así pues, el procedimiento llevado a cabo implica la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$U_{lrm1} \sim U(0,1) \longrightarrow U_{lrm1_r} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.85.a.i)$$

$$U_{lrm2_{ik}} \sim U(0,1) \longrightarrow U_{lrm2_{rik}} = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.85.a.ii)$$

$$TRlrm_{rik} = (U_{lrm1_r} + U_{lrm2_{rik}}) / 2 \quad (6.85.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.4.3. Aleatorización primigenia del tiempo de retraso medio en los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica

Para el procedimiento de generación de valores aleatorios destinados a ser utilizados posteriormente en el cálculo, en cada simulación, del tiempo medio de retraso en los sistemas de transporte público dotados de plataforma reservada y priorización semafórica (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) se emplean dos variables aleatorias primigenias, con distribución uniforme en el intervalo (0,1).

Siguiendo una estructura análoga a la descrita anteriormente para el caso del tiempo medio de retraso en autobús convencional en tráfico mixto, la primera variable primigenia ( $Ultr1$ ) se configura de tal modo que su valor aleatorio en cada realización se emplee de forma compartida para cualquier posible combinación de línea y de sentido de viaje. Su inclusión en el procedimiento puede interpretarse como la representación de una tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación planteada para la estimación del tiempo de retraso medio en autobús convencional en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica (binomios de mínimo, máximo y moda formados por una constante y una función de tipo exponencial, todo ello en función de la diferencia entre el intervalo previsto para la operación y el intervalo mínimo de diseño). Por otra parte, la segunda de las variables aleatorias primigenias ( $Ultr2_{ik}$ ) se diseña para que reciba valores diferenciados en cada posible combinación de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ), en respuesta por tanto a la posible variabilidad aleatoria en sus sesgos o errores metodológicos específicos, que estarían relacionados fundamentalmente con aspectos como las características particulares de la plataforma reservada sobre la que se desarrolle el itinerario de cada una de las líneas, el nivel de priorización del transporte público en la regulación semafórica de las intersecciones de cada uno de esos itinerarios, otros posibles condicionantes particulares de operación, etc.

En el siguiente paso se combinan los respectivos valores de ambas variables primigenias a través de su semisuma, obteniendo con ello los valores aleatorios  $TRltr_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), los cuales serán recuperados posteriormente para su transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función de la diferencia entre el intervalo programado para la operación y el intervalo mínimo de diseño). De nuevo, el efecto resultante de este procedimiento de combinación consiste en que los valores aleatorios de la distribución triangular de partida correspondientes a dos duplas distintas de línea (índice  $i$ ) y sentido de viaje (índice  $k$ ) van a estar correlacionados entre sí a lo largo del conjunto de simulaciones aleatorias que se efectúen (coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Obsérvese, sin embargo, que no se establece ningún vínculo con los elementos aleatorios correspondientes al tiempo medio de retraso en autobús convencional operado en tráfico mixto, ya que, aunque se refieran a un concepto similar (tiempo de retraso medio en transporte público), los métodos o modelos de cálculo planteados para uno y otro caso son manifiestamente diferentes, por lo que no resulta pertinente considerar ningún sesgo metodológico común a ambos.

En resumen, el procedimiento propuesto consta de las siguientes ecuaciones:

$$Ultr1 \sim U(0, 1) \longrightarrow Ultr1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.86.a.i)$$

$$Ultr2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow Ultr2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.86.a.ii)$$

$$TRltr_{rik} = (Ultr1_r + Ultr2_{rik}) / 2 \quad (6.86.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

### 6.4.5. Aleatorización de funciones del modelo relacionadas con los costes de viaje en vehículo motorizado privado

#### 6.4.5.1. Aleatorización primigenia del factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria

En el caso del procedimiento de generación de los valores aleatorios dedicados a su utilización posterior para el cálculo, en cada simulación aleatoria, del factor de proporcionalidad entre el incremento del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado generado por un elevado nivel de congestión viaria y dicho coste unitario en condiciones de ausencia de congestión, se opta por emplear una única variable aleatoria primigenia, uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

De manera similar a como se había efectuado en el caso de los factores de incremento del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos, se plantea para la obtención de este factor de proporcionalidad la utilización, por cada simulación, de un único valor aleatorio aplicable indistintamente a cualquier combinación entre corredor, eje o itinerario (coincidente con alguna de las líneas de transporte público analizadas), sentido de viaje y período horario. Obsérvese, no obstante, que el coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado sobre el cual se aplica este factor de proporcionalidad es distinto para cada una de estas posibles combinaciones, en función de la diferente composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje existente en cada caso (proporciones de viajes de tipo *commuting*, de desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado, y de otros viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado). Además, el cálculo de estos costes unitarios del tiempo incorpora ya la aleatoriedad concerniente a los datos de entrada (a través del coste básico del tiempo de viaje en transporte público en viajes de tipo *commuting* y de los factores de proporcionalidad de dicho coste entre distintos tipos de viaje y entre vehículo motorizado privado y transporte público).

Así pues, bajo la asunción de un único valor aleatorio primigenio (por cada simulación) utilizable indistintamente para cualquier combinación de corredor, eje o itinerario, sentido de viaje y período horario, y teniendo en cuenta que no se considera pertinente establecer ninguna correlación entre este factor de proporcionalidad y ningún otro, resulta suficiente emplear en este caso una única variable aleatoria uniformemente distribuida (*UACTR*). Por consiguiente, esta variable aleatoria estaría reflejando una tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación propuesta para el cálculo de este factor de proporcionalidad (funciones cuadráticas de mínimo, máximo y moda dependientes del ratio Volumen/Capacidad, con sus respectivos coeficientes).

En conclusión, el procedimiento planteado constaría únicamente de la siguiente expresión:

$$UACTR \sim U(0,1) \longrightarrow UACTR_r = \text{rand}[U(0,1)] ; r = 1, 2, \dots, Nrs \quad (6.87)$$

Los valores aleatorios extraídos de esta distribución uniforme serán empleados posteriormente para su transformación a las distribuciones triangulares finales, las cuales se obtendrán endógenamente por el propio modelo en función del ratio Volumen/Capacidad calculado para el vial o viales de circulación que sirven de base a los itinerarios, ejes o corredores objeto de estudio (cuando dicho ratio sea mayor que un valor umbral igual a  $\frac{2}{3}$ ).

#### 6.4.5.2. Aleatorización primigenia de la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado

El procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a su posterior utilización durante el cálculo, en cada simulación aleatoria, de la desviación típica o estándar del tiempo de desplazamiento en los modos de transporte motorizado privado se ha basado en la combinación de dos variables aleatorias primigenias, distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1).

La primera de estas variables ( $U\sigma m1$ ) se plantea con el propósito de que su valor aleatorio en cada realización se utilice de forma común sin distinción específica entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de viaje. Puede ser interpretada por tanto como el reflejo de una posible tendencia común o sistemática en el sesgo metodológico de la formulación utilizada para la determinación de la desviación típica o estándar del tiempo de desplazamiento en transporte motorizado privado (elaborada en base a un modelo más general desarrollado por Hyder Consulting bajo encargo del Departamento de Transportes del Reino Unido: Black y Chin, 2007; Gilliam *et al.*, 2008; Black *et al.*, 2009). Por su parte, la segunda variable primigenia ( $U\sigma m2_{ik}$ ) se configura de tal modo que reciba valores singularizados para cada posible combinación de corredor, eje o itinerario (representado por un índice de línea  $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Su incorporación en el procedimiento se relaciona con la variabilidad aleatoria en los sesgos o errores metodológicos específicos de cada uno de dichos trayectos, los cuales se derivarían principalmente de las características particulares de la infraestructura vial sobre la que se desarrolle cada uno de los corredores, ejes o itinerarios coincidentes con las líneas analizadas.

A continuación se han de combinar, mediante su semisuma, los respectivos valores de las dos variables primigenias, produciendo como resultado los valores aleatorios  $TR\sigma m_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores se utilizan posteriormente como base para su transformación a las distribuciones triangulares finales, las cuales han de ser calculadas endógenamente por el modelo. Debido a este procedimiento de combinación de variables, los valores aleatorios de la distribución triangular de partida correspondientes a dos duplas cualesquiera de índices de línea ( $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ) van a estar correlacionados entre sí a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias, presentando un coeficiente de correlación de Pearson de  $\frac{1}{2}$ .

En síntesis, el procedimiento aplicado se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$U\sigma m1 \sim U(0, 1) \longrightarrow U\sigma m1_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.88.a.i)$$

$$U\sigma m2_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow U\sigma m2_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.88.a.ii)$$

$$TR\sigma m_{rik} = (U\sigma m1_r + U\sigma m2_{rik}) / 2 \quad (6.88.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.5.3. Aleatorización primigenia del consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado

Los procedimientos de generación de los valores aleatorios que se utilizan posteriormente para el cálculo, en cada simulación, de los consumos promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en las distintas clases de vehículos motorizados privados que empleen combustibles convencionales se van a plantear de tal forma que dichos valores aleatorios estén parcialmente relacionados entre sí. A este respecto, deben distinguirse los consumos de tres clases de vehículos: automóviles diésel, automóviles de gasolina, y motos o ciclomotores (con motor de gasolina). En cada uno de los tres casos se emplea la combinación de una pareja de variables aleatorias primigenias, estando todas ellas distribuidas uniformemente en el intervalo (0,1).

De acuerdo al tipo de relación que se pretende establecer entre los valores aleatorios que se utilizarían para cada una de las tres clases de vehículos, la primera de las variables primigenias ( $UFC_{ik}$ ) se configura de tal forma que reciba valores diferenciados para cada posible combinación de corredor, eje o itinerario (representado por un índice de línea  $i$ ) y de sentido de viaje ( $k$ ). Sin embargo, dichos valores se emplearán de manera compartida para cualquiera de las tres clases de vehículos motorizados

privados que hacen uso de combustibles convencionales (automóviles diésel, automóviles de gasolina, y motos o ciclomotores de gasolina). La presencia de esta variable en el procedimiento planteado puede interpretarse como la representación de un sesgo metodológico asociado a la variabilidad, incertidumbre o indefinición de las características particulares de la infraestructura vial sobre la que se desarrolle cada uno de los corredores, ejes o itinerarios coincidentes con las líneas analizadas (por ejemplo, las características del perfil longitudinal, que con sus múltiples posibles combinaciones de rampas y pendientes tiene una clara influencia en el consumo de combustible para cualquiera de las tres clases de vehículos).

Por su parte, el segundo tipo de variables aleatorias primigenias ( $UFC_d$ ,  $UFC_g$  y  $UFC_m$ ) se diseñan de tal modo que, en cada simulación aleatoria, reciban valores singularizados para cada una de las tres clases mencionadas de vehículos motorizados privados que utilizan combustibles convencionales, pero sin diferenciaciones adicionales entre corredores, ejes o itinerarios ni sentidos de recorrido. La inclusión de estas variables responde a la posible variabilidad aleatoria en el tipo de sesgo metodológico relacionado específicamente con las hipótesis realizadas para estimar las funciones de consumo medio<sup>177</sup> de cada una de las tres clases de vehículos (rango de cilindrada representativa, estándares de emisiones representativos, composición del conjunto de motocicletas y ciclomotores por cilindrada y por división entre motores de dos y cuatro tiempos, etc.).

Cuando a continuación se proceda a combinar los respectivos valores de cada pareja de variables aleatorias primigenias, por medio de su semisuma, se obtendrán las correspondientes distribuciones triangulares de partida, con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ . A consecuencia de este procedimiento de combinación se manifiestan dos tipos de correlaciones entre los valores aleatorios de las distribuciones triangulares de partida. Dado un determinado corredor, eje o itinerario en un cierto sentido de recorrido (es decir, fijados los índices  $i$  y  $k$ ), los valores aleatorios correspondientes al consumo medio de las tres clases distintas de vehículos motorizados van a estar correlacionados entre sí (de dos en dos) a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias (coeficiente de correlación de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ). Por otra parte, para cada una de estas tres clases de vehículos por separado también va a existir correlación (con coeficiente de Pearson igual a  $\frac{1}{2}$ ) entre los valores aleatorios que, a lo largo del conjunto de simulaciones, se utilicen para los diferentes corredores, ejes o itinerarios y sentidos de recorrido (es decir, para distintas duplas  $i, k$ ).

Así pues, es necesario establecer en primer lugar la variable aleatoria primigenia  $UFC_{ik}$ , de valores comunes a las tres clases de vehículos motorizados privados con combustible convencional, pero específicos de cada combinación entre corredor, eje o itinerario (representado por un índice de línea  $i$ ) y sentido de viaje ( $k$ ). Sus valores aleatorios se obtienen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$UFC_{ik} \sim U(0, 1) \longrightarrow UFC_{rik} = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.89)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

A continuación han de completarse los procedimientos de generación de valores aleatorios destinados al cálculo de los consumos medios de combustible en las distintas clases de vehículos motorizados privados que utilizan combustibles convencionales.

<sup>177</sup> Dichas funciones de consumo medio están basadas en la sección relativa a Transporte por Carretera de la 'Air Pollutant Emission Inventory Guidebook' (EMEP/EEA, 2016).

#### 6.4.5.3.a. Aleatorización primigenia del consumo promedio en automóviles diésel

El procedimiento de generación de valores aleatorios a emplear posteriormente para el cálculo del consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en automóviles diésel se completa mediante una variable aleatoria primigenia específica para el consumo de dicha clase de vehículos. Esta variable ( $UFCd$ ) está uniformemente distribuida en el intervalo (0,1).

Los valores aleatorios extraídos de la variable específica  $UFCd$  han de ser combinados, mediante semisuma, con los de la variable que es de uso común a las tres clases de vehículos ( $UFC_{ik}$ ), procedentes de la ecuación 6.89. Con ello se obtienen los valores aleatorios  $TRFCd_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Estos valores se habrán de recuperar posteriormente para su transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función de la velocidad media de circulación en automóvil particular).

Por tanto, para completar este procedimiento se aplican las siguientes ecuaciones:

$$UFCd \sim U(0,1) \longrightarrow UFCd_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.90.a)$$

$$TRFCd_{rik} = (UFC_{rik} + UFCd_r) / 2 \quad (6.90.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.5.3.b. Aleatorización primigenia del consumo promedio en automóviles de gasolina

La generación de valores aleatorios destinados a su posterior empleo en el cálculo del consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en automóviles de gasolina requiere la utilización de una variable aleatoria primigenia ( $UFCg$ ) específica para el consumo de esta clase de vehículos. Dicha variable se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1).

A continuación, los valores aleatorios de esta variable específica  $UFCg$  y los de la variable de uso común a las tres clases de vehículos ( $UFC_{ik}$ ) se deben combinar entre sí a lo largo de las sucesivas simulaciones aleatorias por medio de su semisuma. Se obtienen de esta forma los valores aleatorios  $TRFCg_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), los cuales serán utilizados posteriormente como base para la transformación a las distribuciones triangulares finales (también calculadas endógenamente por el modelo en función la velocidad media de circulación en automóvil particular).

En resumen, el procedimiento descrito se completa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$UFCg \sim U(0,1) \longrightarrow UFCg_r = \text{rand}[U(0,1)] \quad (6.91.a)$$

$$TRFCg_{rik} = (UFC_{rik} + UFCg_r) / 2 \quad (6.91.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$

#### 6.4.5.3.c. Aleatorización primigenia del consumo promedio en motos y ciclomotores (de gasolina)

Para completar el procedimiento de generación de los valores aleatorios destinados a ser utilizados posteriormente en el cálculo del consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida



en motos y ciclomotores de gasolina es necesario incorporar una variable aleatoria primigenia ( $UFCm$ ) específica para el consumo de este tipo de vehículos. Dicha variable está uniformemente distribuida en el intervalo  $(0,1)$ .

Los valores aleatorios de esta variable específica  $UFCm$  se deben combinar a continuación, mediante semisuma, con los de la variable de uso común a las tres clases de vehículos ( $UFC_{ik}$ ). De este modo se calculan los valores aleatorios  $TRFCm_{rik}$  de la distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), que posteriormente serán recuperados para su transformación a las distribuciones triangulares finales (calculadas endógenamente por el modelo en función la velocidad media de circulación en moto o ciclomotor).

En conclusión, el procedimiento propuesto se completa con la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$UFCm \sim U(0, 1) \longrightarrow UFCm_r = \text{rand}[U(0, 1)] \quad (6.92.a)$$

$$TRFCm_{rik} = (UFC_{rik} + UFCm_r) / 2 \quad (6.92.b)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; r = 1, 2, \dots, Nrs$$



## 7. Cálculos preliminares del modelo

### 7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan una serie de cálculos iniciales o preparatorios que pueden ser extraídos fuera del núcleo principal del modelo, ya que al no depender en su formulación de la evolución a lo largo del horizonte de evaluación de factores tales como la demanda de viajes, el reparto modal, los atributos de la oferta de transporte, etc. pueden ser obtenidos de forma directa (es decir, sin necesidad de recurrir a procedimientos iterativos como sí sucede en general en los módulos de cálculo que forman parte del núcleo principal del modelo). Esta serie de cálculos preliminares proporcionan como resultado variables intermedias (elaboradas a partir de datos de entrada) que son imprescindibles para su posterior utilización —a lo largo del Capítulo 8— por el núcleo principal del modelo.

Desde el punto de vista de su agrupación temática, esta serie de cálculos harán referencia, sucesivamente, a variables relacionadas con la delimitación de fases o etapas durante el horizonte de evaluación, con el tiempo teórico total de recorrido de una línea para los modos de transporte público en plataforma reservada (en condiciones cinemáticas ideales), con el uso de las líneas de transporte público (distancia media de viaje, tarifa media abonada, etc.), con el uso de los vehículos motorizados privados (longitud media recorrida, capacidades viarias, tasas de ocupación, etc.), con el volumen de viajes en el año base y las proporciones de viajeros cautivos, con el coste unitario medio del tiempo de viaje, con el reparto de vehículos-km (en transporte motorizado privado) por tipo de alimentación de energía, con los precios futuros de los combustibles y de la energía eléctrica, o con la obtención de valores de los parámetros ( $\lambda$  y  $\theta$ ) del modelo de demanda.

### 7.2. CÁLCULOS PRELIMINARES RELATIVOS A LA DELIMITACIÓN DE FASES O ETAPAS DURANTE EL HORIZONTE DE EVALUACIÓN

#### 7.2.1. Final de la fase de implantación del nuevo modo de transporte público y comienzo de la fase de introducción y consolidación del servicio

La variable  $Yimp_r^s$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el número de orden en la sucesión de años (asignando arbitrariamente un valor 1 al primer año del período u horizonte de evaluación, considerado inmediatamente posterior al año base) que corresponda al último año de la fase de implantación del nuevo modo de transporte público planificado para el escenario  $s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ).

Dado que se adopta, como hipótesis simplificadora de modelización, que los trabajos conducentes a la implantación del nuevo modo de transporte público se ponen en marcha de forma coincidente con el inicio del primer año del período u horizonte de evaluación (es decir, en  $y=1$ ), el valor de la variable  $Yimp_r^s$  vendrá determinado por la duración, en años, de dicha fase de implantación.

Admitiendo la factibilidad de que se trabaje simultáneamente en todas las líneas en las que se plantea la implantación del nuevo modo (si son más de una), la duración de la fase de implantación estará condicionada por aquella línea en la que se precise un mayor tiempo para completar todos los trabajos y

actividades previos a su puesta en marcha<sup>178</sup>. Por su parte, el tiempo necesario en cada línea se determina mediante el cociente entre su longitud ( $L_i$ ) y el ritmo o velocidad media de avance de los trabajos (km/año) en dicha línea (variable aleatoria  $Vimp_{ri}^s$ ). Por consiguiente, la duración de la fase de implantación será calculada en cada caso como el valor máximo de dichos cocientes en el conjunto de líneas analizadas. Finalmente, dado que el valor de la variable  $Yimp_r^s$  se define necesariamente como un número entero, se le aplica al valor previo una función de redondeo hacia el entero más cercano. Así pues, el cálculo de  $Yimp_r^s$  queda especificado en el modelo por la siguiente ecuación:

$$Yimp_r^s = nint \left( \max_{i=1, \dots, NL} \left\{ \frac{L_i}{Vimp_{ri}^s} \right\} \right) \quad (7.1)$$

con  $r = 1, 2, \dots, Nrs$  y  $s \in \{R, B\}$ , y siendo  $nint(x)$  la función de redondeo que toma como argumento un número real  $x$  y lo aproxima al entero más cercano (*nearest integer*).

Por último, obsérvese que bajo este planteamiento el año  $Yimp_r^s + 1$  representa el año de puesta en servicio del nuevo sistema de transporte público y por tanto el comienzo o primer año de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio (período de transición o '*ramp-up*'). El último año de dicha fase corresponderá al año  $Yma_r^s - 1$ , donde la variable  $Yma_r^s$  es definida a continuación.

### 7.2.2. Comienzo de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público

La variable  $Yma_r^s$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el número de orden —en la sucesión de años del período u horizonte de evaluación— correspondiente al primer año de la fase o etapa de madurez del nuevo modo de transporte público implantado en el escenario  $s$  (con  $s = R$  o  $s = B$ ).

El valor de la variable  $Yma_r^s$  vendrá determinado por la duración de las dos fases precedentes aumentada en una unidad, siendo aquellas la fase de implantación del nuevo modo (de duración, en años enteros,  $Yimp_r^s$ ) y la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio, cuya extensión en el tiempo está indicada por la variable aleatoria  $Nic_r^s$ . Obsérvese de nuevo que el valor de esta última variable debe ser redondeado en el modelo hacia el número entero más cercano, ya que  $Yma_r^s$  ha de corresponder necesariamente a un entero. Por tanto, el valor de la variable  $Yma_r^s$  se determina a través de la siguiente ecuación:

$$Yma_r^s = Yimp_r^s + nint(Nic_r^s) + 1 \quad (7.2)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\}$$

La fase de madurez de los nuevos servicios de transporte público se prolonga, al menos, hasta el final del horizonte o período de evaluación, que corresponde al año  $Yap$  (siendo  $Yap$  la duración en años de dicho período, introducida como dato del modelo).

<sup>178</sup> Nótese que, por simplicidad, se ha considerado que el nuevo sistema de transporte público se pone en servicio simultáneamente en todas las líneas objeto de análisis (en caso de que estas sean más de una), por lo que en aquellas líneas que teóricamente requerirían un menor tiempo de implantación será posible adaptar el ritmo de los trabajos (ralentizándolo) a la duración total necesaria para completar la línea 'crítica'.

### 7.3. CÁLCULO PRELIMINAR DEL TIEMPO TEÓRICO TOTAL DE RECORRIDO DE UNA LÍNEA EN CONDICIONES IDEALES, PARA LOS MODOS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN PLATAFORMA RESERVADA

Esta sección está destinada a obtener, en último término, la suma de los tiempos teóricos de recorrido en condiciones ideales acumulados a lo largo de todos los segmentos o tramos definidos por las estaciones o paradas de una línea, supuesta la operación de uno de los sistemas de transporte público dotados de plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, BHLS/BRT o bien metro ligero o tranvía). En general, se define el tiempo de recorrido (*running time*) de un tramo como el intervalo de tiempo transcurrido desde la partida del vehículo o unidad de transporte público de la parada inicial del tramo hasta su llegada a la siguiente parada (Vuchic, 2005: p. 14)<sup>179</sup>, la cual constituye el final de dicho tramo. En el ámbito de la presente tesis, se utiliza la denominación tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales para referirse al tiempo de recorrido que tendría lugar en ausencia de interferencias externas (otros tráficos, intersecciones a nivel, regulaciones semafóricas, cruce de peatones, etc.), limitaciones geométricas singulares, o cualquier otro tipo de condicionantes que perturben el normal desarrollo del movimiento del vehículo (uniformemente acelerado, uniforme a velocidad constante, o uniformemente decelerado) entre las dos paradas o estaciones que definen los extremos del tramo. Por tanto, se trata de un tiempo teórico calculado exclusivamente en base a parámetros cinemáticos básicos (aceleración y deceleración del vehículo, máxima velocidad programada u objetivo admisible en el tramo y longitud de dicho tramo entre paradas). Posteriormente, a lo largo del desarrollo del modelo, se definirá un coeficiente (variable  $\omega_{ryjk}^m$ ) destinado a incorporar la influencia, en las condiciones reales de operación, de este tipo de afecciones externas.

Para la obtención de este tiempo teórico de recorrido total se efectúa la secuencia de cálculos que se resume a continuación. En primer lugar, se determina la longitud de cada uno de los tramos entre estaciones o paradas. A continuación, se calcula la longitud mínima por debajo de la cual solo existen, en el movimiento del vehículo, fases de aceleración y de deceleración o frenado, no siendo posible llegar a una fase de velocidad constante igual a la máxima velocidad programada u objetivo definida para el tramo. En la tercera etapa se calculan los tiempos teóricos de recorrido de cada uno de los tramos, con expresiones diferenciadas en función de si su longitud es mayor o menor que la longitud límite determinada anteriormente. Finalmente, en la cuarta etapa se suman los tiempos teóricos de recorrido de todos los tramos de una línea, para cada uno de los posibles sentidos de circulación.

La segunda y tercera de las etapas descritas en el párrafo anterior están someramente basadas en Vuchic (1981: pp. 162-168) y en Vuchic (2005: pp. 14-15).

#### 7.3.1. Longitudes de los tramos entre paradas o estaciones

La variable  $\Delta s_{in}$  representa la longitud de recorrido del tramo  $n$  de la línea  $i$ , donde el tramo  $n$  se define como el segmento o sección comprendido entre las paradas o estaciones  $n-1$  y  $n$  de la línea en cuestión.

En el modelo desarrollado, la unidad de medida utilizada para la variable  $\Delta s_{in}$  es el kilómetro [km].

<sup>179</sup> Nótese que el significado dado al término 'tiempo de recorrido' no es totalmente homogéneo en la literatura técnica sobre operación del transporte público. Por ejemplo, en Molinero y Sánchez (2005: p. 403) se define el tiempo de recorrido como el intervalo de tiempo entre la salida del vehículo o unidad de transporte de una terminal o cabecera de línea y su llegada a la terminal o cabecera opuesta (o a la misma terminal de cierre en el caso de líneas circulares). Sin embargo, en el ámbito de esta tesis y conforme a Vuchic (2005: p. 15), dicho concepto se designará como tiempo de operación (con la particularidad de considerar incluidos también en el mismo los tiempos dedicados a la subida y bajada de pasajeros en las terminales de inicio y final de la ruta). Por su parte, Ceder (2007: p. 8) hace un uso más flexible y genérico del concepto de tiempo de recorrido o '*running time*', pudiendo referirse —según el contexto— tanto al tiempo de viaje entre dos paradas como al tiempo entre cualesquiera otros dos puntos de control en el trayecto de la línea.

De acuerdo a su definición y a los criterios establecidos para definir la posición longitudinal de las paradas, medida desde el origen de la línea, la variable  $\Delta s_m$  se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta s_{i1} = s_{i1} \quad (7.3.a)$$

$$\Delta s_{in} = s_{in} - s_{i,n-1} \quad (7.3.b)$$

$$\Delta s_{i,Nsc_i} = L_i - s_{i,Nsc_i-1} \quad (7.3.c)$$

siendo:

$$Nsc_i = \left\{ \begin{array}{ll} = Nst_i - 1 & \text{si } TypL_i = LT \\ = Nst_i & \text{si } TypL_i = RT \vee TypL_i = RO \end{array} \right\} \quad (7.4)$$

En este grupo de ecuaciones, los índices genéricos referidos a la línea ( $i$ ) y al tramo ( $n$ ) han de tomar los siguientes valores:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; n = 2, 3, \dots, Nsc_i - 1$$

### 7.3.2. Longitud mínima necesaria entre paradas o estaciones consecutivas para alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo de cada tramo

La variable  $\Delta slim_{ink}^m$  indica la longitud mínima necesaria del tramo  $n$  entre paradas o estaciones de la línea  $i$  para poder alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo admisible para dicho tramo (recorrido en el sentido  $k$ ) en la operación del modo  $m$  de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, con  $m=R$  o  $m=B$ ).

La unidad de medida empleada en el modelo desarrollado para expresar la variable  $\Delta slim_{ink}^m$  es nuevamente el kilómetro [km].

La longitud mínima necesaria de un tramo entre paradas para que sea posible alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo antes de que deba iniciarse la fase de deceleración o frenado (al objeto de detener el vehículo en la parada de final de tramo) depende, en primer lugar, de cuál sea dicha velocidad máxima programada u objetivo, junto con las prestaciones de aceleración y frenado de los vehículos utilizados en la operación.

En este sentido, para poder determinar dicha longitud debe considerarse el caso límite o frontera entre aquellas situaciones en las que la longitud del tramo permite alcanzar y mantener durante un cierto tiempo la máxima velocidad programada u objetivo (véase Figura 7.1, *caso a*) y aquellos otros casos en los que la longitud del tramo resulta insuficiente para llegar a dicha velocidad por ser necesario iniciar antes de ello la fase de deceleración o frenado (Figura 7.1, *caso b*). Así pues, en dicho caso límite el vehículo acelera desde una velocidad inicial nula hasta llegar a la máxima velocidad programada u objetivo, y en el mismo instante en el que alcanza dicha velocidad comienza a aplicar el freno hasta la detención, tal como puede observarse en el *caso c* de la Figura 7.1. La distancia total recorrida durante estas dos fases de aceleración y de deceleración o frenado determina la longitud mínima necesaria que limita las dos posibles situaciones. Por tanto se tiene al respecto:

$$\Delta s_{lim} = l_a + l_b \quad (7.5)$$

donde  $\Delta s_{lim}$  representa la longitud necesaria para acelerar hasta la máxima velocidad programada u objetivo y decelerar hasta la detención;  $l_a$  es la distancia recorrida en la fase completa de aceleración; y  $l_b$  denota la longitud recorrida durante la fase completa de deceleración o frenado.

Por cinemática básica aplicada a un movimiento uniformemente acelerado (nótese que la aceleración y deceleración de los vehículos se consideran constantes), se tiene que <sup>180</sup>:

$$l_a = v_{i,a} \cdot t_a + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_a^2 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_a^2 \quad (7.6.a)$$

siendo  $v_{i,a}$  la velocidad inicial de la fase de aceleración (la cual es igual a 0, pues se parte del reposo);  $t_a$  el tiempo empleado durante la fase completa de aceleración; y  $a$  la aceleración media del vehículo.

Similarmente, para la fase de deceleración o frenado se tiene:

$$l_b = v_{i,b} \cdot t_b + \frac{1}{2} \cdot (-b) \cdot t_b^2 = v_g \cdot t_b - \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_b^2 \quad (7.6.b)$$

donde  $v_{i,b}$  representa la velocidad inicial de la fase de deceleración o frenado (la cual es igual en este caso a la máxima velocidad programada u objetivo, denotada por  $v_g$ );  $t_b$  es el tiempo transcurrido durante la fase completa de deceleración o frenado; y  $b$  representa la deceleración media del vehículo en condiciones de frenado de servicio (tomada como positiva, o valor absoluto de la aceleración negativa de frenado).

Para determinar el tiempo  $t_a$  empleado durante la fase completa de aceleración se recurre simplemente a la siguiente relación:

$$v_g = v_{i,a} + a \cdot t_a = 0 + a \cdot t_a \Rightarrow t_a = \frac{v_g}{a} \quad (7.7.a)$$

Análogamente, para el tiempo  $t_b$  transcurrido durante la fase completa de deceleración o frenado se obtiene la siguiente expresión, en la que se tiene en cuenta que la velocidad final de la dicha fase es nula:

$$0 = v_{i,b} - b \cdot t_b = v_g - b \cdot t_b \Rightarrow t_b = \frac{v_g}{b} \quad (7.7.b)$$

A continuación, sustituyendo el resultado de la ecuación 7.7.a en 7.6.a se obtiene para la longitud recorrida durante la fase completa de aceleración la siguiente expresión:

$$l_a = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left( \frac{v_g}{a} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \frac{1}{a} \quad (7.8.a)$$

Del mismo modo, para la distancia recorrida en la fase completa de deceleración o frenado se obtiene al sustituir el resultado de la ecuación 7.7.b en 7.6.b la siguiente relación:

$$l_b = v_g \cdot \frac{v_g}{b} - \frac{1}{2} \cdot b \cdot \left( \frac{v_g}{b} \right)^2 = \frac{v_g^2}{b} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_g^2}{b} = \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \frac{1}{b} \quad (7.8.b)$$

Así pues, por sustitución de las ecuaciones 7.8.a y 7.8.b en 7.5 se llega finalmente a la siguiente expresión para la longitud mínima necesaria  $\Delta s_{lim}$ :

$$\Delta s_{lim} = \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \frac{1}{a} + \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \frac{1}{b} = \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (7.9.a)$$

donde todas las variables se expresan en unidades fundamentales del Sistema Internacional, es decir:  $\Delta s_{lim}$  [m];  $v_g$  [m/s];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>].

<sup>180</sup> La distancia recorrida entre dos instantes cualesquiera  $t_1$  y  $t_2$  también puede interpretarse —gráficamente en la Figura 7.1— como el área bajo la curva o función de velocidad  $v(t)$  entre las abscisas  $t_1$  y  $t_2$ .

No obstante, adaptando la ecuación 7.9.a a las unidades de medida utilizadas para definir las variables análogas del modelo (esto es:  $\Delta s_{lim}$  [km];  $V_g$  [km/h];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>]) se obtiene la expresión indicada a continuación:

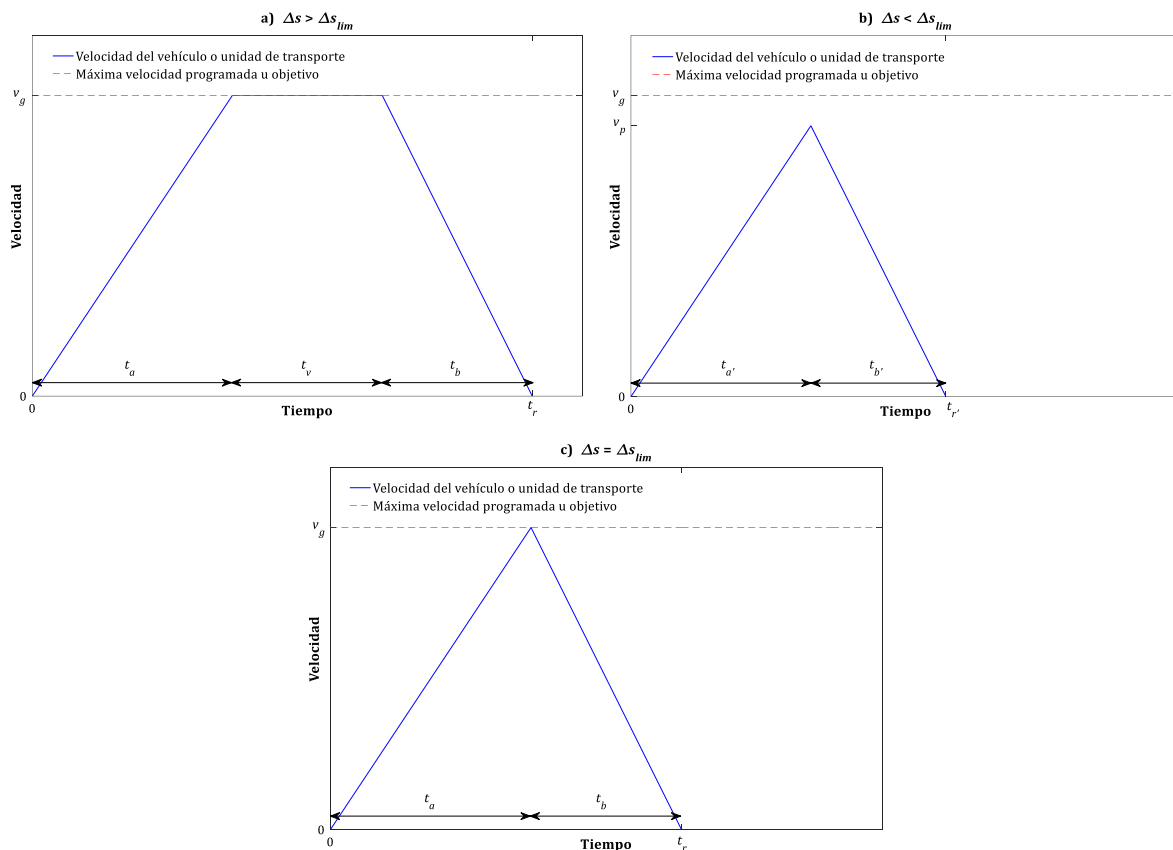
$$\Delta s_{lim} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_g}{3.6} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \cdot \frac{1}{10^3} \tag{7.9.b}$$

Por tanto, la ecuación 7.9.b sirve de base para conformar a su vez la ecuación 7.10, que es la definitivamente utilizada en la modelización. Para ello simplemente se sustituye la notación simplificada empleada en las ecuaciones 7.5 a 7.9.b por las variables homólogas definidas para el modelo desarrollado. Al respecto, nótese que, de acuerdo a Vuchic (2005: p. 19), se considera la posibilidad de que la velocidad programada u objetivo de un mismo tramo pueda ser distinta en cada sentido, lo que daría lugar también a longitudes mínimas necesarias diferentes para ambos sentidos. En conclusión:

$$\Delta s_{lim}^m = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{Vg_{ink}^m}{3.6} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{a_{TypV_i^m}^m} + \frac{1}{b_{TypV_i^m}^m} \right) \tag{7.10}$$

En la ecuación 7.10, el conjunto de índices genéricos ( $m, i, n, k$ ) ha de adoptar los siguientes valores:

$$m \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; n = 1, 2, \dots, Nsc_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$



**Figura 7.1.** Posibles situaciones en el cálculo del tiempo teórico de recorrido de un tramo entre paradas o estaciones consecutivas: a)  $\Delta s > \Delta s_{lim}$ ; b)  $\Delta s < \Delta s_{lim}$ ; c)  $\Delta s = \Delta s_{lim}$ .



### 7.3.3. Tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales para cada tramo entre paradas o estaciones consecutivas

La variable  $tr_{ink}^m$  representa el tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales (es decir, calculado únicamente a partir de parámetros cinemáticos básicos) para el tramo  $n$  entre paradas o estaciones de la línea  $i$  (recorrido dicho tramo en el sentido  $k$ ), dada la operación del modo  $m$  de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, con  $m=R$  o  $m=B$ ).

En el modelo desarrollado, la variable  $tr_{ink}^m$  utiliza el minuto [min] como unidad de medida.

Tal como se anticipó en el epígrafe anterior, para obtener el tiempo teórico de recorrido en cualquier tramo genérico es preciso diferenciar entre dos posibles casos: por una parte, aquellos en los que la longitud del tramo resulta suficiente para alcanzar y mantener durante un cierto tiempo la máxima velocidad programada u objetivo y, por otro lado, aquellas otras situaciones en las que la longitud del tramo es demasiado corta para poder llegar a dicha velocidad (al ser necesario comenzar la fase de deceleración o frenado a fin de detener el vehículo en la siguiente parada).

Así pues, en el primero de los casos (véase Figura 7.1, caso *a*) se tiene que la longitud del tramo entre paradas ( $\Delta s$ ) es mayor que la longitud mínima necesaria ( $\Delta s_{lim}$ ) para alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo del tramo y decelerar hasta la detención. En estas condiciones, el tiempo teórico de recorrido es la suma del tiempo empleado durante la fase completa de aceleración ( $t_a$ ), el tiempo necesario para la fase completa de deceleración o frenado ( $t_b$ ) y el tiempo  $t_v$  durante el cual el vehículo puede circular a una velocidad constante igual a la máxima programada u objetivo ( $v_g$ ). Por tanto:

$$\text{si } \Delta s > \Delta s_{lim} \Rightarrow t_r = t_a + t_b + t_v \quad (7.11)$$

donde  $t_r$  representa, en notación simplificada, el tiempo teórico de recorrido de un tramo individual.

Siendo  $l_v$  la distancia recorrida durante la fase de velocidad constante e igual a  $v_g$ , se tiene además:

$$t_v = \frac{l_v}{v_g} \quad (7.12)$$

Por otra parte, la longitud total del tramo tiene que ser en este caso necesariamente igual a la suma de las distancias recorridas durante la fase completa de aceleración ( $l_a$ ), en la fase completa de deceleración o frenado ( $l_b$ ) y durante la fase de velocidad constante ( $l_v$ ). Por consiguiente:

$$\text{si } \Delta s > \Delta s_{lim} \Rightarrow \Delta s = l_a + l_b + l_v \Rightarrow l_v = \Delta s - (l_a + l_b) \quad (7.13.a)$$

Recordando las ecuaciones 7.8.a y 7.8.b y sustituyéndolas en 7.13.a, se obtiene para la distancia recorrida a velocidad constante la siguiente expresión:

$$l_v = \Delta s - \frac{1}{2} \cdot v_g^2 \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (7.13.b)$$

A continuación, sustituyendo la ecuación 7.13.b en 7.12 se obtiene la expresión que permite calcular el tiempo transcurrido a velocidad constante:

$$t_v = \frac{\Delta s}{v_g} - \frac{1}{2} \cdot v_g \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (7.14)$$

Finalmente, por sustitución de las ecuaciones 7.7.a, 7.7.b y 7.14 en 7.11, se llega a que el tiempo teórico de recorrido del tramo viene dado por la siguiente expresión:

$$t_r = \frac{v_g}{a} + \frac{v_g}{b} + \frac{\Delta s}{v_g} - \frac{1}{2} \cdot v_g \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{\Delta s}{v_g} + \frac{1}{2} \cdot v_g \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (7.15.a)$$

donde todas las variables participantes se expresan en unidades fundamentales del Sistema Internacional:  $t_r$  [s];  $\Delta s$  [m];  $v_g$  [m/s];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>].

Introduciendo en la ecuación 7.15.a los factores de conversión necesarios para adaptar dicha expresión a las unidades de medida empleadas en la cuantificación numérica de las variables equivalentes del modelo (es decir:  $t_r$  [min];  $\Delta s$  [km];  $V_g$  [km/h];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>]) se obtiene asimismo la ecuación 7.15.b. Esta última es la que sirve de referencia para configurar la ecuación 7.23.a (que será la empleada definitivamente por el modelo desarrollado) mediante sustitución de la notación simplificada por las variables equivalentes del propio modelo.

$$t_r = \frac{1}{60} \cdot \left[ \frac{10^3 \cdot \Delta s}{\frac{V_g}{3.6}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_g}{3.6} \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right] = \frac{1}{60} \cdot \left[ 3600 \cdot \frac{\Delta s}{V_g} + \frac{V_g}{7.2} \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \right] \quad (7.15.b)$$

Por su parte, el segundo de los posibles casos (véase Figura 7.1, caso b) se produce cuando la longitud del tramo ( $\Delta s$ ) es menor o igual que la longitud mínima necesaria ( $\Delta s_{lim}$ ) para poder alcanzar la máxima velocidad programada u objetivo del tramo y decelerar hasta la detención. Bajo estas condiciones, la velocidad máxima que es posible lograr (denotada por  $v_p$ ) se alcanza en el momento en el que se pasa repentinamente de la fase de aceleración a la de deceleración o frenado, y es menor (o igual en el caso límite representado en la Figura 7.1.c) que la máxima velocidad programada u objetivo ( $v_p \leq v_g$ ). En este caso, el tiempo teórico de recorrido ( $t_r$ ) es igual a la suma del tiempo  $t_{a'}$  transcurrido durante la fase de aceleración (desde el arranque en parada hasta alcanzar la velocidad  $v_p$ ) y el tiempo  $t_{b'}$  empleado durante la fase de deceleración o frenado (desde la velocidad  $v_p$  hasta la detención). Es decir:

$$\text{si } \Delta s \leq \Delta s_{lim} \Rightarrow t_r = t_{a'} + t_{b'} \quad (7.16)$$

Además, la relación de los tiempos  $t_{a'}$  y  $t_{b'}$  con la velocidad máxima que es posible alcanzar ( $v_p$ ) viene dada por las siguientes expresiones cinemáticas:

$$v_p = v_{i,a'} + a \cdot t_{a'} = 0 + a \cdot t_{a'} = a \cdot t_{a'} \Rightarrow t_{a'} = \frac{v_p}{a} \quad (7.17.a)$$

$$0 = v_{i,b'} - b \cdot t_{b'} = v_p - b \cdot t_{b'} \Rightarrow v_p = b \cdot t_{b'} \Rightarrow t_{b'} = \frac{v_p}{b} \quad (7.17.b)$$

donde  $v_{i,a'}$  y  $v_{i,b'}$  son las velocidades iniciales de las fases de aceleración y de frenado o deceleración, que en este caso son iguales a 0 y a  $v_p$ , respectivamente.

De las ecuaciones 7.17.a y 7.17.b es posible extraer también la siguiente relación:

$$a \cdot t_{a'} = b \cdot t_{b'} \Rightarrow t_{b'} = \frac{a}{b} \cdot t_{a'} \quad (7.17.c)$$

Desde el punto de vista de las distancias recorridas, la longitud del tramo es igual en este caso a la suma de las distancias transitadas durante la fase de aceleración ( $l_{a'}$ ) y durante la fase de deceleración o frenado ( $l_{b'}$ ):

$$\text{si } \Delta s \leq \Delta s_{lim} \Rightarrow \Delta s = l_{a'} + l_{b'} \quad (7.18)$$

Además, en base a las ecuaciones que determinan la distancia recorrida por una partícula en un movimiento uniformemente acelerado (e introduciendo los resultados de las ecuaciones 7.17.a y 7.17.b) se obtiene:

$$l_{a'} = v_{i,a'} \cdot t_{a'} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_{a'}^2 = 0 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_{a'}^2 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left( \frac{v_p}{a} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot v_p^2 \cdot \frac{1}{a} \quad (7.19.a)$$

$$l_{b'} = v_{i,b'} \cdot t_{b'} + \frac{1}{2} \cdot (-b) \cdot t_{b'}^2 = v_p \cdot \frac{v_p}{b} - \frac{1}{2} \cdot b \cdot \left( \frac{v_p}{b} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot v_p^2 \cdot \frac{1}{b} \quad (7.19.b)$$

Sustituyendo las ecuaciones 7.19.a y 7.19.b en 7.18, y teniendo en cuenta además que  $v_p = a \cdot t_{a'}$  (véase ecuación 7.17.a), es posible obtener la siguiente igualdad:

$$\Delta s = \frac{1}{2} \cdot v_p^2 \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot t_{a'}^2 \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (7.20)$$

A partir de la ecuación 7.20 se puede despejar  $t_{a'}$  del siguiente modo:

$$t_{a'} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{a^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}}} = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}}} \quad (7.21.a)$$

A continuación, con las ecuaciones 7.17.c y 7.21.a se obtiene:

$$t_{b'} = \frac{a}{b} \cdot t_{a'} = \frac{1}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}}} \quad (7.21.b)$$

Finalmente, por sustitución de las ecuaciones 7.21.a y 7.21.b en 7.16 se llega a la siguiente expresión para el cálculo del tiempo teórico de recorrido de un tramo cuando  $\Delta s \leq \Delta s_{lim}$ :

$$t_{r'} = \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}}} = \sqrt{2 \cdot \Delta s \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad (7.22.a)$$

donde todas las variables implicadas se expresan en unidades fundamentales del Sistema Internacional, es decir:  $t_{r'}$  [s];  $\Delta s$  [m];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>].

El siguiente paso consiste en adaptar la ecuación 7.22.a a las unidades de medida utilizadas en la definición de las variables análogas del modelo ( $t_{r'}$  [min];  $\Delta s$  [km];  $a$  [m/s<sup>2</sup>];  $b$  [m/s<sup>2</sup>]), para lo que se introducen los factores de conversión correspondientes. Se da así lugar a la ecuación 7.22.b, la cual sirve de base a su vez para constituir la ecuación 7.23.b, que es la empleada específicamente por el modelo desarrollado. Para ello se sustituye la notación simplificada de la ecuación 7.22.b por las respectivas variables equivalentes del modelo.

$$t_{r'} = \frac{1}{60} \cdot \sqrt{2 \cdot 10^3 \cdot \Delta s \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad (7.22.b)$$

En conclusión, y a modo de compendio de los dos posibles casos que pueden presentarse para cada tramo, se especifican a continuación, en las ecuaciones 7.23.a y 7.23.b, las expresiones matemáticas utilizadas en la modelización desarrollada para el cálculo de la variable  $tr_{ink}^m$ .

Si  $\Delta s_{lim}^m < \Delta s_{in}$ :

$$tr_{ink}^m = \frac{1}{60} \cdot \left[ 3600 \cdot \frac{\Delta s_{in}}{Vg_{ink}^m} + \frac{Vg_{ink}^m}{7.2} \cdot \left( \frac{1}{a_{TypV_i}^m} + \frac{1}{b_{TypV_i}^m} \right) \right] \quad (7.23.a)$$

Si  $\Delta s_{lim}^m \geq \Delta s_{in}$ :

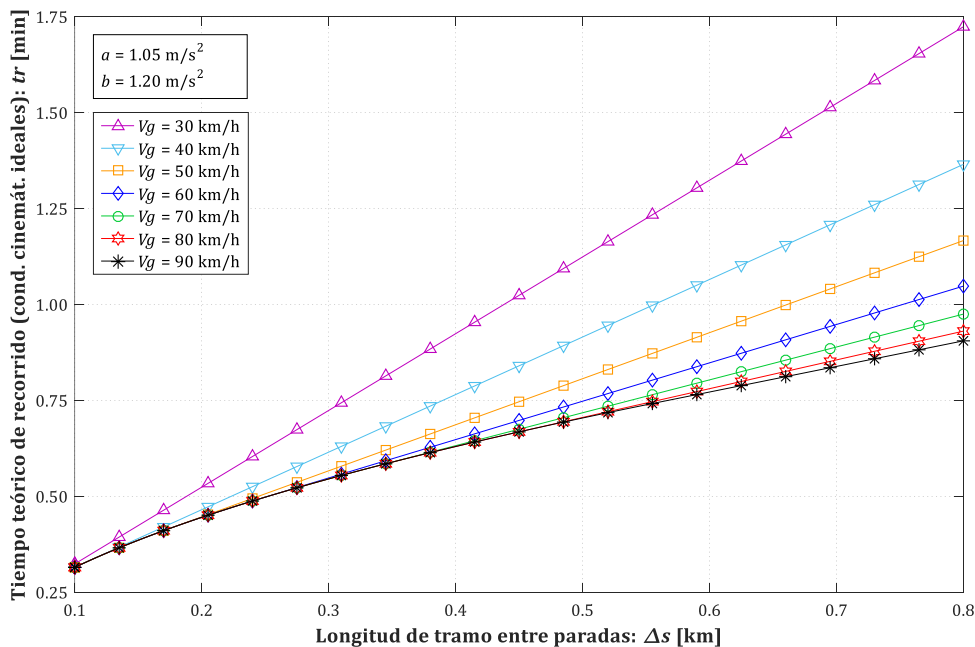
$$tr_{ink}^m = \frac{1}{60} \cdot \sqrt{2 \cdot 10^3 \cdot \Delta s_{in} \cdot \left( \frac{1}{a_{TypV_i}^m} + \frac{1}{b_{TypV_i}^m} \right)} \quad (7.23.b)$$

En este grupo de ecuaciones (7.23.a y 7.23.b), los índices genéricos  $(m, i, n, k)$  presentes en las mismas han de tomar los mismos valores que se indicaron para el cálculo de la variable  $\Delta s_{lim}^m$  en la ecuación 7.10, es decir:

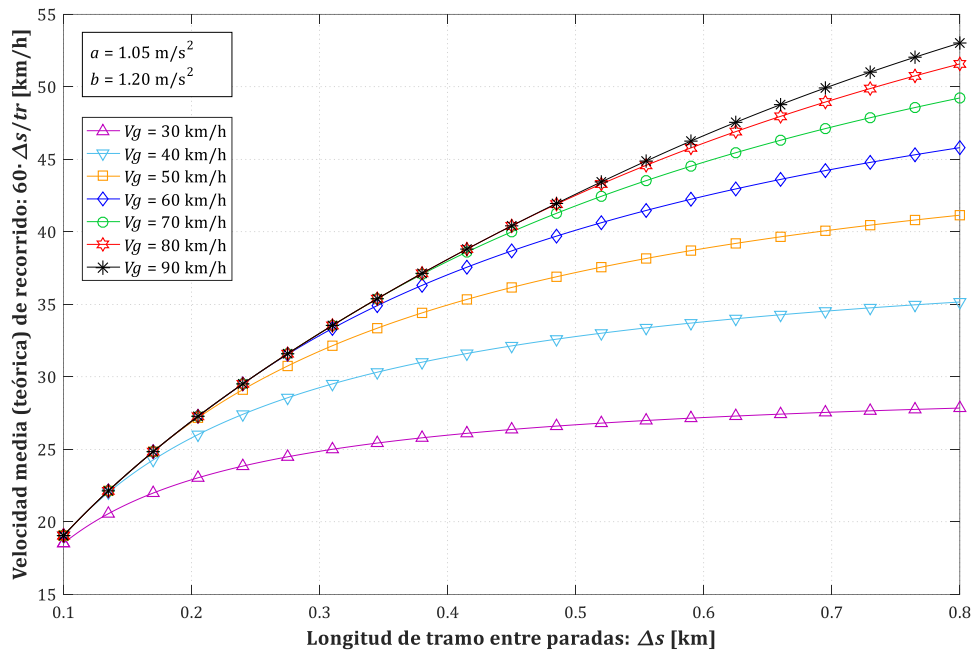
$$m \in \{R, B\}; i = 1, 2, \dots, NL; n = 1, 2, \dots, Nsc_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

A continuación, en la Figura 7.2 se muestran gráficamente los resultados de aplicar las ecuaciones 7.23.a y 7.23.b, lo que permite visualizar la variación o evolución del tiempo teórico de recorrido (en condiciones ideales) de un tramo entre paradas o estaciones en función de la longitud que presente dicho tramo. Esta variación se representa para un abanico de diversos valores de la máxima velocidad programada u objetivo (entre 30 y 90 km/h), con la aceleración y deceleración de los vehículos o unidades de transporte fijada en 1.05 y 1.20 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Estos valores pueden considerarse dentro de un rango razonablemente válido —aunque con cierto margen de variación, en uno u otro caso— tanto para BHLS o BRT como para metro ligero o tranvía (véanse epígrafes 5.3.4 y 5.3.5).

Por su parte, la Figura 7.3 parte de los resultados anteriores para mostrar, más claramente, la variación de la velocidad teórica media de recorrido de un tramo (en condiciones ideales) con la longitud del mismo. Dicha velocidad media (en km/h) se obtiene simplemente como  $60 \cdot \Delta s / tr$ , con  $\Delta s$  en kilómetros y  $tr$  en minutos (Vuchic, 2005: p. 19). Se mantiene además el mismo abanico de valores de la máxima velocidad programada u objetivo que en la Figura 7.2, así como las prestaciones de aceleración y deceleración de los vehículos.



**Figura 7.2.** Variación del tiempo teórico de recorrido (en condiciones ideales) de un tramo entre paradas o estaciones con la longitud de dicho tramo, para diversos valores de máxima velocidad programada u objetivo y cuantías fijas de aceleración y deceleración.



**Figura 7.3.** Variación de la velocidad media (teórica o en condiciones ideales) de recorrido de un tramo en función de la longitud del mismo, para diversos valores de máxima velocidad programada u objetivo y cuantías fijas de aceleración y deceleración.

### 7.3.4. Tiempo teórico total de recorrido de la totalidad de los tramos de una línea en condiciones ideales

La variable  $Trl_{ik}^m$  se define como la suma de los tiempos teóricos de recorrido en condiciones ideales de la totalidad de los tramos entre paradas o estaciones de la línea  $i$  (transitados en sentido  $k$ ), supuesta la operación del modo  $m$  de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, con  $m=R$  o  $m=B$ ).

Al igual que con  $tr_{ink}^m$ , para la variable  $Trl_{ik}^m$  se emplea el minuto [min] como unidad de medida para la cuantificación numérica dentro del modelo desarrollado.

Nótese que el tiempo teórico total  $Trl_{ik}^m$  así calculado incluye la influencia de todas las fases de aceleración y de deceleración o frenado vinculadas a cada una de las estaciones o paradas de la línea, pero no los tiempos de estación o parada propiamente dichos (tiempos que el vehículo permanece detenido al objeto de atender las subidas y bajadas de pasajeros). Estos tiempos deben incorporarse posteriormente por separado.

De acuerdo a su definición, la variable  $Trl_{ik}^m$  se calcula en el modelo desarrollado mediante la siguiente ecuación:

$$Trl_{ik}^m = \sum_{n=1}^{Nsc_i} tr_{ink}^m \tag{7.24}$$

donde aquellos índices que no son de suma (es decir:  $m, i, k$ ) deben adoptar los valores que se señalan a continuación:

$$m \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

## 7.4. CÁLCULOS PRELIMINARES RELACIONADOS CON EL USO DE LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

### 7.4.1. Distancia media de desplazamiento de los pasajeros del modo de transporte público

La variable  $Ltpb_{ijk}$  representa la distancia media recorrida a bordo del vehículo de transporte público (es decir, entre la parada o estación de subida y la parada o estación de bajada) por los pasajeros que hacen uso de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . La unidad utilizada en el modelo para expresar esta variable es el kilómetro [km].

Una de las formas más prácticas de obtener la distancia media recorrida por cada pasajero de una determinada línea de transporte público se basa en dividir el número total de pasajeros-km realizados por los usuarios de dicha línea entre el número de viajes contabilizados en la misma (Vuchic, 2005: p. 39), el cual viene dado por la cantidad de subidas registradas a lo largo de la línea en el sentido de viaje analizado (todo ello cuantificado durante un determinado período de tiempo). Este planteamiento se traduce en la siguiente ecuación:

$$l_{av} = \frac{\sum_{n=1}^N P_n \cdot \Delta s_n}{\sum_{n=1}^N bp_n} \quad (7.25.a)$$

donde  $l_{av}$  representa la distancia media recorrida por pasajero,  $P_n$  indica el volumen de pasajeros (por hora) que atraviesan el tramo o segmento  $n$ -ésimo de la línea en un determinado sentido,  $\Delta s_n$  es la longitud de dicho tramo  $n$ -ésimo,  $bp_n$  (*boarding passengers*) simboliza el número de pasajeros (por hora) que suben a los vehículos de transporte público en la parada o estación en la que comienza el tramo o segmento  $n$ -ésimo, y  $N$  constituye el número total de tramos o segmentos de la línea (delimitados por la posición de las paradas o estaciones).

Retomando la ecuación 5.4 (vista en el Capítulo 5), puede observarse que a partir de la definición del coeficiente  $\delta$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de una línea) puede obtenerse la siguiente relación:

$$\delta = \frac{\sum_{n=1}^N P_n \cdot \Delta s_n}{P_{max} \cdot L} \Rightarrow \sum_{n=1}^N P_n \cdot \Delta s_n = \delta \cdot P_{max} \cdot L \quad (7.25.b.i)$$

siendo  $P_{max}$  el volumen de pasajeros (por hora) que atraviesan, en un determinado sentido, la sección de máxima demanda (S.M.D.) de la línea de transporte público y  $L$  la longitud de dicha línea.

Por otra parte, a partir de la definición matemática del coeficiente  $\sigma$  (coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda) en la ecuación 5.3.a, y teniendo en cuenta que el sumatorio de los pasajeros que, en un determinado sentido, suben a los vehículos de transporte público a lo largo de todas las paradas o estaciones de la línea es, por definición, equivalente a  $q_{PT}$  (número total de pasajeros por hora en ese mismo sentido), es inmediato obtener también las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = \frac{P_{max}}{q_{PT}} \\ q_{PT} = \sum_{n=1}^N bp_n \end{array} \right\} \Rightarrow \sum_{n=1}^N bp_n = \frac{P_{max}}{\sigma} \quad (7.25.b.ii)$$

A continuación, sustituyendo los resultados de las ecuaciones 7.25.b.i y 7.25.b.ii en 7.25.a, se llega por último a la siguiente igualdad para la distancia media recorrida por pasajero:

$$l_{av} = \delta \cdot \sigma \cdot L \quad (7.25.c)$$

Obsérvese que este resultado coincide con el que se puede extraer de Vuchic (2005: p. 41, Eq. 1.40), sin más que tener en cuenta que el parámetro  $\delta$  es equivalente al inverso del coeficiente de variaciones del flujo (*coefficient of flow variations*) y que  $\sigma$  coincide con el inverso del coeficiente de intercambio de pasajeros (*coefficient of passenger exchange*).

Finalmente, trasladando el significado genérico de la ecuación 7.25.c a las variables propias del modelo, se obtiene que el cálculo de la variable  $Ltpb_{ijk}$  ha de estar determinado por la siguiente ecuación:

$$Ltpb_{ijk} = \delta_{ijk} \cdot \sigma_{ijk} \cdot L_i \quad (7.26)$$

donde:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

#### 7.4.2. Tarifa media abonada por cada viaje en los modos de transporte público

La variable  $FARav_{ijk}^m$  representa la tarifa abonada o desembolsada, de media, por cada pasajero que haga uso del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , dadas las fracciones o proporciones de viajes pagados mediante cada modalidad tarifaria en dicha situación. De acuerdo a su significado, esta variable se expresa numéricamente en el modelo en unidades monetarias [CU] (por viaje).

Este coste medio por pasajero —o ingreso desde el punto de vista del operador— se calcula simplemente ponderando el precio establecido en cada modo de transporte público para cada una de las modalidades tarifarias (variable  $far_n^m$  con  $n = 1, 2, \dots, Nfar$ , siendo  $Nfar$  el número de modalidades de tarifa que se han considerado) según las fracciones o proporciones del conjunto de viajes en transporte público que son abonados mediante cada una de estas modalidades tarifarias en el caso de la línea, período horario y sentido de viaje que esté siendo analizado (estando dichas fracciones representadas por la variable de entrada  $Pfar_{nijk}$ ). Así pues, el cálculo de  $FARav_{ijk}^m$  se rige por la siguiente ecuación:

$$FARav_{ijk}^m = \sum_{n=1}^{Nfar} Pfar_{nijk} \cdot far_n^m \quad (7.27)$$

con:

$$m \in \{0, R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.5. CÁLCULOS PRELIMINARES RELACIONADOS CON EL USO DE LOS VEHÍCULOS MOTORIZADOS PRIVADOS

#### 7.5.1. Longitud media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado

La variable  $Ltpr_{rijk}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la longitud media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  por parte de los viajes en vehículo motorizado privado (con un recorrido sensiblemente coincidente con el del transporte público) efectuados durante el período

horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable es expresada numéricamente en el modelo en unidades de kilómetros [km].

De acuerdo a la estructura de datos planteada para el modelo, esta longitud media en vehículo motorizado privado se encuentra relacionada con la distancia media recorrida por los pasajeros del transporte público por medio de la variable aleatoria  $lp_{rijk}$  (con valores obtenidos en función de los datos introducidos para  $lpmin_{ijk}$ ,  $lpmax_{ijk}$  y  $lpmod_{ijk}$ ). Dicha variable se define precisamente como el ratio o razón de proporcionalidad entre ambas distancias, de tal modo que la obtención de valores para  $Ltpr_{rijk}$  responde simplemente a la siguiente expresión:

$$Ltpr_{rijk} = lp_{rijk} \cdot Ltpr_{ijk} \quad (7.28)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.5.2. Capacidad viaria para tráfico mixto en los diferentes escenarios, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $CMT_{ryik}^s$  señala, para la simulación aleatoria  $r$ , la capacidad para tráfico mixto que es representativa del vial o viales de circulación en los que se inserta la línea  $i$ , siendo aquellos recorridos en el sentido  $k$ , y dada la configuración de las infraestructuras viarias prevista para el año  $y$  en el escenario  $s$ . Las unidades empleadas en el modelo para cuantificar numéricamente esta variable son automóviles ligeros equivalentes por hora [PCE/h] para cada sentido de viaje.

Para establecer los valores de la variable  $CMT_{ryik}^s$  es preciso tener en cuenta los distintos escenarios planteados (en particular, diferenciar entre aquellos que implican la inserción de una nueva plataforma reservada en la sección del viario existente y por tanto posibles cambios en la capacidad para tráfico mixto, y el escenario base, en el cual se mantiene la capacidad inicial inalterada), así como distinguir también las diferentes fases o etapas que tienen lugar a lo largo del horizonte o período de evaluación.

En el caso del escenario base ( $s=0$ ), en el que se continúa con la operación con autobús convencional en tráfico mixto como modo de transporte público, se asume que no se producen cambios en la configuración del vial o viales de circulación existentes (escenario de tipo '*do-minimum*'), con lo cual se mantiene a lo largo de todo el horizonte de evaluación la capacidad viaria establecida para el año base (es decir,  $CMT_{rik}^*$ , procedente de la ecuación 6.38.c).

Distintas son las condiciones en el caso de los escenarios 'R' (implantación de metro ligero o tranvía) y 'B' (implantación de BHLS/BRT). En estos casos se parte también de que la capacidad viaria para tráfico mixto en el año base viene dada por la variable  $CMT_{rik}^*$ , pero, tras completar la fase de implantación del nuevo modo de transporte público en plataforma reservada, dicha capacidad quedará establecida en  $CMTn_{rik}^s$  (procedente de la ecuación 6.39.c) según sea el escenario analizado, manteniéndose constante a partir de entonces.

Entre uno y otro momento se lleva a cabo la fase de implantación física del nuevo modo de transporte público en plataforma reservada, durante la cual se asume, de cara a la modelización, que se produce la progresiva transformación —con el consiguiente cierre parcial o total al tráfico para el desarrollo de los trabajos— de los sucesivos tramos o sectores que componen el itinerario de la línea (probablemente con una mayor velocidad de avance durante el período central de dicha fase de implantación<sup>181</sup>). Desde el

<sup>181</sup> Las etapas inicial y final pueden estar incluyendo la ejecución de trabajos que no implican necesariamente cambios efectivos en la capacidad viaria para tráfico mixto de la sección, como definición de proyectos constructivos y otros preparativos en el período inicial, y trabajos relacionados con acabados y sistemas en el caso de la parte final.



punto de vista de la confección del modelo, este planteamiento se ha traducido en la incorporación de una curva de transición o enlace entre los dos puntos predeterminados (es decir,  $CMT_{rik}^*$  en el año base y  $CMTn_{rik}^s$  en el año de puesta en servicio del nuevo modo de transporte público, el cual viene dado por  $y=Yimp_r^s+1$ ). Para determinar matemáticamente la función correspondiente a dicha curva se han impuesto para la misma las siguientes condiciones: (i) Debe enlazar necesariamente con el punto inicial correspondiente al año base, es decir,  $CMT_{ryik}^s=CMT_{rik}^*$  si  $y$  adoptase un valor hipotético igual a 0; (ii) Debe enlazar también con el valor de capacidad final que se ha previsto que esté disponible desde la puesta en servicio del nuevo modo en adelante, por lo que  $CMT_{ryik}^s=CMTn_{rik}^s$  para  $y=Yimp_r^s+1$ ; (iii) <sup>182</sup> Se asume una tangencia horizontal en el punto de conexión con el año base, de tal forma que la derivada primera de la función ha de ser nula cuando  $y$  tome un valor hipotético igual a 0; (iv) Similarmente, se adopta también la condición de tangencia (horizontal) con el valor de capacidad final que permanece constante a partir de la puesta en servicio del nuevo modo, por lo que la primera derivada de la función debe tomar valor nulo en  $y=Yimp_r^s+1$ . Para dar cumplimiento a estas cuatro condiciones se ha propuesto un polinomio de tercer grado cuyos coeficientes constituyen las incógnitas del problema, obteniéndose finalmente la función representada en la ecuación 7.29.b.

De acuerdo a esta serie de supuestos, los valores de la variable  $CMT_{ryik}^s$  quedan determinados por el conjunto de ecuaciones que se indica a continuación:

Si  $s=0$ :

$$CMT_{ryik}^0 = CMT_{rik}^* \quad \forall y \quad (7.29.a)$$

Si  $(s=R \vee s=B) \wedge (1 \leq y \leq Yimp_r^s)$ :

$$CMT_{ryik}^s = CMT_{rik}^* + \left[ 2 \cdot \left( \frac{y}{Yimp_r^s + 1} \right)^3 - 3 \cdot \left( \frac{y}{Yimp_r^s + 1} \right)^2 \right] \cdot (CMT_{rik}^* - CMTn_{rik}^s) \quad (7.29.b)$$

Si  $(s=R \vee s=B) \wedge (Yimp_r^s + 1 \leq y \leq Yap)$ :

$$CMT_{ryik}^s = CMTn_{rik}^s \quad (7.29.c)$$

donde los índices  $(r,s,y,i,k)$  aplicables a este conjunto de ecuaciones (7.29.a a 7.29.c) han de tomar los valores siguientes:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = 1, 2, \dots, Yap ; i = 1, 2, \dots, NL ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.5.3. Tasa de ocupación en automóvil particular, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $OCC_{ryijk}$  señala, para el experimento aleatorio  $r$ , la tasa de ocupación de los automóviles particulares que, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, transitarían por el vial o viales de circulación que sirven de soporte al trayecto de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Los valores numéricos de esta variable son de tipo adimensional (estrictamente, personas por cada vehículo de tipo automóvil [prs/veh]).

De acuerdo a la estructura de datos planteada para el modelo, la variable  $OCC_{ryijk}$  se calcula en principio mediante una función de evolución lineal con la forma indicada en la ecuación 5.11, siendo  $OCC_{rijk}^*$  el valor inicial en el año base e  $iOCC_{rijk}$  la constante de variación anual en número de personas por

<sup>182</sup> Para las condiciones iii y iv ha de manipularse la función perseguida como si fuese continua en el tiempo, a pesar de que, en el desarrollo y ejecución del modelo, actúa como una función discreta que solo toma valores para los números naturales representativos de cada año del período de evaluación.

vehículo. La restricción adicional que cabe imponer en este caso es que los valores adoptados, independientemente del signo y magnitud de  $iOCc_{ryjk}$ , no sean nunca inferiores a 1 (es decir, debe haber como mínimo un ocupante por vehículo en circulación). Así pues, se aplica al respecto la ecuación 7.30:

$$OCc_{ryjk} = \max\{OCc_{ryjk}^* + iOCc_{ryjk} \cdot y, 1\} \quad (7.30)$$

donde:

$$r=1,2, \dots, Nrs ; y=1,2, \dots, Yap ; i=1,2, \dots, NL ; j=1,2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} =1,2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ =1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

## 7.6. CÁLCULOS PRELIMINARES RELACIONADOS CON EL VOLUMEN DE VIAJES Y EL REPARTO MODAL EN LOS ITINERARIOS O CORREDORES AFECTADOS

### 7.6.1. Volumen total de viajes (por hora) en el año base mediante el conjunto completo de opciones modales

La variable  $Q^*_{ijk}$  representa el volumen total de viajes por hora que se efectúan en el año base —mediante cualquiera de las opciones modales de transporte contempladas— sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ .

Consecuentemente, la variable  $Q^*_{ijk}$  es expresada en el modelo con unidades de personas (viajes) por hora [prs/h] para cada uno de los posibles sentidos de viaje.

Tal como se desprende de la ecuación 4.8.a, la obtención de estos volúmenes totales de viajes se basa simplemente en dividir el número de pasajeros por hora y sentido en un determinado modo de transporte (en este caso, el modo de transporte público disponible en el año base, esto es, autobús convencional) entre la cuota de reparto modal general (es decir, incluyendo viajeros cautivos de cualquiera de los modos) que corresponda al susodicho modo de transporte. Por tanto, la variable  $Q^*_{ijk}$  es calculada en el modelo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q^*_{ijk} = \frac{q^*_{ijk}}{MS^*_{ijk}} \quad (7.31)$$

con:

$$i=1,2, \dots, NL ; j=1,2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} =1,2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ =1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.6.2. Proporción (a lo largo del horizonte de evaluación) de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público

La variable  $Pcp_{ryijk}$  indica, dada la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción que, en el año y del período u horizonte de evaluación, los viajes realizados en transporte público por parte de usuarios cautivos del mismo representarían con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo (mediante cualquiera de las cinco opciones modales contempladas en el modelo) sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Se trata de una variable de tipo adimensional, cuyo valor numérico se expresa en el modelo en forma de proporción decimal.

De acuerdo a las premisas de la estructura de datos del modelo, la variable  $Pcp_{ryijk}$  se calcularía generalmente mediante aplicación directa de una función de evolución lineal como la mostrada en la

ecuación 5.6 (con  $Pcp^*_{ijk}$  como valor inicial en el año base e  $iPcp_{rijk}$  como constante de variación anual en puntos porcentuales), siempre y cuando los valores así obtenidos no sean negativos y además la suma de las fracciones de viajes efectuados por usuarios cautivos de cada una de las opciones modales contempladas (transporte público y todos los demás modos de transporte privado o individual) no resulte superior a la unidad. Estas dos restricciones deben ser impuestas adicionalmente, con lo que se llega, de forma sintetizada, a la ecuación 7.32. Obsérvese que el denominador de dicha ecuación ‘normaliza’ proporcionalmente las fracciones de viajes asignables a usuarios cautivos (del transporte público en este caso) en aquellas situaciones en las que la suma total de las fracciones de viajes atribuibles a viajeros cautivos de alguna opción modal resultase eventualmente superior a 1 si fuese calculada por aplicación directa de la forma funcional indicada por la ecuación 5.6.

$$Pcp_{ryijk} = \frac{\max\left\{Pcp^*_{ijk} + \frac{iPcp_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\}}{\max\left\{1, \max\left\{Pcp^*_{ijk} + \frac{iPcp_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\} + \sum_{m \in A'} \max\left\{Pco^*_{ijk} + \frac{iPco^m_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\}\right\}} \quad (7.32)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  y aplicando los siguientes valores a los índices  $(r, y, i, j, k)$ :

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.6.3. Proporciones (a lo largo del horizonte de evaluación) de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual

La variable  $Pco^m_{ryijk}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción que, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, los viajes efectuados por parte de viajeros que puedan ser considerados cautivos del modo  $m$  de transporte privado o individual representarían con respecto al conjunto general de desplazamientos llevados a cabo (en cualquiera de las cinco opciones modales contempladas) sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable es también de tipo adimensional y, como en el caso anterior, su valor numérico se cuantifica en el modelo en forma de proporción decimal.

La forma de obtención de la variable  $Pco^m_{ryijk}$  sigue un patrón de cálculo paralelo al indicado anteriormente para  $Pcp_{ryijk}$ . Así pues, en condiciones normales (valores no negativos y suma de fracciones del total de viajes atribuibles a viajeros cautivos no superior a 1) se calcularía  $Pco^m_{ryijk}$  simplemente mediante una función de evolución lineal como la representada en la ecuación 5.6 (con  $Pco^*_{ijk}$  como valor inicial para el año base e  $iPco^m_{rijk}$  como variación anual en puntos porcentuales). Adicionalmente, se debe asegurar que todos los valores finalmente adoptados cumplan las condiciones mencionadas, para lo que se aplican en la ecuación 7.33 las mismas limitaciones que en el caso anterior. Por tanto, se calculan las restantes fracciones del conjunto general de viajes atribuibles a viajeros cautivos de la siguiente forma:

$$Pco^m_{ryijk} = \frac{\max\left\{Pco^*_{ijk} + \frac{iPco^m_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\}}{\max\left\{1, \max\left\{Pcp^*_{ijk} + \frac{iPcp_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\} + \sum_{n \in A'} \max\left\{Pco^*_{ijk} + \frac{iPco^n_{rijk}}{100} \cdot y, 0\right\}\right\}} \quad (7.33)$$

donde  $A' = \{C, M, V, P\}$  y los índices  $(r, y, i, j, k, m)$  han de tomar los siguientes valores:

$$r=1,2,\dots,Nrs ; y=1,2,\dots,Yap ; i=1,2,\dots,NL ; j=1,2,\dots,Nper_i ; k=\begin{cases} =1,2 & \text{si } TypL_i=LT \vee TypL_i=RT \\ =1 & \text{si } TypL_i=RO \end{cases} ;$$

$$m \in \{C,M,V,P\}$$

## 7.7. CÁLCULOS PRELIMINARES RELACIONADOS CON EL COSTE UNITARIO MEDIO DEL TIEMPO DE VIAJE

### 7.7.1. Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte público, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $VTTpb_{ryjk}$  señala, para la simulación aleatoria  $r$ , el coste unitario medio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación para el conjunto de usuarios del transporte público, dada la composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje estimada para el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Su variable homóloga para el año base se designa como  $VTTpb^*_{ryjk}$ , en la cual se suprime el índice relativo al año ( $y$ ) al resultar este innecesario.

Este coste unitario se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes (del año adoptado como referencia para el nivel general de precios) por hora [CU/h].

En primer lugar, es necesario establecer este coste unitario medio para el caso del año base (es decir, el valor de la variable  $VTTpb^*_{ryjk}$ ). Para ello se han de tomar los costes unitarios del tiempo de viaje en transporte público para los diferentes tipos de viajes que han sido considerados en la segmentación de los mismos —es decir, viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado), otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.), y viajes en tiempo de trabajo remunerado (viajes de negocios o comerciales: *work/business*)— y ponderarlos según las fracciones o proporciones de dichos tipos de viajes que componen la demanda de movilidad en cada corredor o itinerario, cada período horario y cada sentido de viaje. Así pues, para cada tipo de viaje se han de adoptar las siguientes fracciones y costes unitarios:

- Para los viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado), su fracción o proporción de viajes sobre el conjunto general de desplazamientos en un determinado corredor o itinerario, período horario y sentido de viaje está definida por la variable  $Pcom_{ijk}$ , mientras que el coste unitario del tiempo de viaje en este tipo de desplazamientos en transporte público viene dado directamente por la variable  $VTCpb_r$ .
- En los viajes en tiempo de trabajo remunerado (viajes de negocios o comerciales: *work/business*), la fracción o proporción que estos representan en la composición de la demanda de movilidad está estipulada por la variable  $Pbsn_{ijk}$ . Por su parte, el coste unitario del tiempo de viaje para desplazamientos en tiempo de trabajo remunerado realizados en transporte público se determina, de acuerdo a la estructura del modelo, como el producto del factor de proporcionalidad  $VRBpb_r$  por el coste básico de referencia, siendo este el correspondiente a viajes en transporte público de tipo *commuting* (es decir,  $VTCpb_r$ ).
- Por último, la fracción o proporción de viajes correspondiente a otras clases de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) se obtiene como la parte restante hasta llegar al total, al sustraer los dos tipos de viajes anteriores (por tanto, viene dada por  $1-Pcom_{ijk}-Pbsn_{ijk}$ ). En cuanto al coste unitario del tiempo de viaje para esta clase de desplazamientos en transporte público, este ha de calcularse, según la estructura del modelo, como el producto entre el factor de proporcio-

alidad  $VROpb_r$ , y el coste básico de referencia en viajes de tipo *commuting* efectuados en transporte público ( $VTCpb_r$ ).

Una vez obtenido de esta forma el valor  $VTTpb^*_{rijk}$  para el caso del año base, es preciso desarrollar la evolución de dicho coste unitario medio a lo largo de los sucesivos años del horizonte de evaluación. En este sentido, y de acuerdo a las premisas de la estructura de datos del modelo, la variable  $VTTpb_{ryijk}$  sigue una tendencia de tipo exponencial (cuya base o razón podría ser, en general, mayor o menor que 1), dando lugar de este modo a una progresión geométrica con la forma funcional indicada en la ecuación 5.7 (con  $VTTpb^*_{rijk}$  como valor inicial de la variable e  $IVTT_r$  como tasa porcentual de variación anual de dicha variable).

En conclusión, el cálculo de las variables  $VTTpb^*_{rijk}$  y  $VTTpb_{ryijk}$  se explicita matemáticamente mediante las siguientes ecuaciones:

Para el año base:

$$VTTpb^*_{rijk} = \left[ Pcom_{ijk} + Pbsn_{ijk} \cdot VRBpb_r + (1 - Pcom_{ijk} - Pbsn_{ijk}) \cdot VROpb_r \right] \cdot VTCpb_r \quad (7.34.a)$$

∀ y:

$$VTTpb_{ryijk} = VTTpb^*_{rijk} \cdot \left( 1 + \frac{IVTT_r}{100} \right)^y \quad (7.34.b)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.7.2. Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte motorizado privado, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $VTTpr_{ryijk}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el coste unitario medio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, considerada la composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje asumida para el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Para el año base se define su variable homóloga  $VTTpr^*_{rijk}$ , donde se omite, por innecesario, el índice correspondiente al año ( $y$ ).

Estas variables son cuantificadas en el modelo en unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios) por hora [CU/h].

Al igual que en el caso del transporte público, el coste unitario medio del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado en el año base ( $VTTpr^*_{rijk}$ ) se compone a partir de los respectivos costes unitarios (a bordo de dicha clase de modos de transporte) asociados a los tres tipos diferentes de viajes contemplados en la segmentación de la demanda de movilidad por motivos o características del viaje. Estos costes unitarios han de ponderarse de acuerdo a las fracciones o proporciones de cada categoría de viajes existentes en un determinado corredor o itinerario, durante un cierto período horario y en un determinado sentido de viaje. En consecuencia, para cada tipo de viaje deben considerarse las fracciones y costes unitarios indicados a continuación:

- Para los viajes de tipo *commuting* (fuera del tiempo de trabajo remunerado), la fracción o proporción que estos constituyen en la composición de la demanda de movilidad se ha especificado mediante la variable  $Pcom_{ijk}$ , mientras que el coste unitario del tiempo de viaje en transporte motorizado privado

para esta clase de viajes ha de ser calculado, atendiendo a la estructura de datos del modelo, como el producto del factor de proporcionalidad  $VRCpr_r$  por el coste básico de referencia ( $VTCpb_r$ , correspondiente a viajes de tipo *commuting* en transporte público).

- En el caso de los viajes en tiempo de trabajo remunerado (viajes de negocios o comerciales: *work/business*), su fracción o proporción representativa viene dada por la variable  $Pbsn_{ijk}$ . Por otro lado, el coste unitario del tiempo de viaje en el caso de viajes en tiempo de trabajo remunerado efectuados en vehículo motorizado privado ha de obtenerse en el modelo mediante el producto del factor de proporcionalidad  $VRBpr_r$  por el coste unitario del tiempo en viajes del mismo tipo pero realizados en transporte público (que a su vez se determina como el coste básico de referencia  $VTCpb_r$  multiplicado por el factor  $VRBpb_r$ ).
- Finalmente, la fracción o proporción de viajes atribuible a otras clases de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado (ocio, compras, etc.) puede calcularse como  $1 - Pcom_{ijk} - Pbsn_{ijk}$ . Por su parte, el coste unitario del tiempo en viajes de este tipo realizados en vehículo motorizado privado se debe evaluar en el modelo como el producto del factor de proporcionalidad  $VROpr_r$  por el coste unitario del tiempo en viajes de esta misma categoría efectuados en transporte público. Este último resulta a su vez de multiplicar el coste básico de referencia  $VTCpb_r$  por el factor  $VROpb_r$ .

Una vez que se haya obtenido mediante este procedimiento el valor  $VTTpr^*_{rijk}$  para el año base, habrá que determinar este coste unitario medio para los sucesivos años del horizonte de evaluación. Para ello se ha adoptado, tal como en el caso de los viajes en transporte público, un patrón de evolución de tipo exponencial (con una base o razón que podría ser o bien mayor o bien menor que 1), formando en la práctica una progresión geométrica que responde a la forma funcional representada en la ecuación 5.7. En este caso, como valor inicial de la variable se ha de tomar  $VTTpr^*_{rijk}$ , mientras que la tasa porcentual de variación anual corresponde nuevamente a la variable aleatoria  $IVTT_r$  (obsérvese que se ha adoptado la misma tasa de crecimiento/decrecimiento del coste del tiempo de viaje tanto para transporte público como para transporte motorizado privado).

En compendio, la obtención de estas dos variables está regida por las ecuaciones siguientes:

Para el año base:

$$VTTpr^*_{rijk} = \left[ Pcom_{ijk} \cdot VRCpr_r + Pbsn_{ijk} \cdot VRBpr_r \cdot VRBpb_r + (1 - Pcom_{ijk} - Pbsn_{ijk}) \cdot VROpr_r \cdot VROpb_r \right] \cdot VTCpb_r \quad (7.35.a)$$

$\forall y$ :

$$VTTpr_{ryijk} = VTTpr^*_{rijk} \cdot \left( 1 + \frac{IVTT_r}{100} \right)^y \quad (7.35.b)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

## 7.8. CÁLCULOS PRELIMINARES RELATIVOS AL REPARTO DE VEHÍCULOS-KM (EN TRANSPORTE MOTORIZADO PRIVADO) POR TIPO DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA

### 7.8.1. Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $Pce_{ry}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación— que serían realizados mediante la utilización de alimentación eléctrica como fuente externa de energía, según las previsiones para el área de estudio. Se trata de una variable de tipo adimensional, siendo expresados sus valores en el modelo en forma de proporción decimal.

Conforme a la estructura de datos del modelo, la variable  $Pce_{ry}$  se calcularía según el tipo de formulación indicado en la ecuación 5.12 (en la que se toma, a efectos prácticos, la relación de recurrencia dada por la primera de las igualdades), partiéndose de  $Pce^*_r$  como valor inicial en el año base y con  $iPce_{ry}$  como variación (en puntos porcentuales) de dicha fracción en el año  $y$  (con respecto al valor de la variable en el año anterior). Como restricciones adicionales, debe imponerse que los valores finalmente adoptados para  $Pce_{ry}$  han de estar siempre comprendidos entre 0 y 1, independientemente de los resultados eventuales a los que imprevistamente condujesen  $Pce^*_r$  y los sucesivos  $iPce_{ry}$ . Para ello, se aplica, de forma condensada, una expresión del tipo  $y(x) = \max\{a, \min\{f(x), b\}\}$ , con  $a < b$ . Obsérvese al respecto que esta expresión produce como resultado:  $y = f(x)$  si  $a < f(x) < b$ ;  $y = a$  si  $f(x) \leq a$ ;  $y = b$  si  $f(x) \geq b$ . En resumen, restringe la imagen de  $y(x)$  al intervalo  $[a, b]$ , siendo, en este caso concreto,  $a = 0$  y  $b = 1$ .

Con todo ello, y distinguiendo formalmente el caso particular en el que  $y = 1$ , la obtención de la variable  $Pce_{ry}$  queda especificada mediante las siguientes ecuaciones:

Si  $y = 1$ :

$$Pce_{r1} = \max\left\{0, \min\left\{Pce^*_r + \frac{iPce_{r1}}{100}, 1\right\}\right\} \quad (7.36.a)$$

Si  $y \geq 2$ :

$$Pce_{ry} = \max\left\{0, \min\left\{Pce_{r,y-1} + \frac{iPce_{ry}}{100}, 1\right\}\right\} \quad (7.36.b)$$

donde los índices  $(r, y)$  presentes en las ecuaciones 7.36.a y 7.36.b han de adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

### 7.8.2. Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $Pcg_{ry}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación— que serían realizados mediante el consumo de gasolina, según las previsiones para el área de estudio. Por su parte, para el año base se define su variable homóloga  $Pcg^*_r$ , en la cual se omite, por innecesario, el índice relativo al año ( $y$ ).

Se trata, en ambos casos, de variables adimensionales, cuyos valores numéricos en el modelo son expresados en forma de proporción decimal.

De forma general, estas variables ( $Pcg^*_r$  o  $Pcg_{ry}$ ) deben calcularse simplemente como el producto entre dos factores: la fracción o proporción de vehículos-km que —con respecto al total realizado por automóviles particulares utilizando combustibles convencionales (es decir, gasolina o diésel)— son efectuados mediante el consumo de gasolina y la fracción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares— que efectivamente corresponde al uso de combustibles convencionales. Esta última fracción o proporción, de acuerdo a la segmentación efectuada en el modelo, corresponde a la parte total menos la fracción recorrida mediante alimentación eléctrica externa (es decir,  $1-Pce^*_r$  en el caso del año base y  $1-Pce_{ry}$  para los demás años).

En cuanto a la primera de las fracciones o proporciones mencionadas en el párrafo anterior, esta viene indicada por  $Pcgc^*_r$  (véase ecuación 6.63.b) en el caso del año base. Para los sucesivos años del horizonte de evaluación es necesario plantear su evolución futura a lo largo del tiempo, que, al igual que en el caso de la variable  $Pce_{ry}$ , se ajusta a la forma funcional señalada en la ecuación 5.12 (primera igualdad), siendo ahora  $iPcgc_{ry}$  la variación (en puntos porcentuales) de esta fracción o proporción en el año  $y$  (con respecto al valor de esa misma fracción o proporción en el año precedente). Obsérvese que esta última (la fracción o proporción de vehículos-km efectuados mediante el consumo de gasolina con respecto al total de combustibles convencionales en el año inmediatamente anterior a  $y$ ) puede ser expresada alternativamente como  $Pcg_{r,y-1}/(1-Pce_{r,y-1})$  cuando  $y \geq 2$ . A lo largo de todo el procedimiento ha de imponerse adicionalmente que los valores que finalmente adopte esta fracción o proporción estén comprendidos siempre entre 0 y 1, aplicando para ello una expresión del mismo tipo que la utilizada en el caso de  $Pce_{ry}$  (es decir,  $y(x) = \max\{0, \min\{f(x), 1\}\}$ ).

De este modo, el cálculo de las variables  $Pcg^*_r$  y  $Pcg_{ry}$  queda finalmente determinado por las siguientes ecuaciones:

Para el año base:

$$Pcg^*_r = Pcgc^*_r \cdot (1 - Pce^*_r) \quad (7.37.a)$$

Para  $y=1$ :

$$Pcg_{r1} = \max\left\{0, \min\left\{Pcgc^*_r + \frac{iPcgc_{r1}}{100}, 1\right\}\right\} \cdot (1 - Pce_{r1}) \quad (7.37.b.i)$$

Para  $y \geq 2$ :

$$Pcg_{ry} = \max\left\{0, \min\left\{\frac{Pcg_{r,y-1}}{1 - Pce_{r,y-1}} + \frac{iPcgc_{ry}}{100}, 1\right\}\right\} \cdot (1 - Pce_{ry}) \quad (7.37.b.ii)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

### 7.8.3. Fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de combustible diésel, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $Pcd_{ry}$  indica, para el experimento aleatorio  $r$ , la fracción o proporción de vehículos-km —sobre el total recorrido por automóviles particulares en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación— que serían realizados mediante el consumo de combustible diésel, según las previsiones para el área de estudio. Su variable homóloga para el año base se designa como  $Pcd^*_r$ , en la que se prescinde, por innecesario, del índice correspondiente al año ( $y$ ).



Las variables  $Pcd^*_r$  y  $Pcd_{ry}$  son también adimensionales, con valores numéricos que en el modelo son expresados como proporción decimal.

De acuerdo a la segmentación simplificada propuesta en el modelo, la fracción de vehículos-km atribuible al uso de combustible diésel se calcula como la parte total menos las fracciones o proporciones correspondientes a la utilización de alimentación eléctrica externa y al empleo de gasolina. Por consiguiente, para el cálculo de las variables  $Pcd^*_r$  y  $Pcd_{ry}$  se tienen las siguientes ecuaciones:

Para el año base:

$$Pcd^*_r = 1 - Pce^*_r - Pcg^*_r \quad (7.38.a)$$

∀ y:

$$Pcd_{ry} = 1 - Pce_{ry} - Pcg_{ry} \quad (7.38.b)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

#### 7.8.4. Fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $Pme_{ry}$  señala, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de vehículos-km –con respecto al total recorrido por el conjunto de motos y ciclomotores en el año y del período u horizonte de evaluación– que serían efectuados mediante alimentación eléctrica como fuente externa de energía, según las previsiones para el área de estudio. Se trata de una variable adimensional, cuyos valores son expresados numéricamente en el modelo en forma de proporción decimal.

Atendiendo a la estructura de datos del modelo, la forma de obtención de la variable  $Pme_{ry}$  se ajusta a un patrón de cálculo similar al indicado anteriormente para  $Pce_{ry}$ . Es decir, se aplica en general el tipo de formulación presentado en la ecuación 5.12 (tomándose, a efectos prácticos, la primera de las igualdades), con  $Pme^*_r$  como valor inicial para el año base e  $iPme_{ry}$  como variación, en puntos porcentuales, de la referida fracción en el año  $y$  (con respecto al valor de la variable en el año precedente). Además, han de restringirse los posibles valores de  $Pme_{ry}$  que finalmente puedan ser adoptados al intervalo de validez  $[0,1]$ .

En consecuencia, el cálculo de la variable  $Pme_{ry}$  se rige por las siguientes ecuaciones:

Si  $y=1$ :

$$Pme_{r1} = \max \left\{ 0, \min \left\{ Pme^*_r + \frac{iPme_{r1}}{100}, 1 \right\} \right\} \quad (7.39.a)$$

Si  $y \geq 2$ :

$$Pme_{ry} = \max \left\{ 0, \min \left\{ Pme_{r,y-1} + \frac{iPme_{ry}}{100}, 1 \right\} \right\} \quad (7.39.b)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

### 7.8.5. Fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante uso de gasolina, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $Pmg_{ry}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de vehículos-km —con respecto al total recorrido por el conjunto de motos y ciclomotores en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación— que serían realizados mediante el consumo de gasolina, según las previsiones para el área de estudio. Para el año base se define además su variable homóloga  $Pmg^*_r$ , en la cual se prescinde, por innecesario, del índice relativo al año ( $y$ ).

Tanto la variable  $Pmg^*_r$  como  $Pmg_{ry}$  son de tipo adimensional, con valores numéricos que en el modelo son expresados en forma de proporción decimal.

De acuerdo a la estructura de segmentación establecida en el modelo para el caso de las motos y ciclomotores, la fracción de vehículos-km atribuible al uso de gasolina corresponde a la parte total menos aquella otra fracción de la misma que es recorrida por medio de alimentación eléctrica, con lo cual la obtención de las variables  $Pmg^*_r$  y  $Pmg_{ry}$  responde simplemente a las siguientes ecuaciones:

Para el año base:

$$Pmg^*_r = 1 - Pme^*_r \quad (7.40.a)$$

$\forall y$ :

$$Pmg_{ry} = 1 - Pme_{ry} \quad (7.40.b)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

## 7.9. CÁLCULOS PRELIMINARES RELATIVOS A LOS PRECIOS FUTUROS DE LOS COMBUSTIBLES Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

### 7.9.1. Precio de venta de la gasolina, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $PRg_{ry}$  indica, para el experimento aleatorio  $r$ , el precio medio de venta al consumidor de la gasolina en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, para la zona o área geográfica de estudio. Nótese que este precio se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes (del año adoptado como referencia para el nivel general de precios) por litro de carburante [CU/l].

Conforme a la estructura de datos planteada en el modelo, la variable  $PRg_{ry}$  ha de calcularse mediante la aplicación de una función de evolución lineal como la representada en la ecuación 5.13, siendo  $PRg^*$  el valor inicial en el año base e  $iPRg_r$  la constante de variación anual de dicha variable, cuantificada como proporción porcentual del valor inicial en el año base. La condición adicional que conviene imponer es que, independientemente de los posibles valores de  $PRg^*$  y del signo de  $iPRg_r$ , la cuantía finalmente adoptada para  $PRg_{ry}$  no sea nunca negativa<sup>183</sup>. Con estas premisas, el cálculo de la variable  $PRg_{ry}$  queda representado por la siguiente ecuación:

$$PRg_{ry} = \max \left\{ PRg^* \cdot \left( 1 + \frac{iPRg_r}{100} \cdot y \right), 0 \right\} \quad (7.41)$$

<sup>183</sup> En el caso del modelo desarrollado se ha adoptado simplemente un límite inferior de precio igual a 0 (de forma que tan solo se restringe que dicho precio no tome hipotéticos valores negativos), pero, alternativamente, este umbral mínimo podría ser susceptible de modificación y ser fijado en un valor más elevado (mayor que 0) si así se considerase más adecuado por parte del analista.

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

### 7.9.2. Precio de venta del combustible diésel, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $PRd_{ry}$  señala, para la simulación aleatoria  $r$ , el precio medio de venta al consumidor del gasóleo de automoción en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, para la zona o área geográfica de estudio. Esta variable se cuantifica en el modelo en unidades monetarias constantes (del año adoptado como referencia para el nivel general de precios) por litro de carburante [CU/l].

Al igual que en el caso del precio de venta de la gasolina, la variable  $PRd_{ry}$  se obtiene en el modelo de acuerdo a una función de evolución lineal con la forma general señalada en la ecuación 5.13, jugando ahora  $PRd^*$  el papel de valor inicial en el año base e  $iPRd_r$  el de constante de variación anual, cuantificada como proporción porcentual de dicho valor inicial. Se restringe nuevamente el rango de validez del precio de venta de este combustible a valores no negativos<sup>184</sup>. De este modo, el cálculo de la variable  $PRd_{ry}$  obedece finalmente a la siguiente ecuación:

$$PRd_{ry} = \max \left\{ PRd^* \cdot \left( 1 + \frac{iPRd_r}{100} \cdot y \right), 0 \right\} \quad (7.42)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

### 7.9.3. Precio de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos, a lo largo del horizonte de evaluación

La variable  $PRE_{ry}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el precio medio para los usuarios de vehículos eléctricos de la energía consumida en la recarga de las baterías en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, para la zona o área geográfica de estudio. Este precio es expresado en el modelo en unidades monetarias constantes (del año tomado como referencia para el nivel general de precios) por kilowatio-hora de energía eléctrica [CU/kW·h].

Como en el caso del precio de venta de los dos productos energéticos anteriores, la obtención de la variable  $PRE_{ry}$  sigue como pauta de cálculo la forma funcional de evolución lineal indicada por la ecuación 5.13, con  $PRE^*_r$  como valor inicial en el año base e  $iPRE_r$  como constante de variación anual, expresada como proporción porcentual de dicho valor inicial. Adicionalmente se ha de imponer de nuevo que el valor finalmente adoptado para  $PRE_{ry}$  no sea en ningún caso negativo<sup>185</sup>. Por tanto, el cálculo de la variable  $PRE_{ry}$  responde en conclusión a la ecuación siguiente:

$$PRE_{ry} = \max \left\{ PRE^*_r \cdot \left( 1 + \frac{iPRE_r}{100} \cdot y \right), 0 \right\} \quad (7.43)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = 1, 2, \dots, Yap$$

<sup>184</sup> Ídem nota n° 183.

<sup>185</sup> Ídem nota n° 183.

## 7.10. CÁLCULOS PRELIMINARES RELATIVOS A LA OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS $\lambda$ Y $\theta$ DEL MODELO DE DEMANDA

### 7.10.1. Cuotas de reparto modal no cautivo para cada opción de transporte en el año base

La variable  $MP_{ijk}^{*m}$  indica la cuota de reparto modal no cautivo (definiendo como tal la fracción o proporción de viajes realizados en cada modo de transporte calculada únicamente sobre el subconjunto de viajes realizados por viajeros no cautivos, es decir, con capacidad de elección entre cualquier opción) que corresponde al modo  $m$  de transporte en el año base, para el caso de los viajes llevados a cabo sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Se trata de una variable adimensional, cuyo valor numérico es expresado en el modelo en forma de proporción decimal.

De acuerdo a la forma de cálculo vista en la ecuación 4.32.a —y sustituyendo la notación simplificada empleada en dicha ecuación por las variables equivalentes expresamente definidas para el modelo—, el procedimiento de obtención de las cuotas de reparto modal no cautivo en el año base queda representado por las ecuaciones 7.44.a y 7.44.b. Nótese que, debido a que las proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público y por viajeros cautivos de otros modos de transporte privado o individual están definidas en el modelo mediante variables diferenciadas ( $Pcp_{ijk}^*$  y  $Pco_{ijk}^{*m}$  para el caso del año base), resulta necesario desdoblar la ecuación original en dos expresiones ligeramente distintas.

$$MP_{ijk}^{*0} = \frac{MS_{ijk}^{*0} - Pcp_{ijk}^*}{1 - \left( Pcp_{ijk}^* + \sum_{n \in A'} Pco_{ijk}^{*n} \right)} \quad (7.44.a)$$

$$MP_{ijk}^{*m} = \frac{MS_{ijk}^{*m} - Pco_{ijk}^{*m}}{1 - \left( Pcp_{ijk}^* + \sum_{n \in A'} Pco_{ijk}^{*n} \right)} \quad (7.44.b)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  y aplicando los siguientes valores para los índices  $(i, j, k, m)$ :

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases} ; m \in \{C, M, V, P\}$$

### 7.10.2. Cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

La variable  $MP_{ijk}^{\wedge 0}$  representa la cuota de reparto modal no cautivo (es decir, calculada únicamente sobre el subconjunto de viajes efectuados por viajeros no cautivos, con capacidad de elección entre cualquiera de las alternativas) obtenida por el modo de transporte público preexistente (autobús convencional,  $m=0$ ) en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros, para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Esta variable es también de tipo adimensional, y su valor numérico se expresa en el modelo como proporción decimal.

La cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda se calcula en base a la ecuación 4.32.b, sin más que sustituir la notación simplificada aplicada en dicha ecuación por las variables homólogas desarro-

lladas para la ejecución del modelo. De este modo, el valor de  $MP^{0}_{ijk}$  queda definido por la siguiente ecuación:

$$MP^{0}_{ijk} = \frac{MS^{0}_{ijk} - Pcp^{0}_{ijk}}{1 - \left( Pcp^{0}_{ijk} + \sum_{n \in A'} Pco^{n}_{ijk} \right)} \quad (7.45)$$

donde:

$$A' = \{C, M, V, P\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.10.3. Parámetro $\lambda$ de sensibilidad al coste generalizado de las alternativas en el reparto modal

La variable  $\lambda_{rijk}$  indica, dada la simulación aleatoria  $r$ , el valor del parámetro de sensibilidad a las diferencias de coste generalizado de las opciones en el reparto modal ( $\lambda$  en las ecuaciones 4.1 y 4.8.b), para el caso de los viajes llevados a cabo sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Por consistencia dimensional, las dimensiones de esta variable corresponden al inverso de la unidad monetaria [CU<sup>-1</sup>]. Nótese, por tanto, que su valor numérico depende —entre otros factores— de la unidad monetaria en la que se exprese el coste generalizado <sup>186</sup>.

El valor del parámetro  $\lambda$  se ajusta, en cada caso, en función de algunos de los datos aportados tanto para el año base como para el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda, junto con las variaciones en el coste generalizado de las opciones modales entre uno y otro momento. Se ha de recurrir para ese ajuste a la ecuación 4.33.b, con las consiguientes adaptaciones entre la notación simplificada de dicha ecuación y las variables equivalentes del modelo desarrollado. Se da lugar así a la ecuación 7.46. Obsérvese que esta ecuación no admite en general solución explícita, por lo que se ha de resolver numéricamente —para cada una de las posibles combinaciones de índices  $r, i, j, k$ — al objeto de encontrar respectivamente aquellos valores (positivos) de la variable incógnita  $\lambda_{rijk}$  que satisfacen la igualdad.

$$\frac{\exp(\lambda_{rijk} \cdot \Phi GC^{0}_{rijk})}{\sum_{m \in A} MP^{*m}_{ijk} \cdot \exp(\lambda_{rijk} \cdot \Phi GC^{m}_{rijk})} - \frac{MP^{0}_{ijk}}{MP^{*0}_{ijk}} = 0 ; \lambda_{rijk} > 0 \quad (7.46)$$

con:

$$A = \{0, C, M, V, P\} ; r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 7.10.4. Parámetro $\theta$ de ‘impedancia’ o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes

La variable  $\theta_{rijk}$  indica, dada la simulación aleatoria  $r$ , el valor del parámetro de ‘impedancia’, ‘fricción’ o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes ( $\theta$  en las ecuaciones 4.1 y 4.8.b), para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Al igual que en el caso del parámetro  $\lambda$  de sensibilidad al coste

<sup>186</sup> Por citar un ejemplo con cambio fijo, si el coste generalizado se expresase en céntimos de euro en lugar de en euros, el valor del parámetro  $\lambda$  sería —*ceteris paribus*— una centésima parte del obtenido con el coste cuantificado en euros.

generalizado en el reparto modal, las dimensiones de la presente variable corresponden, por consistencia dimensional, a unidades monetarias inversas [CU<sup>-1</sup>], con lo cual su valor numérico depende, entre otros condicionantes, de la unidad monetaria utilizada para cuantificar los costes generalizados y el coste compuesto.

Dado el enfoque simplificado adoptado en lo referente a la obtención de valores del parámetro  $\theta$  para el desarrollo e implementación práctica del modelo particular (véase epígrafe 4.4.3.2), la variable  $\theta_{rijk}$  se computará en cada caso como una parte fraccional (comprendida entre 0 y 1) del valor respectivo del parámetro  $\lambda_{rijk}$ , donde la cuantía concreta de dicha parte fraccional viene dada por la variable aleatoria  $RDP_{rijk}$ . Los valores aleatorios de esta variable responden en cada caso a una distribución estadística triangular cuyos parámetros característicos (mínimo, máximo y moda) han sido especificados como datos de entrada. En conclusión, los valores de  $\theta_{rijk}$  se obtienen en la aplicación del modelo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\theta_{rijk} = RDP_{rijk} \cdot \lambda_{rijk} \quad (7.47)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

## 7.11. OTROS CÁLCULOS PRELIMINARES

### 7.11.1. Función normalizada para la asignación de la cuota de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio

La variable  $psp_{ry}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la proporción acumulada de la diferencia total entre las cuotas de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público obtenidas para los años inmediatamente anterior e inmediatamente posterior a la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio (es decir,  $Yimp_r^s$  e  $Yma_r^s$ , respectivamente) que es aplicada en el año  $y$ , dado el escenario  $s$  (siendo  $y$  un año perteneciente a dicha fase o etapa). Se trata de una variable adimensional, expresada en forma de proporción decimal.

De acuerdo a las pautas diseñadas para la modelización de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio, las cuotas de reparto modal no cautivo correspondientes a la opción de transporte público durante los años pertenecientes a dicha fase se consideran establecidas según una serie de curvas aleatorizadas de enlace que unen gradualmente —a lo largo de tales años— los puntos situados en los extremos exteriores de la citada fase (siendo dichos puntos las cuotas de reparto modal no cautivo de la opción de transporte público calculadas para el año  $Yimp_r^s$ , inmediatamente anterior a la puesta en servicio del nuevo modo, y para el año  $Yma_r^s$ , inmediatamente posterior a la finalización de la etapa de introducción y consolidación). La forma genérica de estas curvas o funciones de enlace se ha definido de tal modo que el valor absoluto de su pendiente (es decir, la celeridad del cambio modal) disminuya con el transcurso de los años, mientras que la forma particular de esta evolución —de carácter aleatorio— vendrá dada por los sucesivos valores (crecientes, con pendiente decreciente, y comprendidos siempre entre 0 y 1) que la variable  $psp_{ry}^s$  toma a lo largo de los años que transcurran desde  $Yimp_r^s + 1$  hasta  $Yma_r^s - 1$  (ambos inclusive).

Para la generación de dichas funciones (de naturaleza discreta) se emplean los valores de la variable aleatoria  $U_{psp_i}$ , extraídos previamente de una distribución uniforme estándar. La variación específica atribuida a cada año (con respecto al anterior) se obtiene por medio de una relación de recurrencia, en la que la magnitud de la variación en el año inmediatamente anterior es multiplicada por un nuevo valor

aleatorio de la variable  $U_{psp_l}$  (que al estar comprendido entre 0 y 1 da lugar siempre a variaciones decrecientes). El primer término de dicha secuencia se toma de valor unitario. Por su parte, la variación acumulada desde el extremo inicial (año  $Yimp_r^s$ ) hasta un determinado año vendrá dada por la suma de las variaciones específicas atribuidas a los años precedentes, junto con la del propio año. Finalmente, todos estos valores deben 'normalizarse' (para conseguir proporciones comprendidas entre 0 y 1) dividiéndolos entre la suma total de las variaciones específicas obtenidas para cada uno de los años (incluyendo la variación aleatoria que existiría entre el último año de la fase de introducción y consolidación y el año siguiente, que corresponde al primero de la fase de madurez, es decir,  $Yma_r^s$ ).

El procedimiento descrito en el párrafo anterior permite llegar a la ecuación 7.48, que es la utilizada en el modelo para obtener los valores de la variable  $psp_{ry}^s$ :

$$psp_{ry}^s = \frac{1 + \sum_{n=1}^{N_r^s(y)-1} \left( \prod_{l=1}^n U_{psp_{rl}} \right)}{1 + \sum_{n=1}^{Nend_r^s} \left( \prod_{l=1}^n U_{psp_{rl}} \right)}, \text{ siendo } \begin{cases} N_r^s(y) = y - Yimp_r^s \\ Nend_r^s = nint(Nic_r^s) \end{cases} \quad (7.48)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; y = Yimp_r^s + 1, Yimp_r^s + 2, \dots, Yma_r^s - 1$$





## 8. Núcleo de cálculo: Modelo acoplado de demanda, oferta dinámica y coste generalizado

### 8.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo constituye el núcleo principal del modelo desarrollado, ya que es aquí donde realmente se modelizan las interdependencias existentes entre los conjuntos de variables de cálculo relacionadas con la cuantificación de la demanda (volumen total de viajes, volumen de viajes en cada modo, etc.), con la caracterización de la oferta de transporte (dimensionamiento y operación del servicio de transporte público, atributos de las alternativas modales, etc.), con la valoración del conjunto de opciones o alternativas (coste generalizado de viaje en cada modo, coste compuesto de viaje del conjunto de opciones disponibles, etc.) y con las elecciones agregadas de los viajeros (reparto modal resultante, influencia del coste compuesto en el volumen total de viajes, etc.).

Desde el punto de vista del funcionamiento del modelo deberá tenerse en cuenta que, debido a la utilización de formulaciones incrementales con avances en el tiempo (entre años), resulta necesario completar en primer lugar la obtención de todas las variables referidas al año base, ya que estas representan el punto de partida sobre el que pivota el desarrollo de las previsiones efectuadas para cualquier año posterior. El cálculo de las variables relativas al año base va a presentar la característica de poder ser resuelto de forma directa, puesto que es posible conocer de antemano (en base a los datos de entrada del modelo) los volúmenes de viajes en cada modo de transporte, los cuales pueden ser tomados como punto de partida para la obtención de valores del resto de variables. En cambio, la obtención de soluciones válidas para el conjunto de ecuaciones referidas a cualquiera de los años posteriores (es decir, las previsiones del modelo sobre valores futuros) requerirá la aplicación de procedimientos iterativos, ya que variables fundamentales para la resolución de dicho conjunto de ecuaciones, como los volúmenes de viajes en cada opción modal (o, alternativamente, las variaciones de coste generalizado de viaje para cada una de estas opciones), forman parte de las futuras incógnitas del problema. Estos procedimientos iterativos se materializan a través de todo un conjunto de módulos de cálculo (M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3), tal como se había presentado en el epígrafe 3.8.2. Además, en cada módulo de cálculo pueden distinguirse dos tipos de bucles iterativos (bucles de tipo A y de tipo B), que se diferencian fundamentalmente en la forma en la que es calculado el intervalo de operación de los modos de transporte público. Tal como se vió en el epígrafe 3.8.3, en cada caso se deberá proceder en primer lugar a obtener la solución del bucle iterativo de tipo A y, sirviéndose de ella, se pasará a continuación a ejecutar el correspondiente bucle iterativo de tipo B, cuya solución se adopta como definitiva.

Así pues, en relación con los módulos de cálculo y el funcionamiento de sus bucles iterativos, se presentarán inicialmente en el epígrafe 8.2 las pautas básicas propuestas para el inicio y continuación de cada uno de estos bucles iterativos, ya sean estos de tipo A o de tipo B. En el caso de los de tipo A, las aproximaciones iniciales a utilizar en el arranque de la primera iteración serán especificadas posteriormente en el epígrafe 8.5, que, en este aspecto, complementará por tanto al 8.2.

A continuación, en el epígrafe 8.3, se presentará pormenorizadamente el núcleo de cálculo del modelo, especificando, para cada una de las sucesivas variables, las formulaciones particulares aplicables al año base (cuando proceda) y a cada uno de los módulos de cálculo en los que dicha variable intervenga. Asimismo, se indicarán —en el caso de aquellas variables que así lo requieran— las particularidades que

corresponden a los bucles iterativos de tipo A y de tipo B en relación con la forma que adopta el intervalo de operación de los modos de transporte público. Siguiendo el orden necesario para el cálculo sucesivo de las variables, se partirá de la obtención de los volúmenes de viajes por hora en cada modo de transporte, para a continuación proceder con el dimensionamiento del servicio de transporte público (fundamentalmente la determinación del intervalo de operación). Tras ello es necesario intercalar algunos cálculos básicos relativos a la intensidad de circulación en tráfico mixto, ya que, en el caso del autobús convencional, esta intensidad también afectará directamente a las condiciones de operación de dicha modalidad de transporte público. Se continúa después con la obtención de una serie de variables que conducirán finalmente a la estimación de la velocidad media de operación de cada uno de los modos de transporte público. Se determinarán a continuación los valores de otros atributos del transporte público relacionados con factores como el tiempo medio transcurrido en los viajes a bordo del vehículo, el nivel de aglomeración de pasajeros, el tiempo medio de espera en parada o la fiabilidad de horarios. Todo ello permitirá estimar el coste generalizado por viaje medio para cada uno de los modos de transporte público. A continuación pasarán a ser analizados los atributos más representativos de las opciones de vehículo motorizado privado (automóvil y moto/ciclomotor), con sus correspondientes variaciones en los costes de viaje. Se consideran al respecto los costes generados por el propio tiempo de viaje, por la irregularidad o incertidumbre que afecta a dicho tiempo y por el gasto asociado al consumo energético (combustibles y/o energía eléctrica). Con ello se dispondrá finalmente de las variables necesarias para el cálculo en el modelo de la variación (a lo largo del tiempo) del coste generalizado de viaje medio en cada una de las opciones modales de transporte, para lo cual se retoman también los resultados obtenidos al respecto para los modos de transporte público y se añaden las opciones no motorizadas y de 'micromovilidad'. Estas variaciones en el coste generalizado de cada una de las opciones de transporte conducen a un nuevo reparto modal, tanto a nivel de viajeros no cautivos como a nivel general (incluyendo a los usuarios cautivos de alguna de las opciones modales). Una vez conocidas las variaciones de costes generalizados y determinado el reparto modal, se procede en el modelo a la cuantificación de las respectivas variaciones (en cada escenario y a lo largo del tiempo) del coste compuesto de viaje promediado o ponderado, las cuales son utilizadas para la estimación del nuevo volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales. Esta variable, junto con las nuevas cuotas de reparto modal general, conduciría nuevamente a los volúmenes de viajes por hora realizados en cada modo de transporte.

Dado que los módulos de cálculo desarrollados en el epígrafe 8.3 se fundamentan en procedimientos de tipo iterativo (basados en aproximaciones sucesivas), es necesario comprobar, para los resultados obtenidos en cada iteración, si estos pueden ser aceptados como válidos o si por el contrario se requiere continuar el proceso iterativo. Para que un conjunto de resultados pueda ser aceptado como válido se debería haber alcanzado una solución suficientemente estable, que garantice las condiciones de equilibrio en las interdependencias entre el volumen de viajes por hora en cada modo de transporte y las correspondientes variaciones de coste generalizado obtenidas en cada una de dichas opciones modales. A efectos prácticos, es necesario comprobar si los resultados obtenidos en las sucesivas iteraciones satisfacen un determinado criterio de convergencia, para que, en ese caso, puedan ser aceptados como una solución válida. En el epígrafe 8.4 se especifica para el modelo dicho criterio de convergencia y, en caso de que no se satisfaga, se proporciona el procedimiento de transición entre iteraciones consecutivas.

Como suplemento al epígrafe 8.2, en el epígrafe 8.5 se detalla el procedimiento propuesto para la obtención de las aproximaciones iniciales que se utilizarán en los bucles iterativos de tipo A como punto de arranque de la iteración de partida. Estas aproximaciones iniciales se refieren a las cuotas de reparto modal general y al volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales.

Una vez concluida la descripción en detalle de los aspectos directamente relacionados con el funcionamiento del núcleo de cálculo del modelo, en el epígrafe 8.6 se indican los procedimientos o pautas para la obtención de algunos resultados complementarios que podrían ser directamente calculados tras la ejecución de dicho modelo. En este sentido, se especifican en primer lugar distintas variables relaciona-

das con el tiempo y velocidad de ciclo, así como con la obtención del número de unidades de transporte público necesarias para la prestación del servicio con cada uno de los modos o sistemas, para reserva (mantenimiento, reparación, etc.), y para la composición total de la flota. Por otra parte, se presentan tras ello algunas de las potenciales contribuciones del modelo en relación con la obtención de variables, índices, parámetros, etc. representativos de la eficiencia operativa en la explotación del servicio de transporte público y de sus correspondientes resultados económicos. Finalmente, desde el punto de vista de la evaluación de los potenciales beneficios aportados directamente al conjunto de viajeros como consecuencia de los proyectos de implantación de un sistema de transporte público de capacidad intermedia (sea este de tipo metro ligero o tranvía o de tipo BHLS/BRT), se estudia de forma general y se especifica para el modelo la formulación de cálculo de los incrementos en el excedente de los viajeros ('consumidores') previsiblemente producidos por la implementación de dichos proyectos.

## 8.2. MÓDULOS DE CÁLCULO: PAUTAS PARA EL INICIO Y CONTINUACIÓN DE CADA BUCLE ITERATIVO

Dado que la resolución de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3 requiere la utilización de procedimientos de tipo iterativo mediante aproximaciones sucesivas, es preciso establecer unos patrones o mecanismos que determinen el arranque del método a partir de una conjetura o estimación inicial aproximada de la posible solución. Posteriormente, debe sistematizarse también el procedimiento de tránsito o continuidad entre las sucesivas iteraciones hasta que se alcance la convergencia a la solución válida.

Así pues, supuesta la iteración genérica  $u$ -ésima en un bucle iterativo de tipo  $v$  —donde dicho tipo puede ser A ( $v=A$ ) o B ( $v=B$ )—, se procede en los siguientes epígrafes a detallar las pautas que, en el contexto de la modelización desarrollada, se han aplicado para el inicio ( $u=1$ ) y continuación ( $u \geq 2$ ) de cada tipo de bucle iterativo. Al respecto, se señala que se emplea la notación  $[X]_{u,1}^v$  y  $[X]_{u,0}^v$  para representar, respectivamente, el 'input' (valor de entrada a la iteración) y el 'output' (resultado o valor de salida de la iteración) de cualquier variable genérica  $X$  en la iteración  $u$ -ésima de un bucle iterativo de tipo  $v$ . En particular, las variables utilizadas para especificar los procedimientos de inicio y continuación de los bucles iterativos se definen del siguiente modo:

- $Q_{ryijk}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el volumen o número total de viajes por hora efectuados mediante el conjunto de las alternativas modales de transporte existentes en el escenario  $s$  en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación, para el caso de los desplazamientos desarrollados sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .
- $MS_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , la cuota de reparto modal general correspondiente al modo  $m$  de transporte en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , para el caso de los viajes efectuados sobre el corredor o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

### 8.2.1. Aproximaciones iniciales para la iteración de partida en el arranque de cada bucle iterativo

Para poner en marcha la iteración inicial o de partida ( $u=1$ ), que sirve de comienzo al correspondiente bucle iterativo, es preciso arrancar el proceso de cálculo con una conjetura o estimación previa aproximada de los valores de las variables incógnita. Dichas variables corresponden, por un lado, a las cuotas de reparto modal general de todos y cada uno de los modos que forman parte del conjunto de alternativas en un cierto escenario y en un año determinado, y, por otra parte, al volumen total de viajes por hora en el conjunto de dichas alternativas modales. Nótese que estas variables permiten calcular de forma inmediata, como se verá posteriormente en el epígrafe 8.3.1, los volúmenes de viajes por hora en

cada uno de dichos modos de transporte, a partir de los cuales será posible obtener las variaciones en el coste generalizado de las opciones modales  $y$ , con ello, determinar también la variación en el coste compuesto de viaje.

A efectos de establecer una aproximación inicial a la posible solución de las variables consideradas como incógnita, es preciso distinguir claramente los bucles iterativos de tipo A y de tipo B, ya que la información con la que se cuenta al inicio del proceso iterativo es diferente en uno y otro caso. Concretamente, esta diferencia se basa en que en el momento de poner en marcha el bucle de tipo B se dispone ya de los resultados producidos por el bucle de tipo A, puesto que un determinado bucle iterativo de tipo B se ejecuta siempre con posterioridad a su homólogo de tipo A.

Se especifican por tanto a continuación los procedimientos de determinación de aproximaciones iniciales que, en la modelización desarrollada, se han adoptado para uno u otro caso.

### 8.2.1.1. Inicio de bucles iterativos de tipo A

En líneas generales, para la puesta en marcha de un determinado bucle iterativo de tipo A se adoptan unas aproximaciones iniciales fundamentadas en resultados obtenidos para variables incógnita correspondientes a años anteriores en el tiempo a aquel para el cual se esté procediendo a efectuar los cálculos. Dicho año anterior o de referencia será generalmente el inmediatamente precedente (es decir,  $y-1$  si se está analizando el año  $y$ , o bien el año base en el caso particular de  $y=1$ ). No obstante, debe apuntarse como excepción el primer año de la etapa de madurez del nuevo servicio de transporte público de posible implantación, en el que, debido a las particularidades de los módulos de cálculo M-R1 y M-B1, se ha de recurrir a los resultados de las variables incógnita obtenidos para el último año previo a la puesta en servicio del nuevo modo de transporte público. Otra puntual excepción viene dada por la cuota de reparto modal perteneciente al modo de transporte público en los módulos de cálculo M-R2 y M-B2 (es decir, durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio), ya que en este caso dicha cuota se configura directamente en base a los resultados obtenidos para los años que constituyen la frontera exterior de dicha fase (esto es, el año inmediatamente anterior a su inicio y el inmediatamente posterior a su final).

En uno u otro caso, en cada año objeto de análisis las aproximaciones iniciales propuestas para las cuotas de reparto modal general (variable  $MS_{ryjk}^{ms}$ ) y para el volumen total de viajes en el conjunto de alternativas modales (variable  $Q_{ryjk}^s$ ) se van a calcular en base a una hipótesis instrumental, planteada exclusivamente a efectos de construir dichas aproximaciones iniciales. Esta hipótesis instrumental consiste en tener en cuenta únicamente los cambios en el coste generalizado de las opciones modales (con respecto al año precedente que se deba tomar como referencia en cada caso) que se producen en aquellas componentes de coste o desutilidad que son independientes en el modelo del volumen de viajes movilizado en cada modo, y cuya potencial cuantía (del cambio o variación) no sea irrelevante en la práctica. Gracias a esta independencia con respecto a los volúmenes de viajes, las variaciones en dichas componentes del coste generalizado pueden ser conocidas —o fácilmente calculadas— de antemano (es decir, con anterioridad al inicio del bucle iterativo).

En particular, las funciones propuestas para el cálculo de las aproximaciones iniciales a utilizar como 'inputs' en la primera iteración en bucles de tipo A se especifican mediante el conjunto de ecuaciones comprendido entre la 8.73.a y la 8.74.b, las cuales se incluyen en el epígrafe 8.5, incorporado al final de la descripción completa de un ciclo iterativo. No obstante, desde el punto de vista de la aplicación del modelo se debe tener presente que su ejecución ha de llevarse a cabo en el punto de arranque de cualquier bucle iterativo de tipo A (es decir, atendiendo al orden que el presente epígrafe representa dentro del modelo). La razón de la no incorporación al texto de dichas ecuaciones hasta el epígrafe 8.5 radica fundamentalmente en que su significado y origen serán mucho más sencillos de comprender tras haber descrito y examinado un ciclo iterativo completo que en este momento, dado que su obtención requiere el uso y combinación de otras variables y ecuaciones que se desarrollarán con posterioridad.

De todos modos, para dejar constancia del orden adecuado e introducir la notación apropiada, se incluyen en este epígrafe las ecuaciones 8.1.a y 8.1.b, que pueden entenderse simplemente como una representación genérica de las ecuaciones específicas anteriormente mencionadas (8.73.a a 8.74.b, dependiendo de la variable a aproximar y del módulo de cálculo en ejecución). Así pues, se indican las siguientes expresiones generales:

$$Q_{ryijk}^s \cong [Q_{ryijk}^s]_{1,I}^A \quad (8.1.a)$$

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{1,I}^A \quad (8.1.b)$$

donde los índices de valor genérico ( $r,s,y,m,i,j,k$ ) adoptan las siguientes combinaciones de valores particulares para cualquiera de los módulos iterativos de cálculo (es decir, M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3):

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.2.1.2. Inicio de bucles iterativos de tipo B

Las aproximaciones iniciales propuestas para la puesta en marcha de un bucle iterativo de tipo B cuentan con la capacidad de beneficiarse del hecho de que en el momento de iniciar un bucle de esta clase se dispone ya de los resultados producidos por el bucle homólogo de tipo A, ya que este último ha de ejecutarse previamente. En consecuencia, es posible tomar los valores finales obtenidos en el bucle A para las cuotas de reparto modal general y para el volumen total de viajes en el conjunto de alternativas modales como aproximaciones iniciales de las respectivas variables en el bucle B. Dichos valores finales del bucle A son el 'output' o resultado de la última iteración que haya sido preciso ejecutar para satisfacer la condición de convergencia (de tal modo que dicha iteración queda designada genéricamente como iteración  $U$ , independientemente del número particular de iteraciones necesarias en cada caso). Por tanto se toman como aproximaciones iniciales:

$$Q_{ryijk}^s \cong [Q_{ryijk}^s]_{1,I}^B = [Q_{ryijk}^s]_{U,0}^A \quad (8.2.a)$$

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{1,I}^B = [MS_{ryijk}^{ms}]_{U,0}^A \quad (8.2.b)$$

con las mismas combinaciones de índices genéricos ( $r,s,y,m,i,j,k$ ) que se señalaron en el caso de las ecuaciones 8.1.a y 8.1.b.

Nótese que las aproximaciones iniciales producidas al aplicar las ecuaciones 8.2.a y 8.2.b tenderán a ser más cercanas a la solución del bucle de tipo B cuanto menor sea la diferencia entre el intervalo de

operación entre vehículos o unidades de transporte público que se haya obtenido en el bucle A (variable  $Hb_{ryijk}^{ms}$ , sin redondear inferiormente) y el intervalo redondeado inferiormente que se debe utilizar durante la ejecución de los bucles de tipo B (variable  $Hs_{ryijk}^{ms}$ )<sup>187</sup>.

### 8.2.2. Continuidad del bucle para cualquier iteración distinta de la inicial o de partida

Para cualquier iteración distinta de la inicial (es decir, con  $u \geq 2$ ), e independientemente de que se trate de un bucle de tipo A o de tipo B, los valores de entrada del volumen total de viajes en el conjunto de alternativas modales, así como de las distintas cuotas de reparto modal general, se construyen como una combinación ponderada de los respectivos 'output' e 'input' procedentes de la iteración anterior. El procedimiento utilizado se plasma en las siguientes ecuaciones:

$$Q_{ryijk}^s \cong [Q_{ryijk}^s]_{u,I}^v = \psi \cdot [Q_{ryijk}^s]_{u-1,0}^v + (1-\psi) \cdot [Q_{ryijk}^s]_{u-1,I}^v \quad \forall v \in \{A,B\}, \quad \forall u \geq 2 \quad (8.3.a)$$

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{u,I}^v = \psi \cdot [MS_{ryijk}^{ms}]_{u-1,0}^v + (1-\psi) \cdot [MS_{ryijk}^{ms}]_{u-1,I}^v \quad \forall v \in \{A,B\}, \quad \forall u \geq 2 \quad (8.3.b)$$

donde  $\psi$  es un peso de ponderación o coeficiente de progreso relativo entre iteraciones<sup>188</sup> que necesariamente debe cumplir  $0 < \psi \leq 1$ .

En las ecuaciones 8.3.a y 8.3.b, los índices de variable  $(r,s,y,m,i,j,k)$  adoptan, a lo largo de toda la serie de procesos de cálculo, los mismos valores que se indicaron para el caso de las ecuaciones 8.1.a y 8.1.b.

## 8.3. NÚCLEO DE CÁLCULO DEL MODELO: AÑO BASE Y MÓDULOS DE CÁLCULO (PREVISIONES PARA EL HORIZONTE DE EVALUACIÓN)

A continuación se procede a desarrollar, a lo largo de una amplia serie de epígrafes, la obtención —tanto para el año base como para los distintos módulos iterativos de cálculo— de las variables que caracterizan el problema analizado, sistematizando las interdependencias mutuas entre los volúmenes de demanda (flujo de viajes en cada modo), las características de la oferta (atributos que presenten las distintas opciones modales y, con especial atención, variables de operación del servicio de transporte público) y los procesos de valoración de alternativas con su correspondiente reparto modal entre los potenciales viajeros (en función de la evolución del coste generalizado de las alternativas modales y del coste compuesto del conjunto de opciones existentes en cada caso).

A nivel operativo, se recuerda que los cálculos correspondientes al año base se ejecutan de forma directa (es decir, sin necesidad de recurrir a métodos iterativos), ya que, para dicho año, las cuotas de reparto modal y el volumen total de viajes por hora en el conjunto de modos considerados son fijos y de valor conocido. Además, para cada posible simulación aleatoria, las operaciones relativas al año base siempre han de efectuarse previamente al inicio de los módulos iterativos de cálculo M-00, M-R0 o M-B0.

En referencia a la notación empleada en los procesos iterativos, por simplicidad se prescinde a partir de este punto de los índices relativos al tipo de bucle ( $v$ ), al número de iteración ( $u$ ) y a la distinción entre 'inputs' y 'outputs' (I/O). Al respecto, se debe entender implícitamente que todas las operaciones incluidas en los módulos iterativos de cálculo se refieren a una iteración genérica  $u$ -ésima en uno u otro tipo de bucle iterativo (las diferencias operativas entre los tipos A y B se señalarán específicamente en

<sup>187</sup> Los conceptos relativos al intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte público, así como las variables asociadas a los mismos, se especifican más detalladamente en el epígrafe 8.3.2.3.

<sup>188</sup> Recuérdese que valores de  $\psi$  próximos a 1 proporcionarían un avance más rápido hacia la solución final (en caso de que tal valor de  $\psi$  efectivamente permitiese alcanzar la convergencia a una solución estable), mientras que valores menores implican un avance más lento pero, a juzgar por las pruebas y aplicaciones prácticas efectuadas en el desarrollo de esta tesis, parecen conllevar una mayor estabilidad en la búsqueda de la solución. Como ejemplo, en el caso práctico de aplicación numérica desarrollado en el Capítulo 9 se empleó  $\psi=0.50$ .

los epígrafes correspondientes). Además, los valores de variables calculados dentro del bucle iterativo pueden ser considerados como 'outputs' de la correspondiente iteración, sin necesidad de hacer mención explícita de ello.

No obstante, la notación con índices explícitos relativos al tipo de bucle, al número de iteración y a la distinción entre 'inputs' y 'outputs' se retomará posteriormente en el epígrafe 8.4, al ser de nuevo necesario recurrir a dicho tipo de índices para representar formalmente los procedimientos de comprobación o test de convergencia de cada iteración del bucle y las operaciones de continuidad entre iteraciones sucesivas.

### 8.3.1. Volumen de viajes por hora en cada modo de transporte

La variable  $q_{ryijk}^{ms}$  indica, en la simulación aleatoria  $r$ , el volumen o número de viajes (por hora) realizados mediante el modo  $m$  de transporte en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación dado el escenario  $s$ , para el caso de los desplazamientos desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Su variable equivalente para el año base se designa como  $q_{ijk}^{*m}$ , donde se omiten, por innecesarios, los índices correspondientes al escenario ( $s$ ), al año ( $y$ ) y a la simulación aleatoria ( $r$ ).

Las unidades utilizadas en la formulación para las variables  $q_{ryijk}^{ms}$  y  $q_{ijk}^{*m}$  son personas (viajes) por hora [prs/h], para cada uno de los posibles sentidos de viaje.

Esta variable, ya sea bajo la forma de  $q_{ijk}^{*m}$  o  $q_{ryijk}^{ms}$ , se calcula simplemente como el producto del volumen total de viajes por hora en el conjunto de modos considerados por la cuota de reparto modal general que corresponda al respectivo modo de transporte. De esta forma se obtienen las formulaciones presentadas a continuación.

**Para el año base**

$$q_{ijk}^{*m} = MS_{ijk}^{*m} \cdot Q_{ijk}^{*m} \quad (8.4.a)$$

donde los índices  $(m, i, j, k)$  adoptan las siguientes combinaciones de valores:

$$m \in \{C, M, V, P\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Obsérvese que para el año base se prescinde de que el superíndice  $m$  tome el valor 0 (representativo de autobús convencional en tráfico mixto) puesto que el volumen de viajes en el modo de transporte público existente en dicho año (autobús convencional) ya era considerado directamente uno de los datos de entrada del modelo.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$q_{ryijk}^{ms} = MS_{ryijk}^{ms} \cdot Q_{ryijk}^s \quad (8.4.b)$$

con las siguientes combinaciones de valores para los índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$ :

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s=0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s=R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s=R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s=B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s=B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\};$$

$$i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.2. Dimensionamiento del servicio de transporte público

#### 8.3.2.1. Volumen de pasajeros en la sección de máxima demanda de la línea de transporte público

Para los modos de transporte público, la variable  $PM_{ryijk}^{ms}$  simboliza, para la simulación aleatoria  $r$ , el volumen medio de pasajeros (por hora) que atraviesan, durante un cierto período horario  $j$ , la sección de máxima demanda (S.M.D.) de la línea  $i$  en un determinado sentido de viaje  $k$ , dada la operación, en el año  $y$  y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Por su parte, para el año base se define su variable equivalente  $PM_{ijk}^*$ , en la cual se prescinde de aquellos índices que resultan innecesarios, siendo el caso de los indicadores de escenario ( $s$ ), de modo ( $m$ ), de año ( $y$ ) y de simulación aleatoria ( $r$ ).

Conforme a su significado, las unidades empleadas en la formulación para las variables  $PM_{ryijk}^{ms}$  y  $PM_{ijk}^*$  son pasajeros (genéricamente personas) por hora [prs/h], para cada posible sentido de viaje.

Obsérvese que la variable  $PM_{ryijk}^{ms}$  (o  $PM_{ijk}^*$  en el caso del año base) representa, dada la sección de máxima demanda en un determinado sentido, el volumen horario de pasajeros (en esa sección) promediado a lo largo de toda la duración de un período horario específico. Por tanto, estas variables no recogen la posible existencia de variaciones temporales en la intensidad de la demanda —tales como picos de duración relativamente pequeña— interiores a dicho período horario (recuérdese que los períodos horarios deben ser definidos procurando que sean sensiblemente homogéneos, pero nunca lo van a ser totalmente). La influencia de estas rápidas variaciones o picos de demanda será introducida en la modelización en el epígrafe siguiente, a través del coeficiente de pico intrahorario o de hora punta (*peak hour coefficient*).

En cuanto a la localización de las secciones de máxima demanda, debe tenerse en cuenta que usualmente esta es diferente en los dos posibles sentidos de la línea, y que además puede ser relativamente habitual que varíe entre distintos períodos horarios.

De acuerdo a la estructura de datos del modelo desarrollado, el volumen medio de pasajeros en la sección de máxima demanda se calcula (ya sea  $PM_{ijk}^*$  o  $PM_{ryijk}^{ms}$ ) como el número total de pasajeros por hora que acceden a la línea de transporte público en el sentido estudiado (dado por las variables  $q_{ijk}^*$  o  $q_{ryijk}^{ms}$  particularizada para el correspondiente modo de transporte público) multiplicado por el coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda (variable  $\sigma_{ijk}$ , tomada como dato de entrada). Por tanto se obtendrán las expresiones indicadas a continuación.

**Para el año base**

$$PM_{ijk}^* = \sigma_{ijk} \cdot q_{ijk}^* \quad (8.5.a)$$

donde:



$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$PM_{ryijk}^{ms} = \sigma_{ijk} \cdot q_{ryijk}^{ms} \quad (8.5.b)$$

donde los índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$  toman los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m = \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R & \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.2.2. Volumen de diseño para la línea de transporte público

A continuación, la variable  $PD_{ryijk}^{ms}$  determina, en la simulación aleatoria  $r$ , el volumen de diseño (pasajeros por hora) obtenido para el dimensionamiento del servicio de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , supuesta la operación, en el año  $y$  y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Su variable equivalente para el año base se denomina  $PD_{ijk}^*$ , omitiéndose en la misma los índices innecesarios correspondientes a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

Las unidades utilizadas en la formulación para las variables  $PD_{ryijk}^{ms}$  y  $PD_{ijk}^*$  son, de nuevo, pasajeros (personas) por hora [prs/h], para cada posible sentido de viaje.

El volumen de diseño, representado en la modelización por la variable  $PD_{ryijk}^{ms}$  ( $PD_{ijk}^*$  en el caso del año base), considera, para una determinada sección de máxima demanda, el mayor volumen de pasajeros (por unidad de tiempo) esperable durante un intervalo de tiempo de duración relativamente corta (inferior a la del período horario en estudio, tomándose habitualmente 15 minutos cuando se trata de períodos horarios correspondientes a horas punta). De este modo se incorpora al dimensionamiento del servicio de transporte público la magnitud de las posibles variaciones temporales de demanda existentes dentro de un mismo período horario de programación del servicio, a fin de evitar excesivos niveles de aglomeración de pasajeros (*crowding*) en los vehículos durante tales picos de demanda, e incluso que haya viajeros que tengan que quedarse sin subir a bordo del primer vehículo o unidad de transporte público que ven circular por su parada (*pass-ups*) por estar la capacidad de dicho vehículo o unidad totalmente ocupada.

De acuerdo a Vuchic (2005, pp. 48-49), el volumen de diseño se obtiene a efectos de cálculo como el producto del volumen medio de pasajeros por hora que atraviesan la sección de máxima demanda (determinado en el caso del modelo por las variables  $PM_{ryijk}^{ms}$  o  $PM_{ijk}^*$ ) por el coeficiente de pico intrahorario o de hora punta (*peak hour coefficient*), que en la modelización desarrollada está

representado por la variable  $PHC_{ijk}$  (de valor siempre mayor o igual que 1). De este modo se da lugar a las ecuaciones 8.6.a y 8.6.b, incorporadas al final de este epígrafe.

No obstante, recuérdese que el criterio de notación seguido por la diversa documentación técnica para mayorar los volúmenes horarios medios y convertirlos en volúmenes pico (o volúmenes de diseño) no es siempre el mismo. Así, por ejemplo, el '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*' de EE.UU. (TCRP, 2013: pp. 3.17-3.18, 6.84-6.85, 6.129, 8.65-8.66) utiliza el denominado '*peak hour factor*' o  $PHF$  (factor de pico intrahorario o de hora punta), que no es más que el valor inverso del coeficiente  $PHC$  empleado por Vuchic (2005: pp. 48-49). Por tanto este factor  $PHF$  es siempre de valor menor o igual que la unidad, y en este caso se utilizaría dividiendo al volumen medio de pasajeros por hora en la sección de máxima demanda ( $PM_{ryijk}^{ms}$  o  $PM^*_{ijk}$ ) para transformarlo en el volumen pico o volumen de diseño.

**Para el año base**

$$PD^*_{ijk} = PHC_{ijk} \cdot PM^*_{ijk} \quad (8.6.a)$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$PD_{ryijk}^{ms} = PHC_{ijk} \cdot PM_{ryijk}^{ms} \quad (8.6.b)$$

con las mismas combinaciones de índices ( $r, s, y, m, i, j, k$ ) que se señalaron anteriormente en la ecuación 8.5.b para el cálculo de la variable  $PM_{ryijk}^{ms}$ .

### 8.3.2.3. Intervalo entre unidades de transporte público

En el procedimiento de determinación de los intervalos entre el paso consecutivo de vehículos o unidades de transporte público en las líneas en estudio (*headway scheduling*), resulta necesario diferenciar algunas variantes en el modo en que se definen dichos intervalos, en función de que su forma de cálculo responda únicamente a una cuestión de satisfacción de los volúmenes de demanda, a que se impongan además unas restricciones sobre los intervalos mínimo y máximo admisibles, o a que, finalmente, se adopte para la operación un intervalo redondeado inferiormente o estandarizado a una serie de valores habituales. Así pues, a continuación se definen y obtienen las distintas variables relacionadas con el intervalo de operación del transporte público.

#### 8.3.2.3.a. Intervalo estrictamente necesario para atender el volumen de diseño

La variable  $Hc_{ryijk}^{ms}$  determina, para la simulación aleatoria  $r$ , el intervalo entre vehículos o unidades del modo  $m$  de transporte público que, en el escenario  $s$  y en el año  $y$ , resulta estrictamente suficiente para ofrecer una capacidad programada del servicio ajustada al volumen de diseño en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Para el caso particular del año base, se define su variable equivalente  $Hc^*_{ijk}$ , en la que se omiten los índices innecesarios, que corresponden a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

En la presente modelización, la unidad de tiempo utilizada para las variables  $Hc_{ryijk}^{ms}$  y  $Hc^*_{ijk}$  es el minuto [min], ya que es la más habitual —e intuitiva— para expresar los intervalos de operación en el transporte público.

Entre los diversos procedimientos expuestos por Ceder (2007: pp. 50-78) para la determinación de la frecuencia o el intervalo en líneas de transporte público, se ha seleccionado, por su simplicidad y por ser

el más comúnmente propuesto<sup>189</sup>, el denominado “Método 2” de carga máxima con datos de chequeo puntual (*max load (point check) methods*). Esta clase de métodos concentran su atención en servir el volumen de pasajeros en el punto o sección de máxima demanda, a diferencia de los métodos de perfil de carga con datos de chequeo del recorrido (*load profile (ride check) methods*), que tienen en consideración el perfil completo de volúmenes de pasajeros a lo largo de las distintas secciones del recorrido de la línea.

Bajo el criterio del tipo de método señalado, la condición básica de dimensionamiento del servicio de transporte público consiste en que la capacidad programada para la operación de la línea (expresada comúnmente en plazas por hora y por sentido) sea igual o superior al volumen de diseño esperado para la sección de máxima demanda. Esta premisa se traduce en la siguiente ecuación:

$$(C_N = LF \cdot C_O) \geq P_d \quad (8.7)$$

donde  $LF$  (*load factor*, también representado típicamente como  $\alpha$ ) denota el coeficiente de utilización de la capacidad programada, factor de ocupación o factor de carga (personas/plaza) para la sección de máxima demanda;  $C_O$  es la capacidad programada bruta o total (aquella que se obtendría para un factor de ocupación  $LF$  igual a 1);  $C_N$  representa el concepto que podría denominarse como capacidad programada neta, útil o aprovechable (aquella realmente utilizable si se pretende no sobrepasar regularmente un determinado valor del factor de ocupación en ninguna sección del recorrido); y  $P_d$  designa el volumen de diseño (personas por hora para cada sentido) en la sección de máxima demanda (equivalente por tanto a las variables del modelo  $PD_{ryjk}^{ms}$  o  $PD_{ijk}^*$ ).

La capacidad programada (*scheduled capacity*), ya sea en forma de capacidad bruta o total (Vuchic, 2005: p. 11; Molinero y Sánchez, 2005: p. 403) o de capacidad neta, útil o aprovechable (Vuchic, 2005: p. 50), se calcula respectivamente según las siguientes expresiones:

$$C_O = C_{TU} \cdot f = C_{TU} \cdot \frac{60}{h} \quad (8.8.a)$$

$$C_N = LF \cdot C_O = LF \cdot C_{TU} \cdot f = LF \cdot C_{TU} \cdot \frac{60}{h} \quad (8.8.b)$$

donde  $C_{TU}$  representa la capacidad (estática) de una unidad de transporte o vehículo<sup>190</sup> (plazas, sentadas y de pie, por unidad de transporte) y equivale, en la terminología del modelo, a la variable de entrada  $CAPu_n^m$ . Por su parte,  $f$  simboliza la frecuencia de operación del servicio (en unidades por hora, es decir,  $h^{-1}$ ), mientras que  $h$  representa el intervalo entre unidades de transporte o vehículos expresado en minutos (de tal forma que, con las unidades mencionadas,  $f=60/h$ ).

Por tanto, combinando las ecuaciones 8.7 y 8.8.b se obtiene que el intervalo necesario para atender el volumen de diseño viene dado por la expresión indicada a continuación (Vuchic, 2005: p. 51; Molinero y Sánchez, 2005: pp. 409-410):

$$h \leq 60 \cdot \frac{LF \cdot C_{TU}}{P_d} \quad (8.9)$$

Así pues, la expresión arriba indicada sirve como punto de partida para configurar la serie de ecuaciones comprendida entre 8.10.a.i y 8.10.b.iii (donde se sustituye la notación simplificada de la ecuación 8.9 por las variables equivalentes utilizadas en el modelo desarrollado). Para este conjunto de ecuaciones del

<sup>189</sup> Véase, como muestra, la utilización implícita de este tipo de métodos en Vuchic (2005: pp. 44-54) y en Molinero y Sánchez (2005: pp. 409-416) para determinar, entre otros parámetros, el intervalo entre vehículos o unidades.

<sup>190</sup> Recuérdese que ambos conceptos resultan equivalentes cuando la unidad de transporte está constituida por un único vehículo capaz de operar de manera autónoma e independiente, como sucede frecuentemente en los modos de transporte público analizados en la presente tesis. De no ser así, debe tomarse la capacidad estática de la unidad de transporte o composición, formada por más de un vehículo. Esta última situación puede ser aplicable a los modos de tipo ferroviario en ciertas explotaciones, según las necesidades.

modelo debe tenerse en cuenta, adicionalmente, que en el caso de líneas convencionales (longitudinales de doble sentido) se ha de seleccionar, a efectos de operación, el menor de los intervalos que, por cálculo de la capacidad programada necesaria, corresponderían a cada uno de los dos sentidos. Esto es debido a que en este tipo de líneas, por su configuración de operación, el intervalo aplicado en ambos sentidos debe ser necesariamente el mismo. Por su parte, en líneas circulares de sentido único solo existe, lógicamente, intervalo de paso en un sentido ( $k=1$ ), mientras que en líneas circulares de doble sentido la formulación propuesta contempla la posibilidad de que existan intervalos diferentes en los dos sentidos en función de las distintas características de los flujos de viajes.

De acuerdo a las consideraciones indicadas se obtienen finalmente, tanto para el año base como para los módulos de cálculo posteriores, las ecuaciones presentadas a continuación, que adoptan las variaciones necesarias en función del tipo de línea (LT: longitudinal o convencional de doble sentido; RT: circular de doble sentido; RO: circular de sentido único).

**Para el año base**

Si  $TypL_i = LT$  :

$$Hc^*_{ij1} = Hc^*_{ij2} = 60 \cdot CAPu^0_{TypV_i} \cdot \min \left\{ \frac{LF^0_{ij1}}{PD^*_{ij1}}, \frac{LF^0_{ij2}}{PD^*_{ij2}} \right\} \quad (8.10.a.i)$$

Si  $TypL_i = RT$  :

$$Hc^*_{ijk} = 60 \cdot \frac{LF^0_{ijk} \cdot CAPu^0_{TypV_i}}{PD^*_{ijk}} \quad (8.10.a.ii)$$

Si  $TypL_i = RO$  :

$$Hc^*_{ij1} = 60 \cdot \frac{LF^0_{ij1} \cdot CAPu^0_{TypV_i}}{PD^*_{ij1}} \quad (8.10.a.iii)$$

donde los índices genéricos  $(i,j,k)$  presentes en cualquiera de las tres ecuaciones han de tomar los siguientes valores:

$i = 1, 2, \dots, NL$  ;  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$  ;  $k = 1, 2$  ( $k$  aplicable solo si  $TypL_i = RT$ )

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $TypL_i = LT$  :

$$Hc^{ms}_{ryj1} = Hc^{ms}_{ryj2} = 60 \cdot CAPu^m_{TypV_i^m} \cdot \min \left\{ \frac{LF^m_{ij1}}{PD^{ms}_{ryj1}}, \frac{LF^m_{ij2}}{PD^{ms}_{ryj2}} \right\} \quad (8.10.b.i)$$

Si  $TypL_i = RT$  :

$$Hc^{ms}_{ryjk} = 60 \cdot \frac{LF^m_{ijk} \cdot CAPu^m_{TypV_i^m}}{PD^{ms}_{ryjk}} \quad (8.10.b.ii)$$

Si  $TypL_i = RO$  :

$$Hc^{ms}_{ryj1} = 60 \cdot \frac{LF^m_{ij1} \cdot CAPu^m_{TypV_i^m}}{PD^{ms}_{ryj1}} \quad (8.10.b.iii)$$

donde los índices genéricos  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de cualquiera de estas tres ecuaciones deben adoptar las siguientes combinaciones de valores:

$r = 1, 2, \dots, Nrs$  ;  $s \in \{0, R, B\}$  ;

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$i = 1, 2, \dots, NL$  ;  $j = 1, 2, \dots, Nper_i$  ;  $k = 1, 2$  ( $k$  aplicable solo si  $TypL_i = RT$ )

### 8.3.2.3.b. Intervalo restringido entre los límites mínimo y máximo

La variable  $Hb_{ryijk}^{ms}$  indica, para las condiciones correspondientes a cada una de las posibles combinaciones de índices (es decir, simulación aleatoria  $r$ , escenario  $s$ , año  $y$ , modo  $m$ , línea  $i$ , período horario  $j$  y sentido  $k$ ), el intervalo entre vehículos o unidades de transporte público resultante de restringir el dominio de posible variación de la variable precedente  $Hc_{ryijk}^{ms}$  (intervalo ajustado al volumen de diseño) al rango comprendido entre sus límites mínimo y máximo (previamente establecidos como datos). Análogamente, para el año base se define la variable equivalente  $Hb_{ijk}^*$ , en la que se omiten, por innecesarios, los índices relativos a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

Consecuentemente con  $Hc_{ryijk}^{ms}$  y  $Hc_{ijk}^*$ , la unidad de tiempo empleada en el modelo para las variables  $Hb_{ryijk}^{ms}$  y  $Hb_{ijk}^*$  es también el minuto [min].

Recuérdese que las restricciones de intervalo mínimo y máximo aquí impuestas están relacionadas, respectivamente, con el agotamiento de la frecuencia máxima de operación que un determinado tipo de sistema de transporte es capaz de mantener en condiciones de fiabilidad y seguridad (es decir, con la capacidad máxima de tránsito de una línea o infraestructura de transporte público) y, en el extremo opuesto, con la preservación de un intervalo máximo de servicio (*policy headway*) cuyo valor es fijado habitualmente por las administraciones o autoridades de transporte.

Por otra parte, los límites de intervalo mínimo y máximo de operación ( $Hmin_{ij}^m$  y  $Hmax_{ij}^m$ ) deberían haber sido sometidos previamente a un proceso de redondeo (superiormente en el caso de los mínimos, inferiormente en el caso de los máximos) si no coincidiesen con alguno de los valores incluidos en el conjunto  $H$  de intervalos estandarizados que se especifica en el epígrafe siguiente (véase 8.3.2.3.c). No obstante, se excluyen de la aplicación de este redondeo los límites de intervalo mínimo si estos son menores de 2.5 minutos (umbral inferior por debajo del cual no se aplica redondeo de intervalos, de acuerdo al criterio adoptado en la presente modelización). En conclusión, resulta poco probable en la práctica que sea necesario aplicar dicho redondeo a alguno de estos límites.

Se obtienen, mediante la aplicación de las restricciones de intervalo mínimo y máximo, las ecuaciones que se indican a continuación. En relación con las mismas, recuérdese que las expresiones matemáticas del tipo  $y(x) = \max\{a, \min\{f(x), b\}\}$ , con  $a < b$ , restringen la imagen de  $y(x)$  al intervalo  $[a, b]$ .

**Para el año base**

$$Hmin_{ij}^0 \leq Hb_{ijk}^* \leq Hmax_{ij}^0 \Rightarrow Hb_{ijk}^* = \max\{Hmin_{ij}^0, \min\{Hc_{ijk}^*, Hmax_{ij}^0\}\} \quad (8.11.a)$$

donde:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$Hmin_{ij}^m \leq Hb_{ryijk}^{ms} \leq Hmax_{ij}^m \Rightarrow Hb_{ryijk}^{ms} = \max \left\{ Hmin_{ij}^m, \min \left\{ Hc_{ryijk}^{ms}, Hmax_{ij}^m \right\} \right\} \quad (8.11.b)$$

con las siguientes combinaciones de valores para los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$ :

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \left\{ \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \right\} & \text{si } s = R \\ = \left\{ \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \right\} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m = \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R & \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.2.3.c. Intervalo restringido y redondeado inferiormente

Finalmente, la variable  $Hs_{ryijk}^{ms}$  determina, para cada posible combinación de índices (simulación aleatoria  $r$ , escenario  $s$ , año  $y$ , modo  $m$ , línea  $i$ , período horario  $j$  y sentido  $k$ ), el intervalo (en minutos [min]) entre vehículos o unidades de transporte público consecutivos resultante tanto de haber impuesto previamente la pertenencia al rango de variación comprendido entre los límites mínimo y máximo como de aproximar inferiormente el intervalo a una serie de valores preestablecidos o estandarizados. Esta variable indica, por tanto, el intervalo que realmente se utilizaría en la operación del servicio. Su equivalente específico para el año base se designa como  $Hs^*_{ijk}$ , omitiéndose con respecto a la variable general los índices que corresponden a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

En general, el procedimiento aquí descrito transforma una variable de tipo continuo en otra discreta, donde la relación entre ambas viene dada por una función escalonada.

Como uno de los posibles conjuntos de intervalos operativos se ha propuesto la siguiente serie (en minutos): 2.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, ... , y sucesivos múltiplos de 5. Obsérvese que en este conjunto se incluyen los intervalos denominados 'clock-face headways' o 'clock headways' (Vuchic, 2005: p. 10; Molinero y Sánchez, 2005: p. 410; Ceder, 2007: p. 87), que son aquellos intervalos mayores o iguales a 6 minutos que hacen que los horarios teóricos de paso por una parada o estación se repitan sucesivamente en cada hora (es decir, al dividir 60 minutos entre alguno de estos intervalos el resultado es un número entero). Este tipo de intervalos facilitan la elaboración de horarios y la memorización de los mismos por parte de los viajeros. Además, para períodos superiores a 10 minutos se han incluido todos aquellos múltiplos de 5 (aunque no sean 'clock headways'). Por otra parte, se ha adoptado el criterio de que los intervalos de cálculo que resulten inferiores a 2.5 minutos se mantengan sin redondear, ya que para intervalos tan sumamente cortos estos no influyen en el comportamiento o patrón de llegadas de usuarios a las paradas o estaciones y, por tanto, el redondeo en este caso perdería gran parte de su sentido (por el contrario, desde el punto de vista del operador, el redondeo de intervalos tan bajos generaría un aumento muy significativo de la frecuencia y, por consiguiente, del número de vehículos en operación). En general, a la hora de conformar este conjunto de posibles

intervalos operativos se ha procurado seleccionar intervalos suficientemente próximos entre sí para que los consiguientes redondeos no introduzcan una distorsión excesivamente amplia entre la capacidad necesaria para atender a la demanda (volumen de diseño) y la capacidad programada realmente ofertada o puesta en servicio.

En cualquier caso, tal como se había anticipado ya en el epígrafe 3.8.3, si en un determinado sistema en estudio se tuviese conocimiento de que no se procedería a redondear los intervalos de operación, sería factible reformular el modelo para adaptarlo a tal circunstancia. Del mismo modo, en caso de que se supiese de antemano que los valores de intervalo redondeado admitidos por un determinado operador fuesen a ser diferentes de los aplicados en el desarrollo del modelo, también sería posible modificar estos valores para adaptarlos a las preferencias o estándares del operador en cuestión.

En conclusión, las variables  $HS^*_{ijk}$  y  $HS^{ms}_{ryijk}$  se obtienen de acuerdo a las expresiones indicadas a continuación para el año base y para los módulos de cálculo posteriores, respectivamente.

**Para el año base**

Si  $Hb^*_{ijk} \geq 2.5$  min :

$$HS^*_{ijk} = \max \left\{ x \mid x \in H \wedge x \leq Hb^*_{ijk} \right\} \tag{8.12.a.i}$$

siendo  $H = \{2.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, \dots, 5n; \text{ con } n \in \mathbb{N}\}$

Si  $Hb^*_{ijk} < 2.5$  min :

$$HS^*_{ijk} = Hb^*_{ijk} \tag{8.12.a.ii}$$

con:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $Hb^{ms}_{ryijk} \geq 2.5$  min :

$$HS^{ms}_{ryijk} = \max \left\{ x \mid x \in H \wedge x \leq Hb^{ms}_{ryijk} \right\} \tag{8.12.b.i}$$

siendo  $H = \{2.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, \dots, 5n; \text{ con } n \in \mathbb{N}\}$

Si  $Hb^{ms}_{ryijk} < 2.5$  min :

$$HS^{ms}_{ryijk} = Hb^{ms}_{ryijk} \tag{8.12.b.ii}$$

donde, en cualquiera de los dos casos, se han de considerar las mismas combinaciones de índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  que se indicaron en la ecuación 8.11.b para la obtención de la variable  $Hb^{ms}_{ryijk}$ .

**8.3.2.4. Densidades de pasajeros de pie en los vehículos de transporte público**

Se presentan a continuación dos variables relacionadas con la densidad de pasajeros de pie existente en los vehículos de los diferentes modos de transporte público y, por tanto, de forma indirecta, con el mayor o menor nivel de congestión del transporte público que los usuarios experimentan en sus viajes. La primera de estas variables indica la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda (abreviadamente S.M.D.) de una determinada línea, mientras que la segunda hace referencia a la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo del recorrido de la línea.

**8.3.2.4.a. Densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda**

La variable  $DmIs_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la densidad de pasajeros de pie existente, de media, en los vehículos o unidades de transporte del modo  $m$  de transporte público en el escenario  $s$ , al paso por la sección de máxima demanda de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello ubicado temporalmente en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación. Particularmente, para el año base se determina la variable equivalente  $DmIs_{ijk}^*$ , en la que se prescinde —por innecesarios— de los índices que corresponden a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

En el conjunto de la formulación presentada, la unidad específica en la que se expresan las variables  $DmIs_{ryijk}^{ms}$  y  $DmIs_{ijk}^*$  son personas (de pie) por metro cuadrado [prs/m<sup>2</sup>].

La obtención de esta densidad se fundamenta, en primer lugar, en el número medio de pasajeros que atraviesan la sección de máxima demanda en cada uno de los vehículos o unidades de transporte, el cual se calcula como el volumen de pasajeros por hora que atraviesan dicha sección en la línea de transporte público (dado por las variables  $PM_{ryijk}^{ms}$  o  $PM_{ijk}^*$ ) dividido entre la frecuencia de paso de los vehículos o unidades de transporte ( $\theta$ , lo que es equivalente, multiplicado por el intervalo expresado en horas).

El siguiente paso establece que justo cuando el número de pasajeros por vehículo o unidad de transporte sea igual a su número de asientos ( $Nse_n^m$ ) se asume que la densidad de pasajeros de pie es cero. Esto presupone que los viajeros ocupan todos los asientos que estén libres antes de empezar a permanecer de pie. Ciertamente, la simple observación del comportamiento real de los pasajeros en los distintos medios de transporte público colectivo indica que, en no pocas ocasiones, se da simultáneamente la existencia de algunos viajeros de pie y la disponibilidad de asientos libres, especialmente cuando la fracción de asientos ocupados se aproxima a la totalidad. No obstante, por simplicidad, en el desarrollo de la formulación se ha prescindido de considerar este efecto.

En el extremo opuesto, cuando el número de pasajeros por vehículo o unidad de transporte alcanza la capacidad del mismo ( $CAPu_n^m$ ) se verifica, por definición, que la densidad de pasajeros de pie sea igual a aquella densidad de referencia ( $Dref$ ) para la cual se haya definido la capacidad de los vehículos o unidades (normalmente 4 prs/m<sup>2</sup>).

Así pues, la densidad de pasajeros de pie correspondiente a cualquier situación intermedia entre estos dos puntos de densidad conocida se calcula por interpolación lineal (véase Figura 8.1), ya que, dada una determinada superficie disponible, el número de personas de pie y la densidad media que producen son linealmente proporcionales. Adicionalmente, se debe imponer que siempre que el número de pasajeros por vehículo o unidad de transporte sea inferior al número de asientos la densidad de pasajeros de pie se defina como cero (puesto que no tendría sentido físico que la densidad pudiese tomar valores negativos).

Atendiendo a las pautas señaladas, se obtienen para el cálculo de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda las expresiones indicadas a continuación, tanto para el año base como para los posteriores módulos de cálculo.

**Para el año base**

$$DmIs_{ijk}^* = \max \left\{ Dref \cdot \frac{PM_{ijk}^* \cdot \frac{Hs_{ijk}^*}{60} - Nse_{TypV_i^0}^0}{CAPu_{TypV_i^0}^0 - Nse_{TypV_i^0}^0}, 0 \right\} \tag{8.13.a}$$

donde:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$



Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$Dm_{ls}^{ms} = \max \left\{ Dref \cdot \frac{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms} - Nse_{TypV_i^m}^m}{CAPu_{TypV_i^m}^m - Nse_{TypV_i^m}^m}, 0 \right\} \quad (8.13.b)$$

donde el intervalo genérico  $h$  se particulariza, según el tipo de bucle iterativo en ejecución, del siguiente modo:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Por otra parte, todos los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de la ecuación 8.13.b han de adoptar las combinaciones de valores indicadas a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

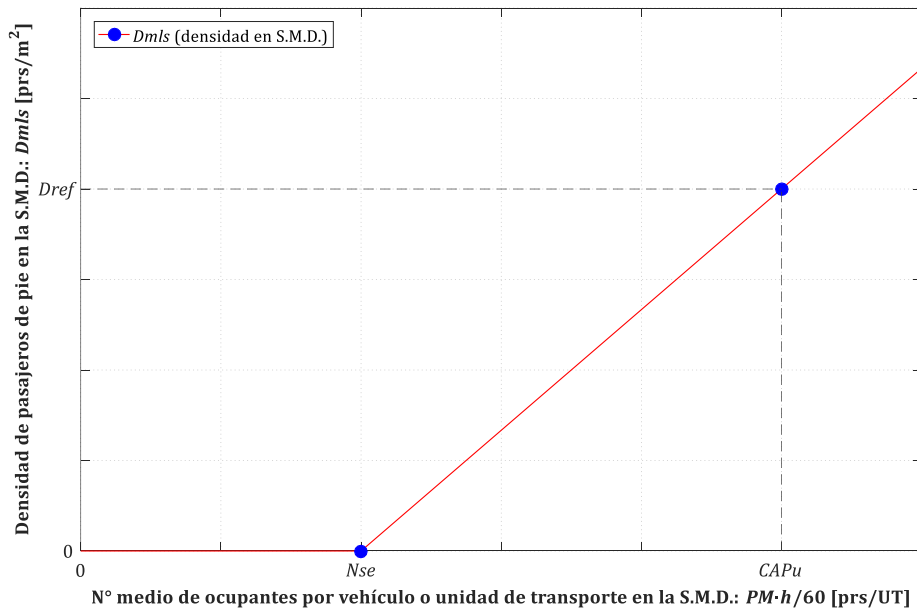
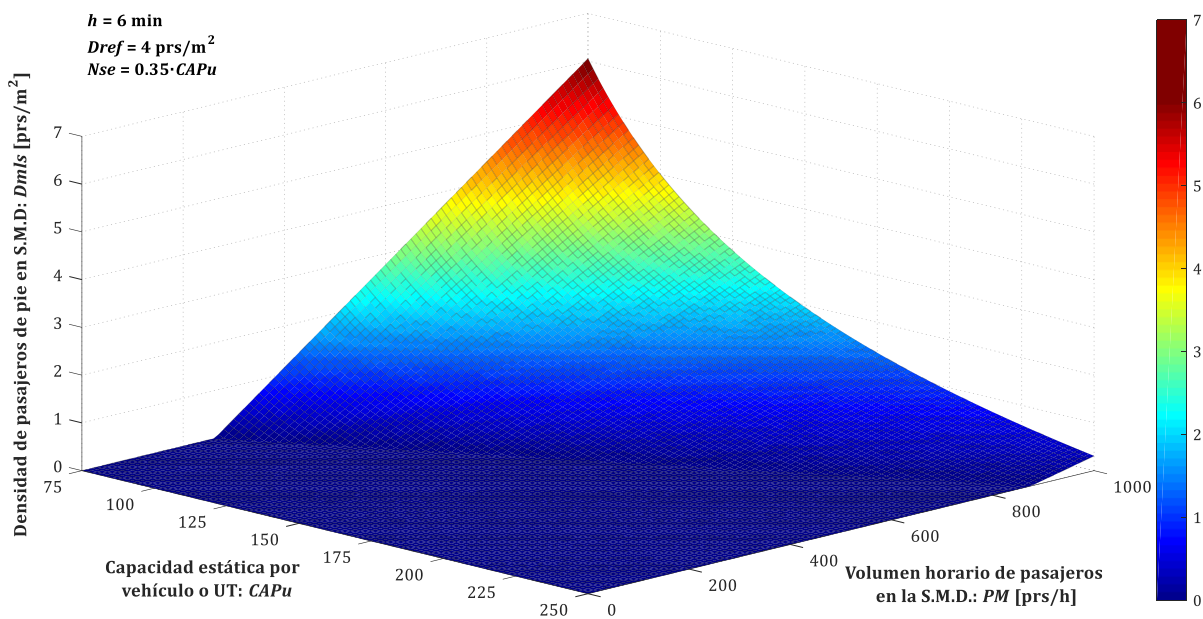


Figura 8.1. Cálculo de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda.

Finalmente, en la Figura 8.2 se representa gráficamente la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda obtenida para diversos volúmenes de pasajeros  $PM$  (número medio de pasajeros que atraviesan, en un determinado sentido, la sección de máxima demanda de la línea durante una hora) y para diferentes capacidades unitarias de los vehículos o unidades de transporte ( $CAPu$ ). Para configurar esta gráfica se han tomado, además, los siguientes valores de las variables involucradas en el cálculo de dicha densidad:  $h = 6$  min;  $D_{ref} = 4$  prs/m<sup>2</sup>;  $N_{se} = 0.35 \cdot CAPu$ . Obsérvese que, para poder mostrar de una forma más clara el aumento de la densidad con el crecimiento del volumen horario de pasajeros, en este ejemplo se ha mantenido fijo el intervalo  $h$  (igual a 6 minutos independientemente de dicho volumen). Sin embargo, no se debe olvidar que en la aplicación de la formulación propuesta el intervalo se readapta en función del correspondiente volumen de diseño (al menos mientras el intervalo pueda mantenerse entre sus límites mínimo y máximo). Por otra parte, a efectos de desarrollar este ejemplo se ha supuesto también que el número de asientos por vehículo o unidad de transporte ( $N_{se}$ ) es proporcional a la capacidad total del mismo, constituyendo el 35% de dicha capacidad.



**Figura 8.2.** Ejemplo de cálculo de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda en función del volumen horario de pasajeros en dicha sección y de la capacidad estática por vehículo o unidad de transporte, dado un intervalo fijo entre vehículos.

**8.3.2.4.b. Densidad de pasajeros de pie a lo largo de la línea (promedio)**

Por su parte, la variable  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo del recorrido de la línea  $i$ , dada la operación, en el año  $y$  y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público, todo ello durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . De manera similar, su variable equivalente para el año base se designa  $D_{avl}^*_{ijk}$ , omitiéndose con respecto a la variable general los índices correspondientes a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ), año ( $y$ ) y simulación aleatoria ( $r$ ).

Al igual que para la densidad en la sección de máxima demanda, la unidad utilizada para las variables  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  y  $D_{avl}^*_{ijk}$  también son personas (de pie) por metro cuadrado [prs/m<sup>2</sup>].

Estrictamente, la variable  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  (o en su caso  $D_{avl}^*_{ijk}$ ) debe definirse teóricamente como la media de las densidades de pasajeros de pie existentes a lo largo de los distintos puntos (diferenciales de longitud) del recorrido de la línea de transporte público. Dado que el número de pasajeros a bordo del vehículo permanece constante dentro de cada segmento o tramo intermedio entre paradas, la densidad de pasajeros de pie (de acuerdo a la suposición de que los viajeros se comportan según un patrón fijo,

ocupando todos los asientos que estén libres antes de empezar a permanecer de pie) se mantiene también constante dentro de cada tramo. Este hecho permitiría transformar el planteamiento continuo inicial en una formulación discreta, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$D_{avl} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L D(s) \cdot ds = \frac{1}{L} \cdot \sum_{n=1}^{Nsc} D_n \cdot \Delta s_n \quad (8.14)$$

donde  $L$  representa la longitud de la línea;  $D(s)$  es la densidad de pasajeros de pie en el punto dado por la coordenada longitudinal  $s$ ;  $Nsc$  es el número total de segmentos o tramos entre paradas;  $D_n$  representa la densidad de pasajeros de pie en el tramo  $n$ ; y  $\Delta s_n$  es la longitud del segmento o tramo  $n$ .

Obsérvese, por otra parte, que esta densidad media se define únicamente en función de los puntos o secciones del recorrido de la línea, es decir, desde el punto de vista de la densidad que registraría un observador externo en cada sección. Frente a esto, un planteamiento diferente consistiría en tener en cuenta el distinto número de pasajeros que están experimentando la densidad correspondiente a cada uno de los puntos o tramos, de modo que se obtuviese la media de las densidades soportadas por los miembros de un conjunto o subconjunto de viajeros a lo largo del recorrido (punto de vista de los pasajeros). Este último planteamiento es el que se utilizará posteriormente dentro del epígrafe 8.3.5.2, al objeto de incorporar en la modelización el aumento del coste del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos, cuantificado este a través de la densidad de pasajeros de pie experimentada por los viajeros. Sin embargo, en el presente epígrafe, dado que las variables  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  y  $D_{avl}^{*}_{ijk}$  se van a utilizar con posterioridad simplemente al objeto de tener en cuenta la influencia del nivel de congestión en los vehículos sobre los tiempos de acceso y salida de pasajeros en las paradas (es decir, a efectos de calcular variables de operación), resulta más apropiado el primero de los planteamientos.

Más allá de las expresiones teóricas plasmadas en la ecuación 8.14, la obtención de los valores de las variables  $D_{avl}^{*}_{ijk}$  y  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  se realiza mediante la serie de ecuaciones comprendidas entre la 8.15.a.i y 8.15.b.ii. Se trata de expresiones desarrolladas al aplicar, sobre la base teórica de la ecuación 8.14, la hipótesis simplificadora de que el número de pasajeros a bordo en los distintos puntos o 'secciones diferenciales' del recorrido de la línea se distribuye o reparte linealmente (sin importar, a estos efectos, el orden físico de dichas secciones) entre la sección de máxima demanda y la sección que soporte un menor número de viajeros a bordo de los vehículos. Además, en aquellos casos en los que el coeficiente  $\delta_{ijk}$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea) sea menor de 0.5, esta hipótesis de reparto lineal entre máximo y mínimo conlleva la existencia teórica de uno o más puntos o secciones en los que el número de pasajeros a bordo sea nulo, razón por la cual el cálculo de la variable  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  (o  $D_{avl}^{*}_{ijk}$ ) presenta una formulación diferenciada para dichos casos.

En síntesis, las variables  $D_{avl}^{*}_{ijk}$  y  $D_{avl}^{ms}_{ryijk}$  se calculan de acuerdo a las expresiones indicadas a continuación para el año base y para los posteriores módulos de cálculo, respectivamente.

**Para el año base**

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$ :

$$D_{avl}^{*}_{ijk} = \min \left\{ \frac{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot Hs^*_{ijk}}}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}, 1 \right\} \cdot \left( 1 - \min \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1 - \delta_{ijk}}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot Hs^*_{ijk}}} \right\} \right) \cdot Dmls^*_{ijk} \quad (8.15.a.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$ :

$$DavI^*_{ijk} = \left( 1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot HS^*_{ijk}} \right) \cdot \delta_{ijk} \cdot Dmls^*_{ijk} \quad (8.15.a.ii)$$

donde los subíndices  $(i,j,k)$  de las ecuaciones 8.15.a.i y 8.15.a.ii adoptan los siguientes valores:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$ :

$$DavI^{ms}_{ryijk} = \min \left\{ \frac{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}}}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}, 1 \right\} \cdot \left( 1 - \min \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1 - \delta_{ijk}}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}}} \right\} \right) \cdot Dmls^{ms}_{ryijk} \quad (8.15.b.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$ :

$$DavI^{ms}_{ryijk} = \left( 1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}} \right) \cdot \delta_{ijk} \cdot Dmls^{ms}_{ryijk} \quad (8.15.b.ii)$$

En este par de ecuaciones (8.15.b.i y 8.15.b.ii) se particulariza el intervalo genérico  $h$  de la siguiente forma, según el tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h^{ms}_{ryijk} \equiv Hb^{ms}_{ryijk}$
- Bucles de tipo B:  $h^{ms}_{ryijk} \equiv Hs^{ms}_{ryijk}$

Además, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.15.b.i y 8.15.b.ii han de tomar los mismos valores que en el caso de la variable  $Dmls^{ms}_{ryijk}$  (véase ecuación 8.13.b).

Por otra parte, en la Figura 8.3 se muestra, a título de ejemplo, la comparación entre los resultados obtenidos para la densidad de pasajeros de pie a lo largo de la línea ( $DavI$ ) —utilizando para ello diferentes valores del coeficiente  $\delta$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea)— y la densidad en la sección de máxima demanda ( $Dmls$ ). Dichos resultados se representan en función del volumen horario de pasajeros en la sección de máxima demanda ( $PM$ ), mientras que los restantes datos utilizados para configurar esta gráfica han sido:  $h = 6$  min;  $CAPu = 110$  (plazas);  $Nse = 42$  (plazas);  $Dref = 4$  prs/m<sup>2</sup>;  $\delta = 0.40, 0.60$  y  $0.80$ . De nuevo, a efectos de representar con mayor claridad el incremento de la densidad con el aumento del volumen de pasajeros, se ha mantenido fijo el intervalo  $h$  para la realización de esta gráfica.

Por último, en la Figura 8.4 se representa gráficamente la densidad de pasajeros de pie media a lo largo de la línea en función tanto del volumen horario de pasajeros  $PM$  en la sección de máxima demanda como del coeficiente de compacidad  $\delta$ . El resto de parámetros utilizados mantienen los mismos valores que también se emplearon para la figura precedente ( $h = 6$  min;  $CAPu = 110$  (plazas);  $Nse = 42$  (plazas);  $Dref = 4$  prs/m<sup>2</sup>).

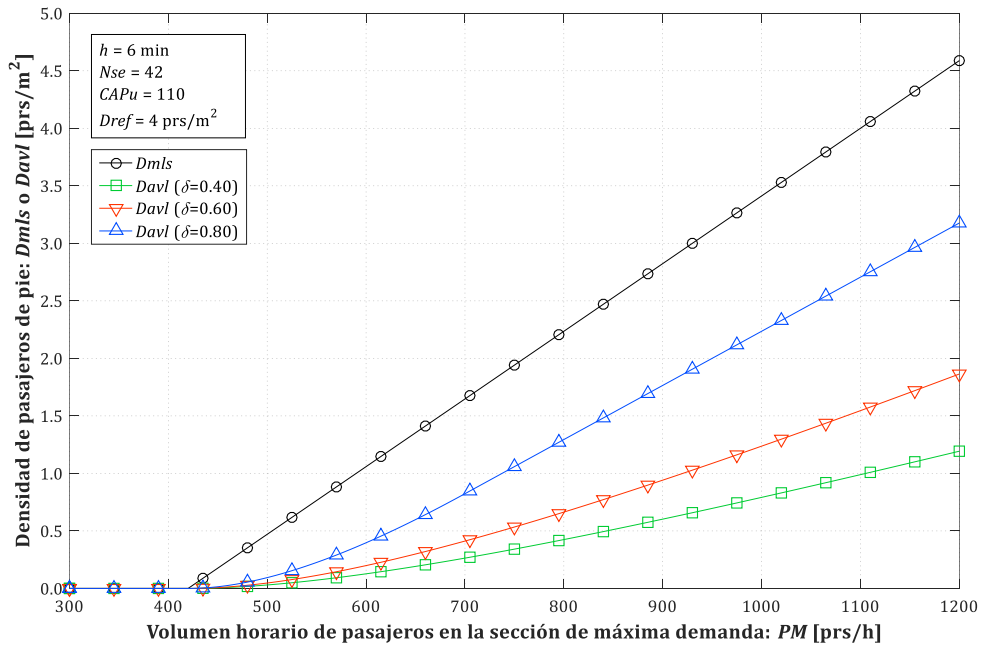


Figura 8.3. Ejemplo de comparación entre la densidad de pasajeros de pie media a lo largo de la línea (con diferentes valores del coeficiente  $\delta$ ) y en la sección de máxima demanda, en función del volumen horario de pasajeros (en la S.M.D.) y con un intervalo fijo entre vehículos.

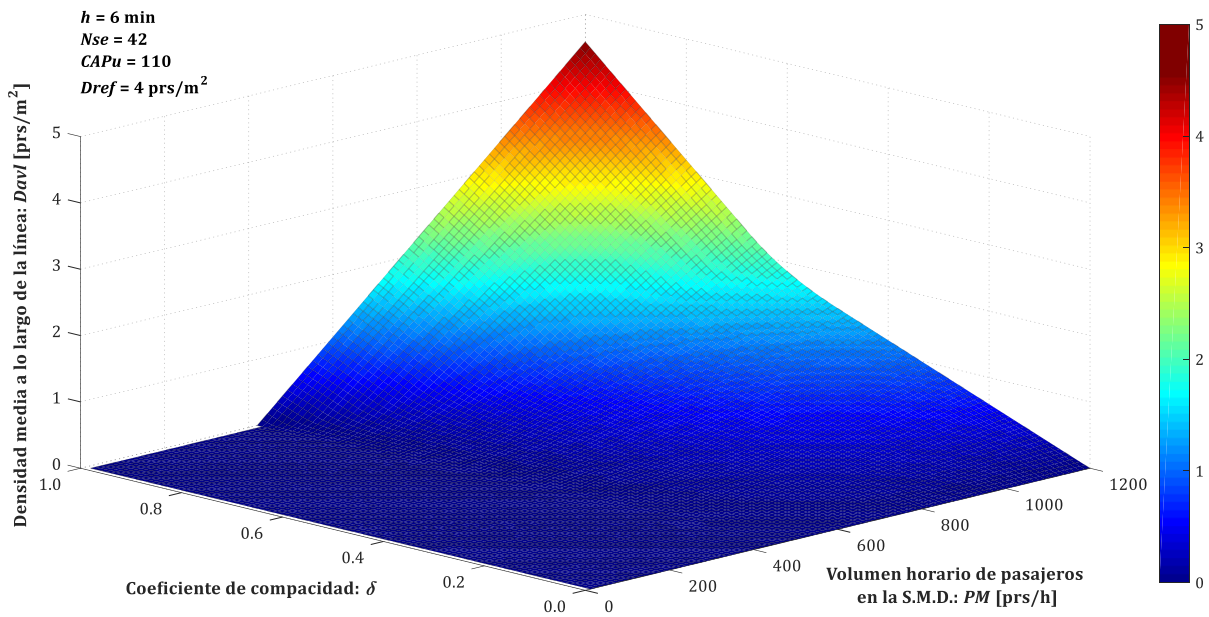


Figura 8.4. Ejemplo de cálculo de la densidad de pasajeros de pie media a lo largo de la línea en función del volumen horario de pasajeros en la sección de máxima demanda y del coeficiente de capacidad  $\delta$ , dado un intervalo fijo entre vehículos.

### 8.3.3. Intensidad de tráfico mixto

A continuación se incorporan dos variables relacionadas con la intensidad de utilización, por parte del tráfico general o mixto, del vial o viales de circulación correspondientes al corredor, eje o itinerario de cada una de las líneas de transporte público objeto de análisis. La primera de ellas cuantifica, en unidades homogéneas, el volumen (o demanda) de tráfico mixto que circula sobre dichos viales (o que al menos pretende utilizarlos, si se refiere al concepto de demanda) por unidad de tiempo (una hora como

período de referencia). Por su parte, la segunda variable pone en relación dicho volumen horario con la capacidad representativa de la vía.

### 8.3.3.1. Volumen horario (o demanda) de tráfico mixto expresado en automóviles ligeros equivalentes

La variable  $IMT_{ryjk}^s$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el volumen horario medio (o intensidad horaria) de tráfico mixto promediado a lo largo del vial o viales de circulación que sirven de base al corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación. Para el año base se define su variable equivalente  $IMT_{ryjk}^*$ , en la cual se prescinde de los índices innecesarios relativos al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

La unidad utilizada para la cuantificación de las variables  $IMT_{ryjk}^s$  e  $IMT_{ryjk}^*$  son automóviles ligeros equivalentes (PCE, siglas en inglés de 'Passenger Car Equivalent') por hora [PCE/h], para cada sentido de viaje. Este tipo de unidad homogeneiza los efectos o impactos sobre las variables de tráfico de los diversos tipos de vehículos que pueden componer la circulación.

Nótese que en la definición de estas variables se han utilizado los términos 'volumen horario o intensidad de tráfico' ya que, generalmente, este volumen será inferior a la capacidad última de la vía (nivel de servicio E), de tal forma que esta será capaz de absorber la circulación de todo el volumen de tráfico demandado. No obstante, a efectos de modelización de la demanda de viajes no se debe excluir la posibilidad teórica de que el volumen de tráfico demandado pueda superar la capacidad de la vía, de tal forma que el ratio Volumen/Capacidad sería mayor que 1.0 (Martin y McGuckin, 1998: p. 94). Bajo estas condiciones de sobrecarga, sería más apropiado referirse a tráfico pretendiendo o intentando usar la vía (NCHRP, 2012: p. 73), o, de forma más general, demanda de tráfico mixto (que trasladada a una situación real, al no poder ser absorbida en su totalidad por la capacidad de la vía, daría lugar a formación de colas o retenciones prolongadas).

En cualquier caso, esta medida de tráfico ha de incluir la circulación, en el viario habilitado para tráfico mixto, de diferentes tipos de vehículos, en función del escenario y del año analizado. En todas las situaciones se debe incluir la circulación de automóviles particulares y de motos o ciclomotores que, en uno u otro caso, realicen viajes con origen o destino dentro del ámbito territorial o área de captación servida por la línea en estudio. Además, se debe incorporar el efecto sobre el tráfico de la proporción de vehículos que circulan realizando viajes que atraviesan el viario en estudio pero tienen ambos extremos fuera de dicha zona de influencia o de posible captación (viajes pasantes, 'through trips' o viajes E-E). Recuérdese que dentro de estos viajes pasantes se están incluyendo, de forma conjunta (a través del concepto de automóvil ligero equivalente), los efectos sobre las variables de tráfico de distintos tipos de vehículos tales como automóviles, motos o ciclomotores, autobuses de otras líneas independientes de las analizadas que puedan hacer uso parcial del mismo viario e incluso, si fuese el caso, vehículos pesados de mercancías. Por otra parte, en cuanto a los vehículos de transporte público que prestan servicio en la línea en estudio, se debe tener en cuenta que solo deberá añadirse su circulación en aquellas situaciones en las que el servicio sea operado mediante autobús convencional en tráfico mixto (es decir, en todo el escenario 'O' y durante las fases de implantación de los nuevos sistemas de transporte público en los escenarios 'R' y 'B', lo cual, a nivel de procesos de cálculo, se traduce en los módulos M-00, M-R0 y M-B0, además de en el año base). En el resto de situaciones, al estar ya en servicio el nuevo sistema de transporte público con operación en plataforma reservada, no se debe añadir su circulación al flujo de tráfico mixto.

El cálculo de la aportación de cada uno de los tipos de tráfico al volumen total de automóviles ligeros equivalentes que circulan en tráfico mixto por alguna de las secciones del vial o viales analizados se efectúa según las siguientes premisas:

- En el caso de los automóviles particulares, simplemente se ha de dividir el volumen de viajes por hora realizados mediante dicho modo ( $q_{ijk}^{*C}$  en el año base o  $q_{ryijk}^{CS}$  en los demás casos) entre la tasa de ocupación (número medio de personas por vehículo) correspondiente a automóvil particular ( $OCc_{rijk}^*$  u  $OCc_{ryijk}$ ). Debido a que el tipo de vehículo que se incluye en este punto coincide directamente con la unidad en la que se expresan las variables  $IMT_{ryijk}^s$  e  $IMT_{rijk}^*$ , no es necesario aplicar ningún factor de conversión a automóviles ligeros equivalentes.
- Para las motos o ciclomotores, análogamente al caso anterior, se divide el volumen de viajes por hora en dicha modalidad de transporte (es decir,  $q_{ijk}^{*M}$  o  $q_{ryijk}^{MS}$ ) entre la tasa de ocupación o número de personas por vehículo correspondiente a moto o ciclomotor ( $OCm_r$ ). En este caso se aplica además el factor de conversión  $EFm_r$  entre vehículos de tipo moto o ciclomotor y automóviles ligeros equivalentes (es decir, el número de automóviles ligeros a los que equivale cada moto o ciclomotor a efectos de computar su incidencia sobre las variables de tráfico).
- En el caso de los autobuses de la línea en estudio, el número de vehículos por hora en circulación en un determinado sentido viene dado directamente por la frecuencia de operación (autobuses/hora) en dicha línea, la cual es equivalente al inverso del intervalo expresado en horas. Sobre dicha frecuencia se ha de aplicar el factor de conversión  $EFb_{rik}$  entre vehículos de tipo autobús y automóviles ligeros equivalentes (PCEs por cada autobús).
- Finalmente, en cuanto a los vehículos que circulan realizando viajes pasantes, se asume, de acuerdo al planteamiento propuesto para la definición de la variable  $EEVC_{rijk}$ , que el volumen horario de automóviles ligeros equivalentes que dichos viajes representan se mantiene proporcional a la capacidad de la vía para tráfico rodado mixto ( $CMT_{rik}^*$  o  $CMT_{ryijk}^s$ ), donde dicho factor de proporcionalidad viene dado precisamente por la variable  $EEVC_{rijk}$ .

No obstante, debe tenerse en cuenta a continuación que los cálculos indicados en los párrafos precedentes hacen referencia al número total (por hora) de automóviles ligeros equivalentes que circulan en tráfico mixto por alguna de las secciones del vial o viales objeto de análisis, pero las variables buscadas ( $IMT_{rijk}^*$  o  $IMT_{ryijk}^s$ ) pretenden representar el volumen horario o intensidad de tráfico mixto promediado a lo largo de dicho vial. Por tanto, para calcular esta intensidad promediada es necesario repartir el número de kilómetros recorridos por los vehículos correspondientes (o más exactamente el número de PCE-km) entre la longitud del vial o viales que resulta de interés para el modelo <sup>191</sup>, la cual se asimila en este caso a la longitud de la línea de transporte público bajo análisis (es decir,  $L_i$ ). Para los vehículos motorizados de transporte privado o particular (es decir, automóviles y motos o ciclomotores), la longitud media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario sensiblemente coincidente con la línea de transporte público viene dada por la variable  $Ltpr_{rijk}$ . Por tanto, es necesario multiplicar la cantidad de automóviles ligeros equivalentes en circulación correspondiente a estas dos categorías por dicha longitud  $Ltpr_{rijk}$  y dividirla entre la longitud del vial o viales de interés para el modelo ( $L_i$ ). En cambio, para los autobuses de la línea en estudio no es necesario aplicar ningún factor adicional, ya que evidentemente estos recorren la longitud completa correspondiente a dicha línea. Tampoco se aplica ningún factor de reparto en el caso de los vehículos que realizan viajes pasantes, ya que, debido a las características propias de este tipo de viajes (viajes E-E o 'through trips'), la opción más congruente es asumir que recorren la longitud completa del vial o viales al atravesar la zona de estudio.

Por tanto, el cálculo de las variables  $IMT_{rijk}^*$  e  $IMT_{ryijk}^s$  queda configurado, para el año base y para cada uno de los posteriores módulos de cálculo, según las expresiones indicadas a continuación.

<sup>191</sup> Al respecto, se asume simplemente un reparto uniforme de la circulación de estos vehículos (PCE-km) entre la longitud de vial analizada.

Para el año base

$$IMT_{ryjk}^* = \left( \frac{q_{ijk}^{*C}}{OCc_{ryjk}^*} + EFm_r \cdot \frac{q_{ijk}^{*M}}{OCm_r} \right) \cdot \frac{Ltp_{ryjk}}{L_i} + EFb_{rik} \cdot \frac{60}{Hs_{ijk}^*} + EEVC_{ryjk} \cdot CMT_{rik}^* \quad (8.16.a)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0

$$IMT_{ryjk}^s = \left( \frac{q_{ryijk}^{Cs}}{OCc_{ryijk}} + EFm_r \cdot \frac{q_{ryijk}^{Ms}}{OCm_r} \right) \cdot \frac{Ltp_{ryijk}}{L_i} + EFb_{rik} \cdot \frac{60}{h_{ryijk}^{0s}} + EEVC_{ryjk} \cdot CMT_{ryik}^s \quad (8.16.b)$$

donde el intervalo genérico  $h$  se debe particularizar, según el tipo de bucle iterativo en ejecución, de la siguiente forma:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hb_{ryijk}^{0s}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hs_{ryijk}^{0s}$

En cuanto a los índices  $(r,s,y,i,j,k)$  de la ecuación 8.16.b, se han de tomar las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-R1, M-R2, M-R3, M-B1, M-B2 y M-B3

$$IMT_{ryijk}^s = \left( \frac{q_{ryijk}^{Cs}}{OCc_{ryijk}} + EFm_r \cdot \frac{q_{ryijk}^{Ms}}{OCm_r} \right) \cdot \frac{Ltp_{ryijk}}{L_i} + EEVC_{ryjk} \cdot CMT_{ryik}^s \quad (8.16.c)$$

donde los índices adoptan los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.3.2. Ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto

La variable  $VCR_{ryijk}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$  y para el año  $y$  en el escenario  $s$ , el ratio o cociente entre el volumen horario (o, en su caso, demanda horaria) de tráfico mixto promediado a lo largo del vial o viales de circulación que sirven de soporte al corredor, eje o itinerario de la línea  $i$ , analizado durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , y la capacidad última representativa de dicho



vial o viales. Análogamente se define, para el año base, su variable equivalente  $VCR^*_{rijk}$ , en la que se omiten los índices innecesarios, correspondientes a escenario (s) y año (y).

Las variables  $VCR^s_{ryijk}$  y  $VCR^*_{rijk}$  son de tipo adimensional y representan un indicador cuantitativo del grado de congestión existente en la circulación en tráfico mixto en los viales objeto de estudio. Lógicamente, este índice puede variar entre un mínimo de 0 (ausencia total de tráfico) y —al menos teóricamente— un máximo no definido (mayor de 1.0), ya que, tal como se explicó anteriormente para las variables  $IMT^s_{ryijk}$  e  $IMT^*_{rijk}$ , el cálculo de la demanda debe contemplar la posibilidad de que el volumen de tráfico mixto demandado pueda superar la capacidad de la vía.

El cómputo de las variables  $VCR^s_{ryijk}$  y  $VCR^*_{rijk}$  es inmediato: basta con dividir, en cada posible situación, el volumen horario o intensidad de tráfico mixto calculado anteriormente ( $IMT^*_{rijk}$  o  $IMT^s_{ryijk}$ ) entre la capacidad última representativa de la vía ( $CMT^*_{rik}$  o  $CMT^s_{ryijk}$ ). Se obtienen de este modo las expresiones que se indican a continuación.

**Para el año base**

$$VCR^*_{rijk} = \frac{IMT^*_{rijk}}{CMT^*_{rik}} \quad (8.17.a)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$VCR^s_{ryijk} = \frac{IMT^s_{ryijk}}{CMT^s_{ryijk}} \quad (8.17.b)$$

donde se han de tomar las siguientes combinaciones de índices:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.4. Obtención de la velocidad media de operación del transporte público

#### 8.3.4.1. Tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en las condiciones previstas de densidad

La variable  $pst^{ms}_{ryijk}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo medio consumido por cada pasajero y canal de paso en los movimientos de entrada o salida al/del vehículo de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dada la operación, en el año  $y$  y en el escenario  $s$ , del respectivo modo  $m$  de transporte público, con las condiciones de densidad media de pasajeros de pie que le correspondan a dicha situación. Constituye una medida promediada del tiempo empleado en cada movimiento en que un pasajero cruza una de las puertas exteriores del vehículo de transporte público, ya sea entrando o saliendo del mismo, e independientemente de que las subidas o bajadas se puedan

producir simultáneamente a través de varios canales de paso (secciones unitarias por las que se da cabida al flujo de entrada o salida de una única fila o hilera de usuarios), ya que los ajustes pertinentes para el cálculo del tiempo total de detención en paradas o estaciones se aplican posteriormente. Por tanto, se trata de una variable con un significado análogo al ‘tiempo individual de servicio al pasajero’ o ‘*individual passenger service time*’ en el sentido en el que este es empleado por el ‘*Transit Capacity and Quality of Service Manual*’ (TCRP, 2013: pp. 6.6-6.8, 6.68)<sup>192</sup>, aunque sin efectuar al respecto una distinción explícita entre tiempos de acceso y de salida. También se puede considerar comparable por su significado al concepto de tiempo marginal de parada o estación por pasajero embarcado o apeado (*marginal dwell time per boarding/alighting passenger*) tal como este se define por Ceder (2007: pp. 531-533), aunque insistiendo de nuevo en que, para la presente formulación, debido a su enfoque agregado en relación con las paradas, no se realiza la diferenciación específica entre tiempos de acceso y de salida en cada parada individual.

Para el caso singular del año base se define la variable  $pst^*_{rijk}$ , de significado equivalente a la anterior pero con la omisión de los índices innecesarios para dicho caso particular, siendo estos los correspondientes a modo ( $m$ ), escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).

Las unidades utilizadas en la presente formulación para las variables  $pst^{ms}_{ryijk}$  y  $pst^*_{rijk}$  son segundos por persona [s/prs].

El cálculo de las variables  $pst^{ms}_{ryijk}$  y  $pst^*_{rijk}$  se basa simplemente en que al tiempo medio por persona por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en condiciones de ausencia de congestión en el interior del vehículo<sup>193</sup> (variable  $pstn^m_{rijk}$ , con valores aleatorios distribuidos de acuerdo a datos de entrada) se le añade un incremento de tiempo ( $pstd^{ms}_{ryijk}$  o  $pstd^*_{rijk}$ ) que incorpora la influencia de la densidad de pasajeros de pie sobre el tiempo empleado por cada pasajero para el acceso o salida del vehículo de transporte público. Nótese que este tiempo adicional, aunque se define posteriormente en el texto de este epígrafe, requiere ser calculado con anterioridad a  $pst^{ms}_{ryijk}$  o  $pst^*_{rijk}$  en la ejecución secuencial del modelo.

La existencia de una influencia perjudicial de las condiciones de congestión a bordo de los vehículos de transporte público sobre los tiempos de acceso y salida de pasajeros es reconocida, por ejemplo, por TCRP (2013: pp. 3.23-3.24, 6.6). Se asocia dicha influencia con causas tales como una mayor dificultad de circulación de los pasajeros en el interior del vehículo —cuando estos acceden o se disponen a salir— a medida que sea menor la separación existente entre viajeros de pie, así como con el mayor tiempo que los pasajeros que acceden necesitan para dejar libre la zona de pago de la tarifa o validación de billete, bono o tarjeta.

La obtención de las variables  $pst^*_{rijk}$  y  $pst^{ms}_{ryijk}$  responde a las expresiones que a continuación se detallan.

**Para el año base**

$$pst^*_{rijk} = pstn^0_{rijk} + pstd^*_{rijk} \tag{8.18.a}$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

<sup>192</sup> Para los modos de tipo ferroviario, el ‘*Transit Capacity and Quality of Service Manual*’ utiliza en cambio el término tiempo de flujo (*flow time* o *time per passenger per single stream*) para referirse al concepto equivalente (TCRP, 2013: p. 8.24).

<sup>193</sup> Se ha considerado que el incremento del tiempo individual de acceso o salida causado a consecuencia de la densidad media de pasajeros de pie es nulo siempre que esta no supere 0.5 prs/m<sup>2</sup>, por lo que a estos efectos se admitirían como condiciones de ausencia de congestión cualesquiera con una densidad inferior a dicha cifra.

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$pstd_{ryijk}^{ms} = pstr_{rijk}^m + pstd_{ryijk}^{ms} \quad (8.18.b)$$

donde los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  deben adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Así pues, en la ecuación 8.18.b,  $pstd_{ryijk}^{ms}$  se define, para la simulación aleatoria  $r$ , como el incremento de tiempo a añadir sobre el tiempo medio por persona y movimiento de entrada o salida al/del vehículo de transporte público obtenido en condiciones de ausencia de congestión en el interior del mismo, al objeto de incorporar sobre dicho tiempo el efecto adicional de ralentización de tales procesos generado por la densidad media de pasajeros de pie realmente prevista a lo largo de la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dada la operación, en el año  $y$  y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Por su parte, en la ecuación 8.18.a, se emplea para el año base su variable equivalente  $pstd_{rijk}^*$ , en la que se prescinde, por innecesarios, de los índices relativos a modo ( $m$ ), escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ). Congruentemente, las unidades utilizadas para las variables  $pstd_{ryijk}^{ms}$  y  $pstd_{rijk}^*$  son segundos por persona [s/prs].

A la hora de establecer las pautas para dar valores a las variables  $pstd_{ryijk}^{ms}$  o  $pstd_{rijk}^*$ , el 'Transit Capacity and Quality of Service Manual' (TCRP, 2013: p. 6.7, Exhibit 6.4) indica, como una primera orientación, que cuando en el vehículo se da la presencia de viajeros de pie (sin hacer ninguna referencia a una densidad en particular) se añadan 0.5 s/prs al tiempo de servicio al pasajero, aunque únicamente para los movimientos de acceso. Sin embargo, este criterio no permite graduar la magnitud de este incremento de tiempo en función de la mayor o menor densidad de pasajeros de pie que se esté produciendo, a pesar de que parece evidente que la intensidad del efecto de ralentización difiere bastante entre una situación de muy baja densidad, con pasajeros de pie muy dispersos, y otra de saturación. Por tanto, a continuación se propone una formulación que incluya la progresión de dicho incremento a medida que aumente la densidad de pasajeros de pie. Al respecto, como variable independiente se adopta la densidad media a lo largo de la línea  $Davl_{ryijk}^{ms}$  (o  $Davl_{ijk}^*$ ) y no la densidad en la sección de máxima demanda  $Dmls_{ryijk}^{ms}$  o  $Dmls_{ijk}^*$ , ya que la primera es más representativa de las condiciones medias que se dan en el vehículo en los distintos puntos de acceso o salida de pasajeros (paradas o estaciones a lo largo del recorrido de la línea) <sup>194</sup>.

En primer lugar, el criterio aquí adoptado considera que el tiempo medio por pasajero para acceso o salida al/del vehículo de transporte público únicamente comienza a aumentar por causa del efecto de

<sup>194</sup> No obstante, esta elección tampoco conduce a un procedimiento exacto, ya que la ausencia de ponderación de las densidades existentes en el vehículo en cada parada según el número de viajeros a los que afecta en su entrada o salida, junto con la no linealidad de la relación entre la densidad y el incremento de tiempo por persona, introducen un cierto sesgo de agregación.

entorpecimiento en la entrada y/o salida del usuario a partir de que la densidad de pasajeros de pie alcance un valor de 0.5 prs/m<sup>2</sup>. Por tanto, para aquellas condiciones en las que la densidad  $Davl_{ryijk}^{ms}$  (o  $Davl_{ijk}^*$  en el año base) sea inferior a 0.5 prs/m<sup>2</sup>, a la variable  $pstd_{ryijk}^{ms}$  (o  $pstd_{rijk}^*$ ) se le asignará directamente un valor nulo.

Por el contrario, para aquellas condiciones en las que la densidad  $Davl_{ryijk}^{ms}$  (o  $Davl_{ijk}^*$ ) sea superior a 0.5 prs/m<sup>2</sup>, el valor de la variable  $pstd_{ryijk}^{ms}$  (o  $pstd_{rijk}^*$ ) se obtiene según una distribución triangular de probabilidad a partir del valor aleatorio  $TRpstd_{rijk}$ , el cual procede, a su vez, de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda 1/2) de la cual se extrajeron previamente los respectivos valores numéricos (epígrafe 6.4.2.1). Por su parte, la moda y los límites mínimo y máximo de la distribución triangular final responden a funciones cuadráticas dependientes de la densidad  $Davl_{ryijk}^{ms}$  (o  $Davl_{ijk}^*$ ), planteadas de tal forma que sean crecientes con dicha densidad y que su derivada sea también creciente (esta última condición equivale a que la contribución marginal de cada pasajero adicional a la ralentización de las operaciones de acceso y/o salida aumenta con la densidad existente). Además, se impone la continuidad de las funciones y de su primera derivada en el punto de enlace con la recta horizontal cuyo dominio son las densidades inferiores a 0.5 prs/m<sup>2</sup> (o, dicho de otro modo, la ralentización marginal ocasionada por el primer pasajero por encima de 0.5 prs/m<sup>2</sup> sería nula en términos diferenciales).

Se obtienen, bajo estas premisas, el conjunto de expresiones generales que se incluyen a continuación, las cuales implican la aplicación de la función de transformación triang<sup>II</sup> (recuérdese la definición matemática de la misma en el epígrafe 6.2.2.3.b).

**Para el año base**

Si  $Davl_{ijk}^* \leq 0.5$  prs/m<sup>2</sup> :

$$pstd_{rijk}^* = 0.0 \tag{8.19.a.i}$$

Si  $Davl_{ijk}^* > 0.5$  prs/m<sup>2</sup> :

$$pstd_{rijk}^* = \text{triang}^{II} \left( TRpstd_{rijk} \mid pstdmin_{ijk}^*, pstdmax_{ijk}^*, pstdmod_{ijk}^* \right) \tag{8.19.a.ii}$$

donde:

$$pstdmod_{ijk}^* = Kmd2_{PSTD} \cdot (Davl_{ijk}^*)^2 + Kmd1_{PSTD} \cdot Davl_{ijk}^* + Kmd0_{PSTD} \tag{8.19.a.iii}$$

$$pstdmin_{ijk}^* = Kmn2_{PSTD} \cdot (Davl_{ijk}^*)^2 + Kmn1_{PSTD} \cdot Davl_{ijk}^* + Kmn0_{PSTD} \tag{8.19.a.iv}$$

$$pstdmax_{ijk}^* = Kmx2_{PSTD} \cdot (Davl_{ijk}^*)^2 + Kmx1_{PSTD} \cdot Davl_{ijk}^* + Kmx0_{PSTD} \tag{8.19.a.v}$$

Por su parte, los subíndices  $(r, i, j, k)$  adoptan en las ecuaciones 8.19.a.i a 8.19.a.v los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $Davl_{ryijk}^{ms} \leq 0.5$  prs/m<sup>2</sup> :

$$pstd_{ryijk}^{ms} = 0.0 \tag{8.19.b.i}$$

Si  $Davl_{ryijk}^{ms} > 0.5$  prs/m<sup>2</sup> :

$$pstd_{ryijk}^{ms} = \text{triang}^{II} \left( TRpstd_{rijk} \mid pstdmin_{ryijk}^{ms}, pstdmax_{ryijk}^{ms}, pstdmod_{ryijk}^{ms} \right) \tag{8.19.b.ii}$$

donde:

$$pstdmod_{ryijk}^{ms} = Kmd2_{PSTD} \cdot (Davl_{ryijk}^{ms})^2 + Kmd1_{PSTD} \cdot Davl_{ryijk}^{ms} + Kmd0_{PSTD} \quad (8.19.b.iii)$$

$$pstdmin_{ryijk}^{ms} = Kmn2_{PSTD} \cdot (Davl_{ryijk}^{ms})^2 + Kmn1_{PSTD} \cdot Davl_{ryijk}^{ms} + Kmn0_{PSTD} \quad (8.19.b.iv)$$

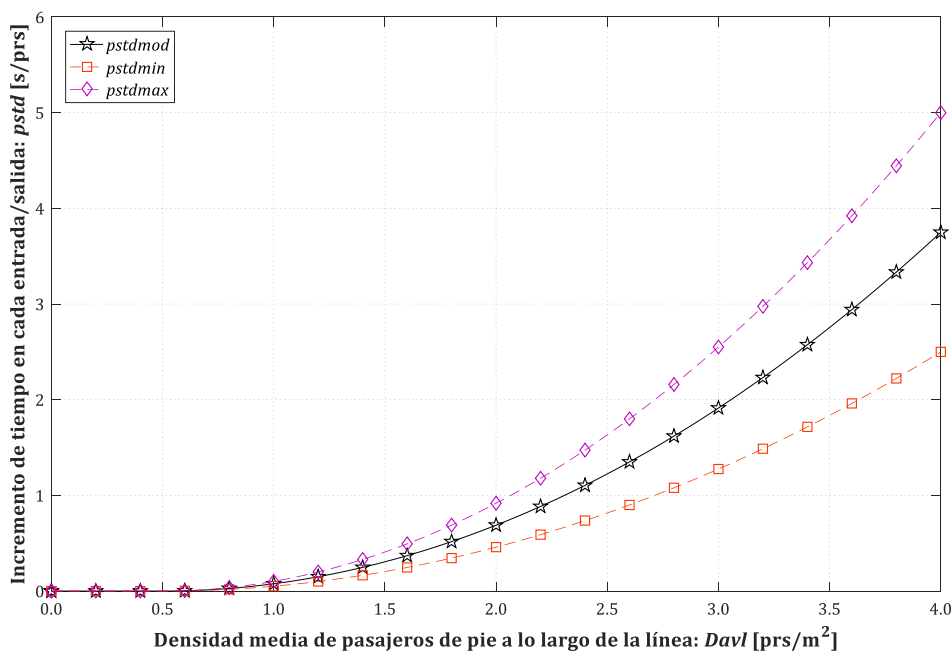
$$pstdmax_{ryijk}^{ms} = Kmx2_{PSTD} \cdot (Davl_{ryijk}^{ms})^2 + Kmx1_{PSTD} \cdot Davl_{ryijk}^{ms} + Kmx0_{PSTD} \quad (8.19.b.v)$$

En el caso de las ecuaciones 8.19.b.i a 8.19.b.v los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  adoptan de nuevo los mismos valores que ya fueron señalados para el cálculo de la variable  $pst_{ryijk}^{ms}$  en la ecuación 8.18.b.

A efectos de aplicación práctica en la modelización, los valores numéricos propuestos en esta tesis para los coeficientes de las ecuaciones 8.19.a.iii a 8.19.a.v y 8.19.b.iii a 8.19.b.v se indican en la Tabla 8.1. Asimismo, en la Figura 8.5 se muestran gráficamente las funciones resultantes de aplicar estos coeficientes al cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares en base a las cuales se obtienen los valores de los incrementos  $pstd$  y  $pstd^*$  en el tiempo por pasajero.

**Tabla 8.1.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los incrementos por congestión en el tiempo medio por movimiento de entrada o salida de pasajero ( $pstd$  o  $pstd^*$ ).

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd2_{PSTD} = 3.061224 \cdot 10^{-1}$	$Kmd1_{PSTD} = -3.061224 \cdot 10^{-1}$	$Kmd0_{PSTD} = 7.653061 \cdot 10^{-2}$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2_{PSTD} = 2.040816 \cdot 10^{-1}$	$Kmn1_{PSTD} = -2.040816 \cdot 10^{-1}$	$Kmn0_{PSTD} = 5.102041 \cdot 10^{-2}$
<b>Máximo</b>	$Kmx2_{PSTD} = 4.081633 \cdot 10^{-1}$	$Kmx1_{PSTD} = -4.081633 \cdot 10^{-1}$	$Kmx0_{PSTD} = 1.020408 \cdot 10^{-1}$



**Figura 8.5.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los incrementos en el tiempo medio por movimiento de entrada o salida de usuario del transporte público en función de la densidad media de pasajeros de pie a lo largo de la línea.

Obsérvese que, con las funciones propuestas y los valores de los coeficientes presentados en la Tabla 8.1, el tiempo añadido de 0.5 s/prs indicado por TCRP (2013: p. 6.7, *Exhibit 6.4*) correspondería a una densidad media  $Davl$  (o  $Davl^*$ ) comprendida entre un mínimo de 1.61 prs/m² y un máximo de 2.07 prs/m², con moda en 1.78 prs/m². Se trata por tanto de valores intermedios dentro del rango usual de

variación de la densidad de pasajeros de pie en el interior de los vehículos, si se tiene en cuenta el habitual límite superior de confort admisible de 4 prs/m<sup>2</sup> —no obstante, en Estados Unidos, de donde es originaria la referencia anteriormente mencionada, suelen considerarse límites superiores más reducidos (Ceder, 2007: p. 10).

### 8.3.4.2. Demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía

La variable  $rd_{ryjk}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo medio consumido adicionalmente por el autobús convencional en tráfico mixto en cada parada entrante o parada en bahía para su reincorporación a la circulación en el carril contiguo a la parada en la ruta recorrida por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello en las condiciones del año  $y$  y del escenario  $s$ . A efectos de esta variable, la cuantía de dicho tiempo adicional se establece bajo el supuesto de que no existiese obligación (ni recomendación) para los conductores de vehículos particulares de ceder o facilitar la reincorporación a la circulación de los vehículos de transporte público desde una parada (o bien que esta norma no se respetase en ningún caso), ya que la potencial reducción del tiempo de reincorporación causada por dicha obligación o recomendación se introduce posteriormente mediante un factor específico.

Por su parte, para el caso particular del año base se define la variable equivalente  $rd_{rijk}^*$ , en la cual se omiten los índices innecesarios correspondientes a escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).

Las unidades empleadas en la formulación del modelo para las variables  $rd_{ryjk}^s$  y  $rd_{rijk}^*$  son segundos [s] por parada entrante o en bahía.

Esta demora de reincorporación (*reentry delay*) comprende el tiempo transcurrido desde que el autobús está listo para reemprender la marcha en una parada (tras completar el ‘tiempo de servicio al pasajero’ y finalizar el cierre de puertas) hasta que se efectúa la reincorporación al flujo de tráfico en el carril de circulación contiguo a la parada (aquel más a la derecha según el sentido de avance), para lo cual ha de permanecer en espera de un espacio libre entre dicho flujo de vehículos<sup>195</sup> que permita realizar tal maniobra en condiciones de seguridad (TCRP, 2013: pp. 6.71-6.72). Así pues, la demora de reincorporación es de aplicación únicamente a aquellas paradas en las que el autobús ha de desviarse o apartarse de los carriles de circulación general para dar servicio a la entrada y salida de pasajeros (*off-line stops*). Se trata por tanto de paradas de autobús con una configuración entrante o en bahía. Por otra parte, resulta evidente que la cuantía media de dicha demora ha de estar notablemente influenciada por la intensidad de tráfico que soporta el vial de circulación utilizado por la línea de autobús durante cada uno de los períodos horarios en estudio, con una relación de sentido positivo entre ambas variables.

Los valores numéricos de la variable  $rd_{ryjk}^s$  (o  $rd_{rijk}^*$  en el año base) se calculan en el modelo a través de una distribución triangular de probabilidad, cuyos sucesivos valores se obtienen (por transformación) a partir del elemento aleatorio  $TRrd_{rik}$ , que a su vez procede de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) sobre la que se generaron en su momento las correspondientes extracciones (epígrafe 6.4.2.2).

El establecimiento de los parámetros de moda, mínimo y máximo de la distribución triangular final se basa en la información que sobre la demora de reincorporación se incluye en el ‘*Transit Capacity and Quality of Service Manual*’ (TCRP, 2013: pp. 6.71-6.77). Para una determinada localización de la parada con respecto a una señal semafórica de control de tráfico (que normalmente regula una intersección a nivel), el tiempo o demora de reincorporación depende notablemente del volumen de tráfico que circula por el carril contiguo a la parada, por lo que dicho volumen aparece como un primer candidato a servir de variable independiente de las funciones que determinen los valores de la moda, el mínimo y el máximo en las distribuciones triangulares planteadas. Sin embargo, para el modelo particular

<sup>195</sup> Medido en términos de intervalo temporal entre el paso de dos vehículos consecutivos.

desarrollado en esta tesis no resulta posible tomar directamente como variable independiente el volumen de tráfico en el carril contiguo a la parada, dado que la estructura de datos establecida no considera información específica de la distribución de carriles de circulación general en las secciones de ubicación de las paradas —sino que se define únicamente la capacidad de la vía por sentido— ni tampoco se especifica ni calcula el reparto del volumen de tráfico mixto entre los carriles existentes en un determinado sentido. En su lugar, a modo de ‘proxy’ o variable independiente instrumental para establecer la relación entre volumen de tráfico y demora de reincorporación, se adopta el ratio Volumen/Capacidad del vial de circulación, ya que, dada una cierta capacidad del vial y fijado un determinado reparto del tráfico entre carriles, existe una relación lineal y directa entre dicho ratio Volumen/Capacidad y la intensidad de tráfico en el carril contiguo a la parada. Además, a efectos del cálculo de la demora de reincorporación se limitará el valor máximo del ratio Volumen/Capacidad como variable independiente a 1.0 (a diferencia del epígrafe 8.3.3), ya que en este caso la demora de reincorporación está asociada al flujo de tráfico que realmente circula por el vial (que no puede superar la capacidad última) y no al hipotético volumen de tráfico demandado en condiciones de sobrecarga, puesto que este exceso de demanda no podría materializarse en forma de aumento del flujo de vehículos.

Así pues, se establece en primer lugar la función que determine los valores mínimos de la distribución triangular, para lo que se ha tomado como referencia el tipo de localización de parada más favorable entre los contemplados por TCRP (2013: pp. 6.72-6.77) para el cálculo de la demora de reincorporación. Esta localización corresponde al denominado “Caso 1”, en el que la parada se sitúa suficientemente alejada (aproximadamente a 400 m o más) de la señal semafórica precedente y fuera también de la influencia de las posibles colas causadas por la fase roja de la siguiente señal semafórica. De esta forma, es posible asumir que el paso de los vehículos por el carril contiguo se produce de forma aleatoria y por tanto se puede estimar la demora de reincorporación como el intervalo medio entre dos huecos libres (de duración aceptable para realizar la maniobra) en la corriente de tráfico. Esta localización es la que, en condiciones normales, produce menores tiempos de reincorporación, según se desprende del ‘Exhibit’ 6.62 (p. 6.77) de dicha referencia. Por su parte, el ‘Exhibit’ 6.59 (p. 6.73), el cual se reproduce en esta tesis en la Tabla 8.2, proporciona valores calculados de la demora de reincorporación para dicho tipo de localización de parada en función de varios volúmenes de tráfico en el carril contiguo. No obstante, tal como se ha explicado anteriormente, la modelización planteada precisa utilizar como variable independiente el ratio Volumen/Capacidad (variables  $VCR_{yijk}^s$  o  $VCR_{rijk}^*$ ) del vial de circulación, por lo que para establecer la función de valores mínimos será necesario adoptar, mediante ciertas suposiciones, algún tipo de correspondencia entre ambas magnitudes. Para ello se asume la hipótesis<sup>196</sup> de que la equivalencia entre el volumen de tráfico en el carril contiguo a la parada y el ratio Volumen/Capacidad del vial venga dada a través de una capacidad de 1,000 PCE/h por carril<sup>197</sup>. La elección de esta capacidad responde, por un lado, a que de acuerdo a los valores orientativos propuestos por el ‘Highway Capacity Manual 2000’ (TRB, 2000: p. 10.10, Exhibit 10.7) para diferentes categorías de vías urbanas, la capacidad última (nivel de servicio E) no suele superar los 1,000 veh/h por carril en este tipo de vías. Por otra parte, el propio ‘Exhibit’ 6.59 (TCRP, 2013: p. 6.73) presenta como valor máximo del volumen de tráfico en el carril contiguo o adyacente la cifra de 1,000 veh/h.

<sup>196</sup> Nótese que esta hipótesis se asume exclusivamente a efectos de poder determinar justificadamente las relaciones funcionales entre el ratio Volumen/Capacidad y la demora de reincorporación del autobús convencional en tráfico mixto, por lo que no presupone, en el resto de la modelización, ninguna limitación con respecto a la capacidad real de los viales de circulación.

<sup>197</sup> Además, se asume implícitamente un reparto uniforme del volumen de tráfico entre los distintos carriles del sentido analizado, en caso de existir más de un carril por sentido.

**Tabla 8.2.** Demora media de reincorporación del autobús convencional en tráfico mixto para paradas ‘*off-line*’ situadas fuera del ámbito de influencia de señales semafóricas.

Volumen de tráfico en el carril contiguo (veh/h)	Demora media de reincorporación <sup>(a)</sup> (s)
1	0
100	1
200	2
300	2
400	3
500	4
600	5
700	6
800	8
900	10
1,000	12

<sup>(a)</sup> Se especifica que la demora de reincorporación está calculada para un hueco libre crítico de 7 s, un ‘*follow-up time*’ (tiempo requerido por un segundo bus partiendo al mismo tiempo) de 3.3 s y paradas con una sola área de embarque/desembarque.

Fuente: TCRP (2013: p. 6.73, *Exhibit* 6.59).

Una vez establecida la relación entre el volumen de tráfico en el carril contiguo y el ratio Volumen/Capacidad del vial a través de la adopción de una capacidad de referencia de 1,000 PCE/h por carril, la función de valores mínimos de la demora de reincorporación ha sido determinada mediante el ajuste de un polinomio de segundo grado a los valores que se derivan de la Tabla 8.2 (coeficiente de determinación  $R^2=0.9894$ ), habiendo impuesto además que el intercepto de la función sea cero. Esta imposición responde a que ante una situación de ausencia total de tráfico en el vial la demora de reincorporación calculada debe ser siempre nula.

Para el establecimiento de la función de valores máximos de la distribución triangular de la demora de reincorporación se ha tomado como referencia el “Caso 2” (parada en las inmediaciones de una intersección regulada semafóricamente) contemplado por TCRP (2013: pp. 6.72-6.77), concretamente el subcaso en el que la parada se sitúa tras la intersección siguiendo el sentido de circulación (*far-side stop*). Ciertamente, este no es el subcaso que conduciría a mayores tiempos de demora de reincorporación, según se aprecia en el ‘*Exhibit*’ 6.62 (p. 6.77) de la citada referencia, ya que la ubicación de una parada justo antes de la intersección semafórica (*near-side stop*) resultaría mucho más desfavorable. Sin embargo, se ha excluido este último subcaso de localización a efectos de establecer en esta tesis los valores máximos de la demora de reincorporación, ya que este tipo de ubicación podría evitarse mediante el diseño de la línea de autobús. Así pues, una vez hecha esta exclusión, se han tomado como base para la función de máximas demoras de reincorporación los valores mostrados gráficamente en dicho ‘*Exhibit*’ 6.62 (p. 6.77) para el caso denominado “*Case 2 far-side*”, adoptando —consistentemente con el procedimiento seguido para la función de valores mínimos— una capacidad de 1,000 PCE/h por carril para establecer la correspondencia entre el volumen de tráfico en el carril contiguo y el ratio Volumen/Capacidad. El ajuste de la función, mediante un polinomio de segundo grado de intercepto nulo, ha sido dividido en dos partes, separadas ambas por un valor del ratio Volumen/Capacidad igual a 0.40, en el que se ha asegurado la continuidad de la función definida por partes y de su primera derivada. Esta subdivisión se debe a que la adopción de un procedimiento análogo al de la función de valores mínimos (es decir, ajuste conjunto de todos los puntos tomados como referencia, separados entre sí por 0.10 unidades del ratio Volumen/Capacidad) conduciría, en la parte de la función próxima al origen, a incoherencias como que el polinomio de máximos presentase valores inferiores al de mínimos, incluso con valores negativos para ratios Volumen/Capacidad muy bajos. En consecuencia, la función polinómica de segundo grado para ratios Volumen/Capacidad menores a 0.40 se ha construido tomando como puntos de paso los valores correspondientes a las abscisas 0, 0.20 y 0.40. Por su parte, el polinomio de segundo grado para ratios Volumen/Capacidad mayores de 0.40 se ha determinado a



partir de los puntos de paso situados en las abscisas 0.40 (continuidad de la función con el polinomio anterior), 0.70 (valor máximo recogido en el 'Exhibit' 6.62), e imponiendo además la continuidad de la primera derivada en el punto correspondiente a la abscisa 0.40 (frontera entre ambos subdominios).

Por último, para establecer la función de valores de la moda de las distribuciones triangulares de la demora de reincorporación, simplemente se ha adoptado el criterio de que las distribuciones sean simétricas, de tal forma que la función indicativa de la moda viene dada por los puntos medios entre el mínimo y el máximo correspondientes a cada posible abscisa. Este criterio podría ser susceptible de modificación en función de que se conociesen específicamente las proporciones de paradas de las líneas de autobús convencional que se encuadrasen en cada uno de los posibles tipos de localizaciones en relación con las intersecciones y sus correspondientes señales semafóricas de control de tráfico.

Bajo esta serie de premisas, se obtienen para el cálculo de las variables  $rd_{rijk}^*$  y  $rd_{ryijk}^s$  el conjunto de expresiones generales que se especifican a continuación, en las cuales es de aplicación la función de transformación triang<sup>II</sup>.

**Para el año base**

$$rd_{rijk}^* = \text{triang}^{\text{II}}(TRrd_{rik} \mid rdmin_{rijk}^*, rdmax_{rijk}^*, rdmod_{rijk}^*) \quad (8.20.a.i)$$

donde las funciones de cálculo de  $rdmin_{rijk}^*$ ,  $rdmax_{rijk}^*$  y  $rdmod_{rijk}^*$  presentan diferentes expresiones dependiendo del subdominio en el que se encuentre el ratio Volumen/Capacidad del vial. De este modo:

Si  $VCR_{rijk}^* \leq 0.4$ :

$$rdmod_{rijk}^* = Kmd2a_{RD} \cdot (VCR_{rijk}^*)^2 + Kmd1a_{RD} \cdot VCR_{rijk}^* + Kmd0a_{RD} \quad (8.20.a.ii)$$

$$rdmin_{rijk}^* = Kmn2a_{RD} \cdot (VCR_{rijk}^*)^2 + Kmn1a_{RD} \cdot VCR_{rijk}^* + Kmn0a_{RD} \quad (8.20.a.iii)$$

$$rdmax_{rijk}^* = Kmx2a_{RD} \cdot (VCR_{rijk}^*)^2 + Kmx1a_{RD} \cdot VCR_{rijk}^* + Kmx0a_{RD} \quad (8.20.a.iv)$$

Si  $VCR_{rijk}^* > 0.4$ :

$$rdmod_{rijk}^* = Kmd2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{rijk}^*, 1\})^2 + Kmd1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{rijk}^*, 1\} + Kmd0b_{RD} \quad (8.20.a.v)$$

$$rdmin_{rijk}^* = Kmn2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{rijk}^*, 1\})^2 + Kmn1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{rijk}^*, 1\} + Kmn0b_{RD} \quad (8.20.a.vi)$$

$$rdmax_{rijk}^* = Kmx2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{rijk}^*, 1\})^2 + Kmx1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{rijk}^*, 1\} + Kmx0b_{RD} \quad (8.20.a.vii)$$

Los subíndices ( $r, i, j, k$ ) de las ecuaciones 8.20.a.i a 8.20.a.vii han de tomar los valores siguientes:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0**

$$rd_{ryijk}^s = \text{triang}^{\text{II}}(TRrd_{rik} \mid rdmin_{ryijk}^s, rdmax_{ryijk}^s, rdmod_{ryijk}^s) \quad (8.20.b.i)$$

donde las funciones encargadas del cálculo de  $rdmin_{ryijk}^s$ ,  $rdmax_{ryijk}^s$  y  $rdmod_{ryijk}^s$  adoptan distintas expresiones según el rango en el que se encuentre el ratio Volumen/Capacidad de la vía. Por tanto:

Si  $VCR_{ryijk}^s \leq 0.4$  :

$$rdmod_{ryijk}^s = Kmd2a_{RD} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^2 + Kmd1a_{RD} \cdot VCR_{ryijk}^s + Kmd0a_{RD} \quad (8.20.b.ii)$$

$$rdmin_{ryijk}^s = Kmn2a_{RD} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^2 + Kmn1a_{RD} \cdot VCR_{ryijk}^s + Kmn0a_{RD} \quad (8.20.b.iii)$$

$$rdmax_{ryijk}^s = Kmx2a_{RD} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^2 + Kmx1a_{RD} \cdot VCR_{ryijk}^s + Kmx0a_{RD} \quad (8.20.b.iv)$$

Si  $VCR_{ryijk}^s > 0.4$  :

$$rdmod_{ryijk}^s = Kmd2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{ryijk}^s, 1\})^2 + Kmd1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{ryijk}^s, 1\} + Kmd0b_{RD} \quad (8.20.b.v)$$

$$rdmin_{ryijk}^s = Kmn2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{ryijk}^s, 1\})^2 + Kmn1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{ryijk}^s, 1\} + Kmn0b_{RD} \quad (8.20.b.vi)$$

$$rdmax_{ryijk}^s = Kmx2b_{RD} \cdot (\min\{VCR_{ryijk}^s, 1\})^2 + Kmx1b_{RD} \cdot \min\{VCR_{ryijk}^s, 1\} + Kmx0b_{RD} \quad (8.20.b.vii)$$

Por su parte, los índices  $(r,s,y,i,j,k)$  de este conjunto de ecuaciones (8.20.b.i a 8.20.b.vii) deben adoptar las siguientes combinaciones de valores:

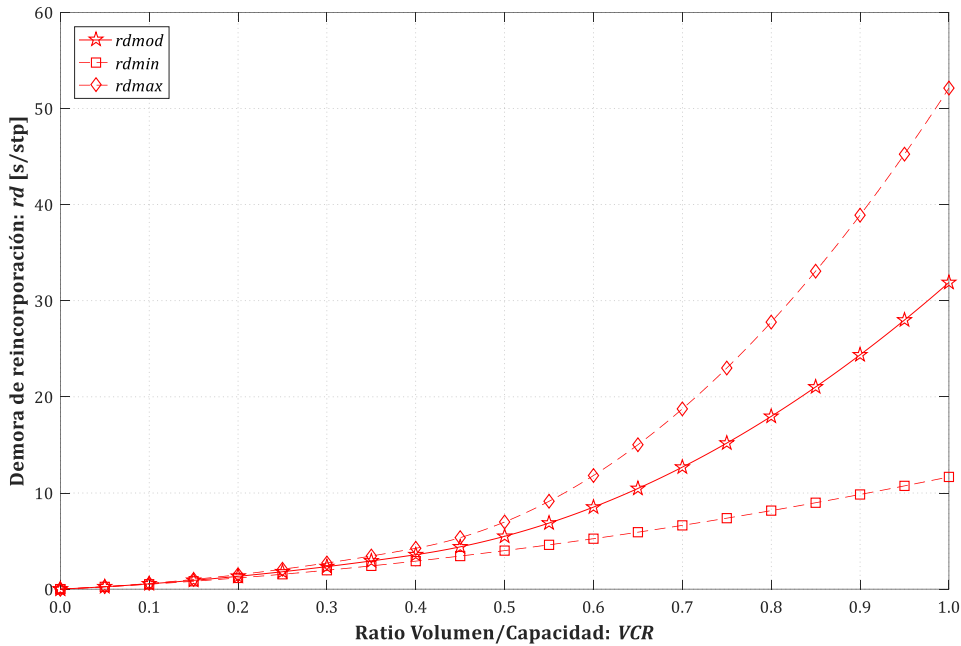
$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-RO} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

En relación con la aplicación práctica de la modelización presentada, los valores numéricos propuestos en esta tesis para los coeficientes de las ecuaciones 8.20.a.ii a 8.20.a.vii y 8.20.b.ii a 8.20.b.vii se recopilan en la Tabla 8.3. Paralelamente, en la Figura 8.6 se representan gráficamente las funciones obtenidas al aplicar dichos coeficientes al cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares utilizadas para la obtención aleatoria de valores de la demora media de reincorporación por cada parada entrante o en bahía ( $rd$  o  $rd^*$ ).

**Tabla 8.3.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto ( $rd$  o  $rd^*$ ).

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>(VCR o VCR*) ≤ 0.4</b>			
<b>Moda</b>	$Kmd2a_{RD} = 11.472606$	$Kmd1a_{RD} = 4.363650$	$Kmd0a_{RD} = 0$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2a_{RD} = 7.320212$	$Kmn1a_{RD} = 4.352300$	$Kmn0a_{RD} = 0$
<b>Máximo</b>	$Kmx2a_{RD} = 15.625000$	$Kmx1a_{RD} = 4.375000$	$Kmx0a_{RD} = 0$
<b>(VCR o VCR*) &gt; 0.4</b>			
<b>Moda</b>	$Kmd2b_{RD} = 56.090661$	$Kmd1b_{RD} = -31.330794$	$Kmd0b_{RD} = 7.138889$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2b_{RD} = 7.320212$	$Kmn1b_{RD} = 4.352300$	$Kmn0b_{RD} = 0$
<b>Máximo</b>	$Kmx2b_{RD} = 104.861111$	$Kmx1b_{RD} = -67.013889$	$Kmx0b_{RD} = 14.277778$



**Figura 8.6.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la demora de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto en función del ratio Volumen/Capacidad del vial de circulación.

### 8.3.4.3. Coeficiente para la mayoración del tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica

La variable  $\omega_{ryijk}^m$  constituye un coeficiente destinado a la mayoración del tiempo teórico total de recorrido en condiciones ideales que el modo  $m$  de transporte público en plataforma reservada (es decir, con  $m=R$  o  $m=B$ ) emplearía para efectuar el recorrido de la línea  $i$ , donde el valor de  $\omega_{ryijk}^m$  se establece, para la simulación aleatoria  $r$ , en función de las condiciones de operación (en particular, el intervalo de circulación entre vehículos o unidades de transporte) previstas para en año  $y$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dada la operación de cada uno de estos dos tipos de modos (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) en su respectivo escenario. Se trata de una variable de tipo adimensional.

La variable  $\omega_{ryijk}^m$  responde a la necesidad de incorporar las diferencias entre una teórica circulación (en plataforma reservada y con priorización semafórica para el transporte público en las intersecciones a nivel) gobernada únicamente por parámetros cinemáticos básicos (aceleración y deceleración del vehículo, máxima velocidad programada u objetivo del tramo y longitud a recorrer entre paradas) y las condiciones reales de operación, en las que dicha circulación hipotética se ve perturbada en mayor o menor medida por afecciones externas y/o limitaciones del trazado. Así pues, se tiene por un lado el tiempo teórico total de recorrido (esto es, sin incluir los tiempos de permanencia en paradas) entre las terminales o extremos de una línea en condiciones de ausencia de este tipo de interferencias y distorsiones y, por otra parte, el tiempo efectivamente empleado en realizar dicho recorrido en condiciones representativas de la explotación real (de nuevo excluyéndose los tiempos de detención en paradas, que se computan por separado). Por consiguiente, este coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  corresponde al cociente entre la velocidad media de recorrido resultante de operar el sistema con las distorsiones, interferencias o limitaciones realmente existentes, y la velocidad media de recorrido bajo las hipotéticas condiciones ideales de circulación, en las que solo se consideran las variables cinemáticas básicas. El valor de  $\omega_{ryijk}^m$  será por tanto siempre menor o igual que la unidad (en general el valor 1 será muy difícilmente alcanzable). Dado que velocidad y tiempo son inversamente proporcionales y que la función del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  dentro del modelo es mayorar el tiempo teórico total de recorrido en las condiciones ideales de circulación, a efectos de la formulación planteada  $\omega_{ryijk}^m$  deberá actuar dividiendo a este último para obtener así la estimación del tiempo de recorrido efectivamente empleado.

Los orígenes o causas de esta discordancia entre el tiempo teórico de recorrido calculado para las condiciones ideales de circulación y el tiempo efectivamente empleado en condiciones de explotación real pueden ser de diversa índole, pero en general podrían diferenciarse —al menos en lo que afecta a la formulación planteada en esta tesis— dos grandes grupos de motivos, que se describen brevemente a continuación:

- Por un lado, se encuentran aquellas limitaciones vinculadas a la necesidad de adaptar el trazado en planta de la plataforma reservada a la trama urbana, tales como la existencia de curvas de radio reducido que no pueden ser transitadas en condiciones de seguridad a la velocidad máxima programada u objetivo para el conjunto del tramo, afectando esta restricción fundamentalmente a puntos de giro en intersecciones viarias. Otro posible motivo relacionado con el trazado —en este caso con el perfil longitudinal— es la presencia de rampas y pendientes que afectan negativamente a las tasas de aceleración y frenado de los vehículos o unidades de transporte (generalmente referidas por defecto a una alineación horizontal). Así, en el caso de las rampas (sentido ascendente), mayores gradientes aumentan el tiempo necesario para alcanzar la velocidad máxima del tramo tras una parada mientras que, en el caso de las pendientes (sentido descendente), prolongan el tiempo requerido para la fase de deceleración desde dicha velocidad máxima hasta la detención en una parada. Una posible limitación adicional, exclusiva en este caso de los sistemas de tipo ferroviario (metro ligero o tranvía), puede venir dada por la presencia en algunos puntos singulares de la red de aparatos de vía (desvíos o, más raramente, travesías) que requieran ser atravesados a velocidades inferiores a la velocidad objetivo, si bien este tipo de restricción presentará en general una repercusión muy limitada sobre el tiempo total de recorrido en una línea. Finalmente, puede mencionarse entre este grupo de afecciones o interferencias, la posible intrusión accidental de vehículos o usuarios no autorizados para su tránsito por la plataforma reservada, perturbando como consecuencia la normal circulación del vehículo de transporte público. En todo caso, este tipo de intrusiones se producirían únicamente de forma esporádica y, en la medida de lo posible, deben quedar minimizadas mediante una adecuada señalización y protección física del acceso a la plataforma reservada. Nótese que este primer grupo de limitaciones o interferencias se caracterizan por el hecho de que el grado o magnitud de la alteración producida sobre el tiempo de recorrido resulta independiente, en general, de la separación o intervalo de circulación entre los vehículos o unidades de transporte público que utilizan la plataforma reservada.
- Por otra parte, se encuentran aquellas alteraciones de la circulación teórica bajo las hipotéticas condiciones ideales de tránsito vinculadas a la presencia de intersecciones a nivel con otros viales a lo largo del trazado de la plataforma reservada. Aunque una de las premisas de partida en esta tesis para la modelización de las condiciones de operación de los sistemas de tipo metro ligero o tranvía y BHLS o BRT es que, además de la provisión de plataforma reservada, han sido dotados de dispositivos de priorización semafórica para el transporte público en las intersecciones a nivel, se debe tener presente que la capacidad y eficacia de este tipo de sistemas no es ilimitada. En particular, su eficacia depende, entre otros factores, de la frecuencia con que es necesario alterar las fases semafóricas habituales en beneficio del paso de los vehículos de transporte público, ya sea por extensión de la fase verde o por truncamiento de la fase roja. Así pues, la eficacia de los sistemas de priorización tiende a disminuir a medida que se acorta el intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público cuando este baja de un cierto umbral, por debajo del cual comienza a hacerse presente este efecto. Esta disminución está ligada a que cuando la frecuencia de alteración de las fases semafóricas de la intersección se vuelve excesivamente alta surgen problemas para acomodar o coordinar las fases semafóricas de todos los flujos de tráfico involucrados en la intersección, ya que se debe mantener un mínimo nivel de servicio para el resto de flujos. En concreto, debido a la necesidad de mantener la intersección coordinada con otras intersecciones cercanas, la alteración de las fases para otorgar prioridad al paso del transporte público muy probablemente no podrá ser garantizada en cada ciclo semafórico, sino más bien cada dos o tres ciclos (TCRP, 2013: p. 6.99)<sup>198</sup>. En consecuencia,

<sup>198</sup> Aunque en la referencia citada este criterio aparece mencionado en relación con los sistemas basados en autobuses, su validez se puede hacer extensible a los sistemas de ferrocarril ligero urbano como tranvía o metro ligero, ya que afecta

cuando el intervalo de paso entre los vehículos o unidades de transporte público desciende por debajo de un umbral equivalente a la duración de un cierto número de ciclos semafóricos de la intersección (entre dos y tres según la referencia anterior), la velocidad media de recorrido en los sistemas dotados de plataforma reservada y priorización semafórica comenzará a verse afectada negativamente debido a la creciente probabilidad de que no pueda otorgarse al transporte público la alteración de fases necesaria para que se produzca su circulación a través de la intersección sin reducción de la velocidad o detención. Esto se traduce por tanto en una disminución del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$ , tal como este queda definido en el presente epígrafe.

Los valores de la variable o coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  se obtienen en el modelo mediante una distribución triangular de probabilidad a partir de la componente aleatoria  $TR\omega_{rik}$ , que procede a su vez de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) para la cual se generaron previamente las respectivas extracciones (epígrafe 6.4.2.3). Obsérvese que los valores de esta componente aleatoria, dada una determinada línea y un cierto sentido de viaje, son comunes para los dos modos de transporte público a los que afecta el coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  (metro ligero o tranvía y, por otro lado, BHLS o BRT). Esto significa que a los valores del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  obtenidos para estos dos modos, aunque sean distintos entre sí, les corresponde un mismo valor en sus respectivas funciones de distribución acumulada (las cuales son en general diferentes entre sí en sus parámetros). Traducido a términos más sencillos, esto quiere decir que, en una misma simulación aleatoria y en una misma línea y sentido, los valores del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  se pueden considerar 'igual de optimistas' o 'igual de pesimistas' para ambos modos.

Para el establecimiento de los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  de cada uno de los sistemas dotados de plataforma reservada y priorización semafórica se debe tener en cuenta el distinto comportamiento de los dos grandes grupos de causas o motivos de la disminución de velocidad media de recorrido anteriormente descritos. Así, estas distribuciones vendrán dadas por funciones que, en general, toman como variable independiente el intervalo entre vehículos o unidades de transporte público en la línea en estudio, ya que las perturbaciones generadas por los motivos o causas del segundo grupo comienzan a hacerse presentes cuando dicho intervalo se sitúa por debajo de un determinado umbral, a partir del cual la incidencia de dichas perturbaciones sobre la velocidad media de recorrido se agrava a medida que disminuye el intervalo. Por el contrario, por encima de dicho umbral los parámetros de las distribuciones triangulares del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  se pueden considerar constantes (es decir, independientes del intervalo), ya que las limitaciones o restricciones adicionales que se encuadran en el primer grupo están presentes y actúan del mismo modo cualquiera que sea el intervalo entre vehículos o unidades de transporte.

Por tanto, una primera disquisición corresponde al establecimiento del valor de intervalo en el que se sitúa el umbral o límite entre ambos subdominios. Al respecto, la referencia anteriormente citada (TCRP, 2013: p. 6.99) señala que la concesión de prioridad al paso del transporte público mediante la alteración de las fases semafóricas en las intersecciones a nivel comienza a verse dificultada cuando es requerida cada dos o tres ciclos semafóricos. Esta indicación apunta a que el intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público que potencialmente comenzaría a generar una disminución de la velocidad media de recorrido se situaría entre dos y tres veces la duración del ciclo semafórico. En consecuencia, se adopta el límite superior (3 ciclos semafóricos) como umbral por debajo del cual el valor del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  empezaría a disminuir al reducirse el intervalo, ya que bajo tales condiciones comenzaría a existir una cierta probabilidad (en principio reducida) de que el paso del vehículo de transporte público a través de la intersección precisase la alteración de las fases semafóricas pero esta no pudiese ser otorgada.

---

genéricamente al funcionamiento de los sistemas de priorización del transporte público en intersecciones viarias a nivel, afrontando ambos tipos de modos similares limitaciones.

Por otra parte, para completar el establecimiento del valor concreto de dicho intervalo límite o umbral, ha de dilucidarse la duración del ciclo semafórico medio o típico. En este sentido, el *'Highway Capacity Manual 2000'* de EE.UU., en su capítulo sobre conceptos relativos a vías urbanas, indica como duraciones por defecto o típicas de los ciclos semafóricos —para su uso en ausencia de datos específicos por intersección— valores de 70 s para el distrito central financiero (literalmente CBD o *'Central Business District'*) y de 100 s en otras situaciones (TRB, 2000: p. 10.21, *Exhibit 10.16*)<sup>199</sup>. Estos valores son consistentes con las condiciones típicas que el propio manual utiliza para configurar el *'Exhibit 10.7'* (TRB, 2000: p. 10.10), donde se considera un ciclo semafórico de 70 s de duración para las vías urbanas de Clase IV (las de inferior capacidad) y de 110 s para las de Clase I (las de mayor capacidad), con valores intermedios de 80 y 90 s para las clases III y II, respectivamente. A la vista de estos datos se adopta, a los efectos tratados en este epígrafe, una duración típica o media del ciclo semafórico de 90 s, en consideración de que, en general, la mayor parte de la ruta de una línea de transporte público transcurrirá fuera del distrito central financiero o entornos urbanísticos claramente equivalentes (sin perjuicio de que efectivamente este tipo de distritos puedan situarse en uno de los extremos de la línea<sup>200</sup> o de que estén atravesados por ella<sup>201</sup>).

En conclusión, de acuerdo a los dos párrafos precedentes se establece como umbral o límite entre los dos tipos de comportamiento de las funciones un intervalo de 270 s (4.5 min). Este intervalo también podría ser interpretado, de forma alternativa, como 2.5 veces un ciclo semafórico de 108 s, muy próximo al valor superior considerado como típico para viales urbanos de Clase I.

A la hora de proponer las funciones que asignen valores a la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  de cada uno de los dos sistemas concernidos, se ha comenzado considerando el caso correspondiente al modo BHLS o BRT para condiciones que presenten intervalos mayores al umbral establecido (4.5 min). En esta situación se han de considerar únicamente las limitaciones y restricciones correspondientes al primer grupo de los descritos anteriormente en este epígrafe (con exclusión de las restricciones referidas a aparatos de vía) y, consecuentemente, los valores de estos tres parámetros serán constantes (independientes del intervalo). Se han propuesto de este modo valores de 0.90 para la moda, 0.85 para el mínimo y 0.95 para el máximo, con la consideración, a falta de otro criterio particular, de que la distribución triangular resultante sea simétrica. Por su parte, para el subdominio de intervalos menores al umbral de 4.5 min se han de añadir los efectos relacionados con la disminución de eficacia de los sistemas de priorización semafórica para el transporte público, con lo que se introduce en las funciones la influencia del intervalo de circulación entre vehículos o unidades de transporte. Se plantea al respecto una función polinómica de segundo grado al objeto de recoger el aumento del decrecimiento marginal de la velocidad media de recorrido a medida que el intervalo se hace más reducido (es decir, la derivada del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  con respecto al intervalo ha de ser positiva y decreciente en este subdominio). Congruentemente debe imponerse la continuidad de la función y de su primera derivada en el punto correspondiente al intervalo umbral de 4.5 min, lo que implica que la derivada del polinomio en dicho punto ha de ser nula. Como punto adicional de referencia se ha tomado un intervalo de 2 min (en el entorno inferior de los intervalos mínimos de diseño típicamente aplicables a este tipo de sistemas cuando no disponen de plataforma segregada con intersecciones a distinto nivel), al cual se han asignado valores de 0.77, 0.68 y 0.86 para respectivamente la moda, mínimo y máximo de la distribución triangular del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  (de nuevo con distribución simétrica). Por tanto, estas tres condiciones permiten determinar los coeficientes de los polinomios de segundo grado planteados. Obsérvese además que la diferencia entre los valores mínimo y máximo aumenta al reducirse el intervalo, reflejando el mayor nivel de variabilidad que una mayor

<sup>199</sup> En lugar de ediciones más recientes, se ha utilizado como referencia para establecer un valor de la duración media o típica del ciclo semafórico en vías urbanas la edición del año 2000 del *'Highway Capacity Manual'* (TRB, 2000), puesto que dicho valor por defecto no aparece recogido de una forma tan genérica en las ediciones posteriores (TRB, 2010; TRB, 2016).

<sup>200</sup> Caso habitual en líneas de configuración radial.

<sup>201</sup> Caso habitual en líneas de configuración diametral.

frecuencia de la posible alteración de las fases semafóricas introduce en el funcionamiento coordinado de los sistemas de priorización, así como una mayor incertidumbre (o falta de conocimiento particular) sobre cuál sería la magnitud de la influencia de esta mayor frecuencia sobre el tiempo medio de recorrido (por ejemplo, factores como la densidad de intersecciones por kilómetro y la distancia entre paradas jugarían un papel cada vez más significativo al respecto).

Por su parte, para el metro ligero o tranvía, en los casos en que el intervalo entre vehículos es mayor que el límite o umbral de 4.5 min, se han propuesto valores del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  ligeramente superiores a los adoptados para el modo BHLS o BRT (concretamente con un incremento de 0.02 para cada uno de los tres parámetros de la distribución triangular —moda, mínimo y máximo—, lo que deja a estos con valores de 0.92, 0.87 y 0.97 respectivamente). Este pequeño incremento responde al hecho de que las especificaciones de trazado aplicadas al diseño de los modos ferroviarios (incluso en el caso de los de ámbito urbano, excluyendo tranvías históricos o turísticos) suelen ser algo más estrictas que las utilizadas para sus modos análogos basados en el uso de autobuses. Esto se traduce en la aplicación de menores gradientes máximos y mayores radios mínimos de curvatura, a lo que se añade además la ventaja del autoguiado de las ruedas debido al sistema de rodadura ferroviaria<sup>202</sup>. Por el contrario, la posible existencia de limitaciones puntuales de velocidad ligadas a la presencia de aparatos de vía puede suponer un factor ligeramente más favorable a los modos de tipo BHLS o BRT, si bien la incidencia de esta particularidad debiera resultar prácticamente despreciable (el número de aparatos de vía en el recorrido de este tipo de líneas será en general más bien reducido y, de todas formas, el paso por estos aparatos no tiene que suponer necesariamente una limitación de velocidad con respecto a la velocidad programada u objetivo de un determinado tramo entre paradas). En cualquier caso, en conjunto puede interpretarse que las especificaciones de trazado más favorables deben repercutir —aunque sea de un modo muy leve— en que las restricciones y limitaciones incluidas en el primer grupo de los descritos anteriormente en el presente epígrafe afecten con menor intensidad a los modos de tipo ferroviario. Por tanto, con estas premisas, los valores del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  resultarían ligeramente mayores para estos últimos.

A continuación se debe pasar a analizar el comportamiento del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  en el subdominio de intervalos menores al umbral de 4.5 min para el caso del metro ligero o tranvía. En este sentido, a nivel cualitativo siguen siendo válidas las premisas u orientaciones generales que se apuntaron para el caso de los sistemas de tipo BHLS o BRT. Esto se traduce, al igual que para estos sistemas, en el planteamiento de una función polinómica de segundo grado dependiente del intervalo entre vehículos o unidades de transporte público, con las características generales de que los valores del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  sean crecientes con dicho intervalo (pendiente positiva) y de que su primera derivada con respecto al intervalo sea decreciente (menor pendiente de  $\omega_{ryijk}^m$  al aumentar el valor del intervalo). Pero más allá de estas similitudes cualitativas puede tenerse en cuenta que, a igualdad de todos los demás factores intervinientes<sup>203</sup>, el paso de los vehículos de metro ligero o tranvía por las intersecciones dotadas de priorización semafórica puede tener una incidencia ligeramente mayor en la posible alteración de las fases que en el caso de los autobuses. Esta idea se sustenta en el hecho de que los vehículos de metro ligero o tranvía moderno son, por norma general, de mayor longitud que los autobuses (utilizados para BHLS o BRT), por lo que han de emplear un tiempo ligeramente mayor en atravesar la intersección y dejarla despejada. Esto implica que la duración del tiempo añadido a la fase verde o restado de la fase roja en la dirección de la línea con respecto a las fases habituales haya de ser también ligeramente mayor. Por tanto resultará más complejo acomodar y coordinar las fases semafóricas de todos los flujos

<sup>202</sup> Nótese, no obstante, que esta ventaja puede verse neutralizada en el caso de algunos sistemas de tipo BRT o BHLS que cuentan con otros tipos de guiado automático, tales como guiado óptico, magnético o guiado mecánico mediante rodillos laterales en las ruedas que ejercen presión sobre rebordes de hormigón situados a ambos lados de la 'vía'.

<sup>203</sup> Entre estos factores cabe considerar un mismo intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte, la misma duración de los ciclos semafóricos y de sus fases, el mismo volumen de tráfico en los distintos movimientos de la intersección, el mismo rendimiento de los dispositivos de detección de la aproximación del vehículo de transporte público y de comunicaciones con los sistemas de control y regulación, mismos protocolos de priorización (incondicional frente a condicional y activa frente a pasiva), mismos márgenes de seguridad, etc.

de tráfico involucrados en la intersección, lo que repercute en una probabilidad ligeramente menor de que el sistema de priorización pueda garantizarle al transporte público la prioridad de paso en dicha intersección. Esto implica que la pequeña diferencia en el valor del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  favorable al metro ligero o tranvía para intervalos superiores al umbral o límite de 4.5 min (con respecto a BHLS o BRT) se vaya reduciendo progresivamente a medida que el intervalo desciende por debajo de dicho umbral, con lo que se llegará a un cierto valor del intervalo en el que los coeficientes  $\omega_{ryijk}^m$  se igualen para ambos tipos de modos. En ese punto las funciones homólogas (entre metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) de moda, mínimo y máximo se habrán de intersecar entre sí. El criterio propuesto o adoptado para la presente formulación es que ese punto de intersección corresponda a un intervalo de 2.25 minutos, equivalente a la mitad del intervalo umbral o a 1.5 veces la duración del ciclo semafórico considerado como típico o medio. Este criterio determina por tanto uno de los puntos de paso de cada una de las funciones de moda, mínimo y máximo para metro ligero o tranvía. Añadiendo las condiciones de continuidad tanto de las propias funciones como de su primera derivada en el punto límite entre los dos subdominios (intervalo umbral de 4.5 min) quedan plenamente definidos los coeficientes de las funciones polinómicas de segundo grado que habían sido planteadas.

Así pues, a partir del conjunto de indicaciones anteriores se obtienen para el cálculo de la variable  $\omega_{ryijk}^m$  las expresiones que se indican a continuación, que se presentan en principio de una forma genérica en cuanto a los valores de los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, el mínimo y el máximo de las distribuciones triangulares. La aplicación de dicha serie de ecuaciones conlleva la utilización de la función de transformación  $\text{triang}^{\text{II}}$ . Obsérvese, por otra parte, que la obtención de la variable  $\omega_{ryijk}^m$  no es aplicable al año base ni a los módulos M-00, M-R0 y M-B0, ya que durante las fases correspondientes a dichos módulos el modo de transporte público en operación es el autobús convencional en tráfico mixto.

Complementariamente, los valores numéricos propuestos en esta tesis para los coeficientes de las ecuaciones 8.21.b.i a 8.21.e.iii se detallan en la Tabla 8.4 a efectos de aplicación práctica de la modelización desarrollada. Asimismo, en la Figura 8.7 se incluye la representación gráfica de las funciones resultantes de aplicar estos valores al cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares del coeficiente de mayoración del tiempo teórico o ideal de recorrido de los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica ( $\omega$ ).

**Para los módulos de cálculo M-R1, M-R2, M-R3, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$\omega_{ryijk}^m = \text{triang}^{\text{II}}(TR\omega_{rik} \mid \omega_{min}^m, \omega_{max}^m, \omega_{mod}^m) \tag{8.21.a}$$

donde las funciones que calculan el mínimo, máximo y moda de la distribución triangular final tienen distinta expresión dependiendo tanto del rango en el que se encuentre el intervalo entre vehículos o unidades de transporte como del modo en cuestión. Así pues:

Si  $h_{ryijk}^{ms} < 4.5 \text{ min}$  :

Para metro ligero o tranvía ( $m=R$ ):

$$\omega_{mod}^R = Kmd2a_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{RR})^2 + Kmd1a_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{RR} + Kmd0a_{\omega} \tag{8.21.b.i}$$

$$\omega_{min}^R = Kmn2a_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{RR})^2 + Kmn1a_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{RR} + Kmn0a_{\omega} \tag{8.21.b.ii}$$

$$\omega_{max}^R = Kmx2a_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{RR})^2 + Kmx1a_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{RR} + Kmx0a_{\omega} \tag{8.21.b.iii}$$

Para BHLS o BRT ( $m=B$ ):

$$\omega_{mod}^B = Kmd2b_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{BB})^2 + Kmd1b_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{BB} + Kmd0b_{\omega} \tag{8.21.c.i}$$

$$\omega_{min}^B = Kmn2b_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{BB})^2 + Kmn1b_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{BB} + Kmn0b_{\omega} \tag{8.21.c.ii}$$



$$\omega max_{ryijk}^B = Kmx2b_{\omega} \cdot (h_{ryijk}^{BB})^2 + Kmx1b_{\omega} \cdot h_{ryijk}^{BB} + Kmx0b_{\omega} \quad (8.21.c.iii)$$

Si  $h_{ryijk}^{ms} \geq 4.5$  min :

Para metro ligero o tranvía ( $m=R$ ):

$$\omega mod_{ryijk}^R = 4.5^2 \cdot Kmd2a_{\omega} + 4.5 \cdot Kmd1a_{\omega} + Kmd0a_{\omega} \quad (8.21.d.i)$$

$$\omega min_{ryijk}^R = 4.5^2 \cdot Kmn2a_{\omega} + 4.5 \cdot Kmn1a_{\omega} + Kmn0a_{\omega} \quad (8.21.d.ii)$$

$$\omega max_{ryijk}^R = 4.5^2 \cdot Kmx2a_{\omega} + 4.5 \cdot Kmx1a_{\omega} + Kmx0a_{\omega} \quad (8.21.d.iii)$$

Para BHLS o BRT ( $m=B$ ):

$$\omega mod_{ryijk}^B = 4.5^2 \cdot Kmd2b_{\omega} + 4.5 \cdot Kmd1b_{\omega} + Kmd0b_{\omega} \quad (8.21.e.i)$$

$$\omega min_{ryijk}^B = 4.5^2 \cdot Kmn2b_{\omega} + 4.5 \cdot Kmn1b_{\omega} + Kmn0b_{\omega} \quad (8.21.e.ii)$$

$$\omega max_{ryijk}^B = 4.5^2 \cdot Kmx2b_{\omega} + 4.5 \cdot Kmx1b_{\omega} + Kmx0b_{\omega} \quad (8.21.e.iii)$$

El intervalo genérico  $h$  vinculado a las ecuaciones 8.21.b.i a 8.21.e.iii se particulariza del siguiente modo, atendiendo al tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Por su parte, los índices ( $r, m, s, y, i, j, k$ ) involucrados en esta serie de ecuaciones (8.21.a a 8.21.e.iii) han de tomar los siguientes valores:

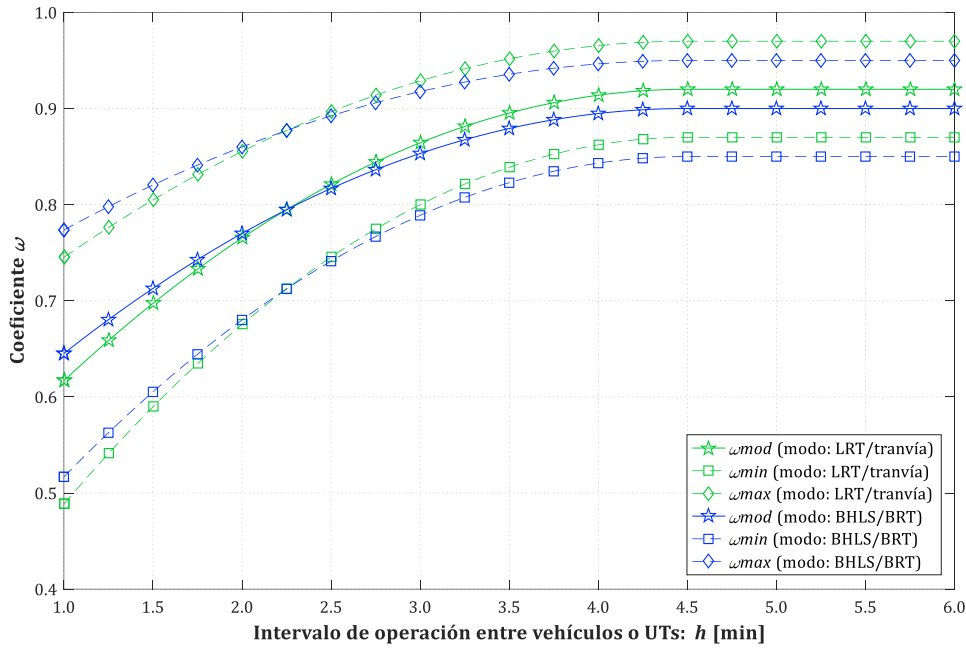
$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; m \in \{R, B\} \wedge s = m ;$$

$$y = \begin{cases} = \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Tabla 8.4.** Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del coeficiente de mayoración del tiempo teórico o ideal de recorrido de los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica ( $\omega$ ).

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Modo TP: metro ligero o tranvía (<math>m=R</math>)</b>			
<b>Moda</b>	$Kmd2a_{\omega} = -2.475062 \cdot 10^{-2}$	$Kmd1a_{\omega} = 2.227555 \cdot 10^{-1}$	$Kmd0a_{\omega} = 4.188000 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2a_{\omega} = -3.115062 \cdot 10^{-2}$	$Kmn1a_{\omega} = 2.803555 \cdot 10^{-1}$	$Kmn0a_{\omega} = 2.392000 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmx2a_{\omega} = -1.835062 \cdot 10^{-2}$	$Kmx1a_{\omega} = 1.651555 \cdot 10^{-1}$	$Kmx0a_{\omega} = 5.984000 \cdot 10^{-1}$
<b>Modo TP: BHLS o BRT (<math>m=B</math>)</b>			
<b>Moda</b>	$Kmd2b_{\omega} = -2.080000 \cdot 10^{-2}$	$Kmd1b_{\omega} = 1.872000 \cdot 10^{-1}$	$Kmd0b_{\omega} = 4.788000 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2b_{\omega} = -2.720000 \cdot 10^{-2}$	$Kmn1b_{\omega} = 2.448000 \cdot 10^{-1}$	$Kmn0b_{\omega} = 2.992000 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmx2b_{\omega} = -1.440000 \cdot 10^{-2}$	$Kmx1b_{\omega} = 1.296000 \cdot 10^{-1}$	$Kmx0b_{\omega} = 6.584000 \cdot 10^{-1}$



**Figura 8.7.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del coeficiente de mayoración del tiempo teórico o ideal de recorrido de los sistemas con plataforma reservada en función del intervalo entre vehículos o unidades de transporte público.

#### 8.3.4.4. Factor para la mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de la parada

La variable  $\tau_{ryijk}^{ms}$  representa un factor a utilizar para el cálculo del tiempo adicional medio potencialmente perdido en la operación de sistemas de autobuses en la entrada o acceso a las paradas debido a la posible necesidad de que el autobús entrante deba permanecer en espera de que uno de los espacios o áreas de embarque/desembarque de viajeros sea liberado por otro autobús, en el caso de que cuando tiene lugar la llegada del nuevo autobús todos los espacios de embarque/desembarque (sean uno o varios) se encuentren ocupados (es decir, se produzca una sobrecarga en la capacidad de la parada). El cálculo de esta variable se efectúa, dada la simulación aleatoria  $r$ , para el modo de transporte público  $m$  (con  $m$  representando al autobús convencional en tráfico mixto o a los sistemas BHLS o BRT) operando sobre la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , de acuerdo además a las respectivas condiciones de operación previstas para el año  $y$  en el escenario  $s$ . Por su parte, para el caso particular del año base se define la variable equivalente  $\tau_{rijk}^*$ , que presenta un significado análogo al anteriormente señalado pero en la que se omiten los índices que resultan innecesarios para este caso, los cuales corresponden a modo ( $m$ ), escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).

Tanto la variable  $\tau_{ryijk}^{ms}$  como su homóloga  $\tau_{rijk}^*$  son de tipo adimensional, ya que se plantea la obtención de este tiempo adicional de espera para el acceso a las paradas como una proporción sobre el tiempo total de parada acumulado a lo largo de todas las paradas del trayecto entre terminales o cabeceras de una línea.

Así pues, el factor  $\tau_{ryijk}^{ms}$  (o  $\tau_{rijk}^*$  en su caso), tal como es definido en la presente formulación, correspondería al cociente entre la suma de tiempos perdidos en espera de la disponibilidad de un espacio libre de embarque y desembarque a lo largo de las distintas paradas del recorrido de una línea, y el tiempo total de parada (tiempo que el autobús permanece detenido dentro de las paradas) acumulado en todas esas mismas paradas, incluyendo en su caso las demoras de reincorporación a la circulación. Nótese, no obstante, que este fenómeno de superación de la capacidad de las paradas no se produce en general de forma homogénea a lo largo de las paradas de una ruta, sino que dado un determinado intervalo entre vehículos afecta con mayor probabilidad a aquella o aquellas paradas que presentan un mayor tiempo

de permanencia de los autobuses en la parada (influyendo tanto el tiempo medio como la dispersión o variabilidad de dichos tiempos). Es decir, afecta con mayor probabilidad a la parada crítica —la cual determina el intervalo mínimo de diseño— y a aquellas otras paradas con tiempos de permanencia en la parada más cercanos a los de parada crítica. Al respecto, la probabilidad de que un autobús que llega a una determinada parada se encuentre con todos los espacios de embarque y desembarque ocupados por otras unidades se denomina tasa de fallo de la parada (*stop failure rate*). En este sentido, en el proceso de dimensionamiento de la capacidad de diseño de una línea se parte del establecimiento de la tasa de fallo de la parada crítica que se desee no superar (tasa de fallo de diseño), en función de la cual —junto con otras variables— se determina la capacidad de la parada. A partir de esta, incorporando la influencia de otros factores, es posible establecer la capacidad de diseño de dicha línea. Este proceso se detalla con precisión en el Apartado 5 del Capítulo 6º del '*Transit Capacity and Quality of Service Manual*', y más concretamente, en lo referente a la tasa de fallo de diseño de las paradas y sus variables determinantes, en el Paso 3 del citado apartado (TCRP, 2013: p. 6.63-6.66).

El fenómeno de fallo o sobrecarga de la capacidad de una parada se manifiesta cuando el número de buses por unidad de tiempo previstos para utilizar la parada se aproxima a la capacidad de diseño de la misma. Por tanto, en una determinada línea, dicho suceso resulta más probable cuanto más se acerque el intervalo programado de operación al intervalo mínimo de diseño. Para un único espacio de embarque/desembarque, el fallo o sobrecarga de capacidad se produciría cuando el tiempo de permanencia en la parada del autobús precedente excede el intervalo entre vehículos, de modo que el mínimo intervalo de diseño está condicionado, entre otros factores, por el valor del tiempo de permanencia en la parada que no será excedido con una frecuencia mayor que la tasa de fallo deseada. En una determinada parada y durante un cierto período característico de operación, se puede considerar que los tiempos de permanencia en la parada de los distintos autobuses que operan la línea se ajustan a una distribución normal, caracterizada por tanto por su media y su desviación típica o estándar, lo que permite calcular el valor del tiempo de permanencia en parada que solo será sobrepasado con una probabilidad igual a la tasa de fallo de diseño. La diferencia entre este valor y la media de los tiempos de permanencia en la parada es lo que se conoce como margen operativo (TCRP, 2013: p. 6.64-6.65). Este margen operativo ha de ser más elevado cuanto menor sea la tasa de fallo de diseño deseada y cuanto mayor sea la desviación típica de los tiempos de permanencia en parada (la cual se puede expresar a su vez como el producto del coeficiente de variación por el valor medio).

Bajo el enfoque anterior, una estimación o cálculo plenamente riguroso del valor medio de la suma de tiempos perdidos en espera de la disponibilidad de un espacio libre de embarque/desembarque en las distintas paradas efectuadas por un autobús a lo largo del recorrido de una línea exigiría un nivel de detalle muy elevado sobre los tiempos de permanencia en cada una de las paradas, dependientes a su vez —entre otras posibles variables— de las características particulares de la demanda de subidas y bajadas de pasajeros en cada una de estas paradas. Este grado de detalle resulta incompatible con el tipo de datos de entrada que se está considerando pertinente para el nivel de análisis objeto de esta tesis. Además, la complejidad de los cálculos involucra no solamente la tasa de fallo resultante en cada una de las paradas (distinta en general de la tasa de fallo de diseño de la parada crítica, siendo menor que esta última) sino también la obtención del tiempo medio de espera del autobús entrante a que un espacio de embarque/desembarque quede liberado por el autobús precedente, condicionado o restringido a aquellos casos en que efectivamente habrá de producirse dicha espera. Adicionalmente, la posible falta de regularidad de los intervalos entre vehículos o unidades de transporte introduciría un factor añadido de distorsión con respecto a los intervalos programados, agravado por los efectos 'en cascada' que se pueden desencadenar o ver favorecidos cuando se produce la sobrecarga de alguna de las paradas (tal como el apelotonamiento de autobuses o '*bus bunching*').

Así pues, el planteamiento adoptado en este epígrafe, en consonancia con las directrices generales del resto del modelo, es que los valores de la variable  $\tau_{ryjk}^{ms}$  (o  $\tau_{ryjk}^*$  en el año base) se obtengan de una distribución triangular de probabilidad a partir de la componente aleatoria  $TR\tau_{rik}$ , que procede a su vez de la correspondiente distribución triangular de partida (con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Sobre

esta última distribución se generaron previamente (epígrafe 6.4.2.4) los respectivos valores numéricos aleatorios de  $TR\tau_{rik}$ .

Con el propósito de determinar, en cada caso, los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales del factor  $\tau_{ryjk}^{ms}$  (y similarmente  $\tau_{ryjk}^*$ ) se plantean de nuevo funciones polinómicas de segundo grado. Un aspecto asociado a estas funciones es, evidentemente, el establecimiento de la variable independiente a emplear. Dado que el fenómeno que se pretende analizar (tiempos adicionales potencialmente perdidos en espera de un espacio libre de embarque/desembarque en las paradas) está estrechamente vinculado al mayor o menor grado de utilización de la capacidad máxima de diseño de la línea (en términos de frecuencia, es decir, autobuses/hora), resulta preciso emplear como variable independiente algún indicador relacionado con la proporción entre la frecuencia programada y la frecuencia máxima de diseño. En este caso se ha tomado el cociente entre el intervalo programado de operación de la línea estudiada y su intervalo mínimo de diseño (genéricamente  $h/Hmin$ ), que guarda una relación inversamente proporcional con la proporción de utilización de la capacidad máxima. Por tanto, los fenómenos de fallo o sobrecarga de la capacidad de una parada resultan irrelevantes para valores del cociente  $h/Hmin$  suficientemente altos y ganarán intensidad a medida que dicho ratio descienda hasta valores próximos a 1.0 (cota inferior que  $h/Hmin$  puede alcanzar).

Para disponer de una primera aproximación de la cuantía que estos tiempos adicionales de espera pueden suponer, se indica (TCRP, 2013: p. 6.64) que los eventuales fallos o sobrecargas de la capacidad de las paradas pueden provocar que, cuando la línea opera a su máxima capacidad, la velocidad media de operación de los autobuses afectados descienda en un 20% para una tasa de fallo aproximada del 15% (formación de colas para acceder a la parada durante un período de unos 10 minutos por hora). Más detalladamente, la referencia en la que se basan estos datos (St. Jacques y Levinson, 1997: pp. 13-14) especifica que estos momentos en los que la capacidad de la parada es efectivamente sobrepasada afectan a períodos de entre 5 y 10 minutos por hora (lo que equivaldría a tasas de fallo entre el 10% y el 15%, aproximadamente). Los citados autores señalan que estos resultados, que están basados en simulaciones, son destacablemente consistentes con los observados en muchas líneas de autobús dotadas de carril-bus. Esta disminución del 20% de la velocidad media de operación es equivalente a un aumento del 25% (resultado de  $[1/(1-0.2)-1] \cdot 100\%$ ) en el tiempo de operación de los autobuses afectados. Como los momentos afectados por el fallo o sobrecarga de la capacidad de la parada representan entre el 10% y el 15% del total de la hora, el incremento del tiempo medio de operación calculado sobre todos los autobuses operados en el período de análisis (es decir, incluyendo los no afectados) resultaría entre el 2.5% y el 3.75%.

Se debe tener presente que el factor  $\tau$  (ya sea bajo la forma de  $\tau_{ryjk}^{ms}$  o  $\tau_{ryjk}^*$ ), según ha sido definido en la presente formulación, afecta solo a la parte del tiempo de operación que corresponde al tiempo de parada acumulado a lo largo de todas las paradas del recorrido, de modo que los tiempos perdidos en espera de la disponibilidad de un espacio libre para el acceso a las paradas se plantean como una proporción sobre dicha parte. Por tanto, para trasladar los datos del párrafo anterior a posibles valores del factor  $\tau$ , es preciso conocer las proporciones que los tiempos de parada representan habitualmente con respecto al tiempo total de operación. En este sentido, Levinson (1983) indica, basándose en el análisis de velocidades de operación, demoras y tiempos de parada en varias ciudades de EE.UU., que estos últimos consumen entre el 9% y el 26% del tiempo total. Estos valores constituyen una referencia clásica al respecto. No obstante, en St. Jacques y Levinson (1997: p. 56, Tabla A-7) se detalla el reparto de las distintas componentes del tiempo de operación en autobús para el caso de tramos de la 5ª y 6ª Avenida (ciudad de Nueva York), observándose tiempos de parada<sup>204</sup> que representan el 9.5% y el 30.2% del total, respectivamente. En consecuencia, se adopta como criterio aproximado para la deducción de posibles valores del factor  $\tau$  que el tiempo total de parada pueda estar comprendido entre

<sup>204</sup> Designados como 'tiempo de servicio a pasajeros' según la referencia citada.

el 10% y el 30% del tiempo total de operación. Así pues, partiendo de que el incremento del tiempo medio de operación causado por efecto de eventuales fallos o sobrecargas de la capacidad de las paradas se ha cifrado entre el 2.5% y el 3.75%, y que a su vez el tiempo de parada representa un mínimo del 10% y un máximo del 30% del tiempo de operación, es posible calcular los incrementos proporcionales sobre el tiempo acumulado de parada que conducen a los aumentos del tiempo medio de operación señalados. De este modo, analizando las posibles combinaciones de valores, se obtiene un máximo incremento sobre el tiempo acumulado de parada del 37.5%<sup>205</sup>, mientras que el mínimo incremento resultante se cifra en el 8.33%<sup>206</sup>. Estos incrementos equivalen por tanto a valores máximo y mínimo del factor  $\tau$  de 0.375 y 0.0833, respectivamente, para condiciones en las que la línea opera a su máxima capacidad de diseño (es decir,  $h/H_{min}=1.0$ ).

Una vez determinados los valores máximo y mínimo del factor  $\tau$  para  $h/H_{min}=1.0$  (límite inferior del dominio de las funciones), se hace preciso establecer el valor del cociente  $h/H_{min}$  para el cual se puede asumir que los tiempos de espera perdidos a causa de fallos o sobrecargas de la capacidad de las paradas son inexistentes o nulos (es decir,  $\tau=0$ ). En este sentido, se toma como tal un valor de  $h/H_{min}$  igual a 2, en consonancia con las indicaciones que el *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* realiza en relación con la influencia de un aumento del volumen de autobuses en operación sobre la velocidad de los mismos (TCRP, 2013: p. 6.92-6.93; p. 6.14, *Exhibit 6.10*). Al respecto se señala que no se aprecia efecto sobre la velocidad hasta que se utiliza la mitad de la máxima capacidad en número de autobuses por hora (lo cual equivale a que el cociente entre el intervalo programado de operación y el intervalo mínimo de diseño sea 2). A partir de ese punto, a medida que la frecuencia de autobuses se incrementa, la velocidad media de operación comienza a caer a consecuencia de que los distintos autobuses interfieren entre sí en la entrada y salida de las paradas.

De este modo han quedado definidos ya dos puntos de paso de las funciones planteadas para el cálculo de los valores mínimo y máximo del factor  $\tau$ . La condición restante resulta de aplicar la tangencia o continuidad de derivada en el punto que limita los dos subdominios (es decir, en  $h/H_{min}=2.0$ ), donde el factor  $\tau$  pasa a tomar valores constantes e iguales a cero para cualquier intervalo de operación mayor que el doble del intervalo mínimo de diseño. Por tanto, la derivada de las funciones cuyo dominio es  $h/H_{min}<2.0$  ha de ser nula en dicho punto. Por su parte, para el establecimiento de la función de cálculo de la moda se han tomado simplemente los puntos medios entre los correspondientes mínimos y máximos, bajo el criterio de adoptar distribuciones triangulares simétricas a falta de otro tipo de indicaciones particulares.

En consecuencia, se presentan a continuación las expresiones para el cálculo de las variables  $\tau^*_{rijk}$  y  $\tau^{ms}_{rijk}$ , planteadas a partir del conjunto de indicaciones anteriores, y en las que interviene la función de transformación triang<sup>II</sup>. Dado que estas ecuaciones se muestran en principio con valores genéricos para los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, el mínimo y el máximo de las distribuciones triangulares finales, se procede a indicar en la Tabla 8.5 los valores numéricos propuestos para dichos coeficientes en esta tesis, a efectos de aplicación práctica del modelo desarrollado. Adicionalmente, la Figura 8.8 muestra la representación gráfica de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación de la capacidad de las paradas ( $\tau$  o  $\tau^*$ ), obtenidas dichas funciones al aplicar específicamente los coeficientes propuestos.

#### Para el año base

$$\text{Si } \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} \geq 2.0 :$$

$$\tau^*_{rijk} = 0.0 \tag{8.22.a.i}$$

<sup>205</sup> Resultado de despejar  $\tau$  en:  $10 \cdot (1+\tau) + (100-10) = 100 + 3.75$  (%).

<sup>206</sup> Resultado de despejar  $\tau$  en:  $30 \cdot (1+\tau) + (100-30) = 100 + 2.5$  (%).

Si  $\frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} < 2.0$ :

$$\tau^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TR\tau_{rik} \mid \tau min^*_{ijk}, \tau max^*_{ijk}, \tau mod^*_{ijk} \right) \quad (8.22.a.ii)$$

donde:

$$\tau mod^*_{ijk} = Kmd2_{\tau} \cdot \left( \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} \right)^2 + Kmd1_{\tau} \cdot \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} + Kmd0_{\tau} \quad (8.22.a.iii)$$

$$\tau min^*_{ijk} = Kmn2_{\tau} \cdot \left( \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} \right)^2 + Kmn1_{\tau} \cdot \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} + Kmn0_{\tau} \quad (8.22.a.iv)$$

$$\tau max^*_{ijk} = Kmx2_{\tau} \cdot \left( \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} \right)^2 + Kmx1_{\tau} \cdot \frac{Hs^*_{ijk}}{Hmin^0_{ij}} + Kmx0_{\tau} \quad (8.22.a.v)$$

En las ecuaciones 8.22.a.i a 8.22.a.v, los subíndices  $(r,i,j,k)$  han de tomar los valores que se indican a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $\frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} \geq 2.0$ :

$$\tau^ms_{ryijk} = 0.0 \quad (8.22.b.i)$$

Si  $\frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} < 2.0$ :

$$\tau^ms_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TR\tau_{rik} \mid \tau min^ms_{ryijk}, \tau max^ms_{ryijk}, \tau mod^ms_{ryijk} \right) \quad (8.22.b.ii)$$

donde:

$$\tau mod^ms_{ryijk} = Kmd2_{\tau} \cdot \left( \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} \right)^2 + Kmd1_{\tau} \cdot \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} + Kmd0_{\tau} \quad (8.22.b.iii)$$

$$\tau min^ms_{ryijk} = Kmn2_{\tau} \cdot \left( \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} \right)^2 + Kmn1_{\tau} \cdot \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} + Kmn0_{\tau} \quad (8.22.b.iv)$$

$$\tau max^ms_{ryijk} = Kmx2_{\tau} \cdot \left( \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} \right)^2 + Kmx1_{\tau} \cdot \frac{h^ms_{ryijk}}{Hmin^m_{ij}} + Kmx0_{\tau} \quad (8.22.b.v)$$

En las ecuaciones 8.22.b.i a 8.22.b.v se particulariza el intervalo genérico  $h$  del siguiente modo, según el tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h^ms_{ryijk} \equiv Hb^ms_{ryijk}$
- Bucles de tipo B:  $h^ms_{ryijk} \equiv Hs^ms_{ryijk}$

Por su parte, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de este conjunto de ecuaciones (8.22.b.i a 8.22.b.v) deben adoptar las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

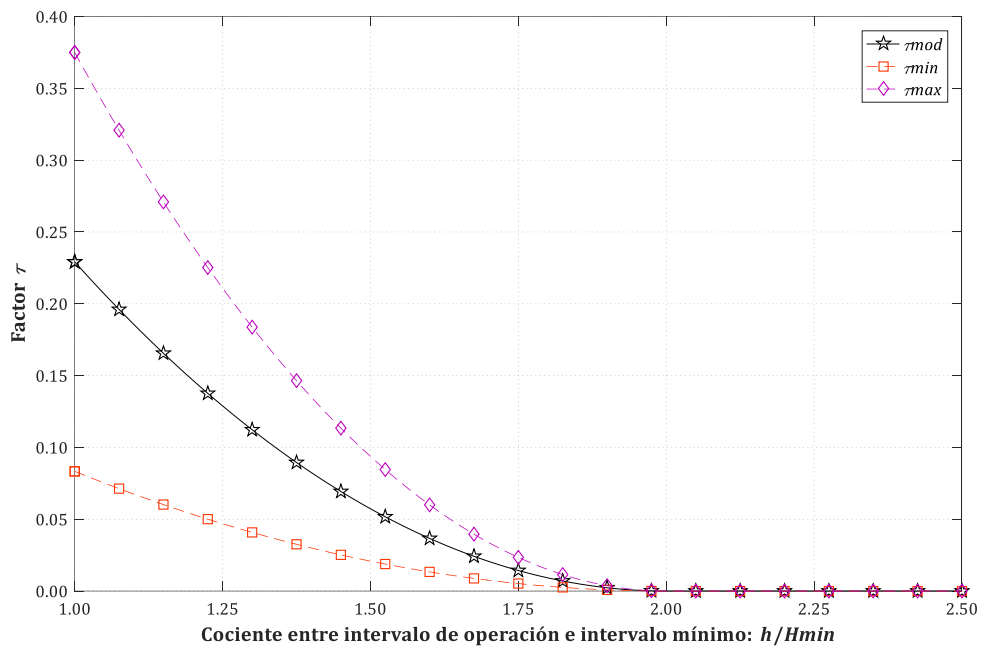
$$y = \left. \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} \right\} ;$$

$$m = \left. \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Tabla 8.5.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación de la capacidad de las paradas ( $\tau$  o  $\tau^*$ ).

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd2_\tau = 2.291667 \cdot 10^{-1}$	$Kmd1_\tau = -9.166667 \cdot 10^{-1}$	$Kmd0_\tau = 9.166667 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2_\tau = 8.333333 \cdot 10^{-2}$	$Kmn1_\tau = -3.333333 \cdot 10^{-1}$	$Kmn0_\tau = 3.333333 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmx2_\tau = 3.750000 \cdot 10^{-1}$	$Kmx1_\tau = -1.500000$	$Kmx0_\tau = 1.500000$



**Figura 8.8.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de mayoración de los tiempos de parada en sistemas de autobuses por efecto de la posible superación de la capacidad de las paradas en función del cociente  $h/Hmin$  entre el intervalo provisto o programado y el intervalo mínimo de diseño.

### 8.3.4.5. Tiempos de operación (entre terminales de la línea)

La variable  $To_{ryjk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo medio de operación del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , dadas las respectivas condiciones de operación previstas para el año  $y$  en el escenario  $s$ . Su variable equivalente

para el año base se designa  $To^*_{rijk}$ , donde se omiten, por prescindibles, los índices especificativos de escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ) y año ( $y$ ). En el caso del índice de modo, recuérdese que el único modo de transporte público existente en el año base es el autobús convencional en tráfico mixto, por lo que dicho índice resulta innecesario.

Las variables indicativas del tiempo de operación ( $To^{ms}_{ryjk}$  y  $To^*_{rijk}$ ) se expresan, en la presente formulación, en minutos [min].

Normalmente se entiende por tiempo de operación en una línea de transporte público el tiempo transcurrido desde la salida de un vehículo o unidad de transporte de la terminal o parada inicial hasta su llegada a la terminal o parada final de la línea (o a la misma terminal de partida —terminal de cierre— en el caso de líneas de recorrido circular). No obstante, en el ámbito de esta tesis, se consideran incluidos también en el tiempo de operación los tiempos dedicados a la subida y bajada de pasajeros en las terminales de inicio y final de la ruta (los cuales, por tanto, quedan excluidos del tiempo de terminal). Nótese que el concepto de tiempo de operación puede recibir en ocasiones denominaciones diferentes, como tiempo de recorrido (Molinero y Sánchez, 2005: p. 403).

A continuación se detallan las formulaciones planteadas para el cálculo del tiempo de operación en cada uno de los modos de transporte público presentes en el análisis, que difieren entre sí en mayor o menor medida según los modos en cuestión.

#### 8.3.4.5.a. Tiempo de operación para autobús convencional (operación en tráfico mixto)

El tiempo de operación para autobús convencional en tráfico mixto, dado por las variables  $To^*_{rijk}$  (en el caso del año base) y  $To^{0s}_{ryjk}$ , se calcula respectivamente según las ecuaciones 8.23.a y 8.23.b. Dichas ecuaciones se conforman en base a las siguientes componentes:

- El primer sumando calcula el tiempo acumulado de recorrido de todos los tramos entre paradas consecutivas, desde la inicial hasta la final (es decir, representa el tiempo total que el autobús emplea en situaciones de circulación, incluyendo en su caso las necesarias detenciones ante semáforos en fase roja y en cumplimiento de otras señales de regulación del tráfico, las eventuales detenciones o demoras debidas a retenciones en el tráfico general, etc.). Por tanto, este término ha de recoger la influencia del volumen de tráfico mixto previsto en el vial o viales de circulación que sirven de base al corredor, eje o itinerario transitado por la línea de transporte público en relación con la capacidad representativa de dichos viales. Al respecto, se emplea como base la conocida fórmula del BPR o *Bureau of Public Roads* de EE.UU., ya que, además de caracterizarse por su relativa sencillez, resulta ser probablemente el tipo de función más comúnmente utilizado (Ortúzar y Willumsen, 2011: p. 353; NCHRP, 2012: p. 73). Sobre la expresión general de dicha fórmula (recuérdese la ecuación 5.8.a), se reemplaza el tiempo de trayecto en condiciones de ausencia de tráfico (volumen nulo de tráfico mixto) por el cociente entre la longitud de la línea en cuestión (variable  $L_i$ ) y la velocidad promedio de trayecto de los autobuses bajo dichas condiciones de ausencia de tráfico en el respectivo itinerario (variable  $Vfb_{rik}$ ). El tiempo resultante de este cociente ha de multiplicarse por 60 para su conversión de horas a minutos (ya que la longitud viene dada inicialmente en kilómetros y la velocidad en kilómetros por hora). El otro factor de este término es el que incorpora el efecto de la razón entre el volumen de tráfico existente y la capacidad del vial de circulación. En él se introduce, por tanto, el ratio Volumen/Capacidad previsto para el vial o viales de circulación que sirven de soporte al itinerario de la línea (variables  $VCR^*_{rijk}$  o  $VCR^s_{ryjk}$ ) y, adicionalmente, se particularizan los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la fórmula BPR con los valores correspondientes al itinerario objeto de análisis para el caso de vehículos de cuatro o más ruedas<sup>207</sup> (variables  $\alpha f_{rik}$  y  $\beta f_{rik}$ ).
- La parte restante de las ecuaciones 8.23.a y 8.23.b corresponde al cálculo del tiempo total de detenciones relacionadas con paradas o estaciones, incluyendo, en su caso, los tiempos de espera

<sup>207</sup> Recuérdese que la estructura de datos incorpora la posibilidad de considerar valores diferentes de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para vehículos motorizados de dos ruedas (motos o ciclomotores).



eventualmente perdidos en el acceso de los autobuses a la parada por ausencia de espacios libres de embarque y desembarque. En esta parte se pueden distinguir las siguientes componentes:

- El primer sumando de dicha parte representa el tiempo medio empleado, en cada trayecto completo, para el acceso o salida de pasajeros del vehículo de transporte público a lo largo de todas las paradas existentes en el sentido de circulación objeto de análisis (incluyendo terminales), por lo que podría calificarse también como el tiempo acumulado de servicio a pasajeros. Su cálculo parte del número medio de pasajeros que acceden a cada unidad de transporte o vehículo durante cada uno de los trayectos entre terminales inicial y final efectuados por dichas unidades. Este número se determina como el volumen de pasajeros por hora que hacen uso del modo de transporte público en la línea y sentido en estudio (variables  $q_{ijk}^{*0}$  en el año base y  $q_{ryijk}^{ms}$ , con  $m=0$  para el caso del autobús convencional) dividido entre la frecuencia del servicio (vehículos o unidades de transporte por hora)<sup>208</sup>. Esta última operación resulta equivalente a multiplicar por el intervalo  $h_{ryijk}^{ms}$  (o  $HS_{ijk}^*$  en el año base) transcurrido entre el paso de vehículos o unidades consecutivas, expresado aquel en horas (de ahí que en las ecuaciones aparezca dividido entre 60, como factor de conversión desde minutos a horas). Lógicamente, sobre el número de pasajeros resultante ha de aplicarse el tiempo medio por persona y movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en las condiciones previstas de densidad, el cual viene dado por las variables  $pst_{ryijk}^*$  o  $pst_{ryijk}^{ms}$  (como estas están expresadas en segundos, han de dividirse entre 60 para su conversión a minutos). Pero por otra parte, el número medio de pasajeros que acceden a cada vehículo o unidad ha de ser multiplicado por un factor que es igual a 2 menos el índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros a lo largo de las diferentes paradas. El valor 2 correspondería, en principio, a la situación más desfavorable posible en cuanto a la simultaneidad de los procesos de subida y bajada de viajeros (es decir, ausencia total de simultaneidad o equilibrio: en cada parada individual o bien solo acceden pasajeros o bien solo bajan viajeros). Dado que salvo para casos excepcionales esta situación sería irrealista, ha de restarse al valor 2 un índice (variable  $bas_{ryijk}$ ) que es representativo del mayor o menor grado de simultaneidad entre los dos procesos señalados. Recuérdese que este índice tomaría valor 0 si no existiese simultaneidad en absoluto (caso más desfavorable comentado anteriormente) y valor 1 si la simultaneidad fuese total (es decir, si en todas y cada una de las paradas el tiempo necesario para la subida de viajeros fuese igual al empleado para la bajada de los pasajeros que se apean, siendo este evidentemente el caso más favorable posible). Por consiguiente, la variable  $bas_{ryijk}$  tomará generalmente valores intermedios entre 0 y 1, en función de los datos introducidos en el epígrafe 5.5.3. Por último, se debe dividir el tiempo que así resultaría entre el número de canales de paso de acceso o de salida<sup>209</sup> (tomándose el valor más restrictivo o limitante entre ambos) con que se equipa el subtipo  $n$  de vehículo o unidad de transporte del modo  $m$  que opera la línea  $i$  (indicado por la variable  $TypV_r^m$ ). Este número de canales de paso se representa por la variable  $Ndc_n^m$ . Pero además, sobre dicho número se ha de aplicar el factor de eficacia unitaria de los canales de entrada/salida (variable  $fdp_n^m$ ), que tiene en cuenta el efecto de rendimiento marginal decreciente que se produce al añadir un canal de paso adicional sobre los previamente existentes (como consecuencia fundamentalmente del reparto no uniforme de pasajeros entre los distintos canales disponibles).

<sup>208</sup> Nótese que en el cálculo de esta componente del tiempo acumulado de estaciones o paradas no se ha introducido coeficiente de hora punta o de pico intrahorario alguno, ya que el objeto de esta parte de la formulación es obtener tiempos medios de operación, representativos por tanto de los atributos medios de viaje en transporte público para cada uno de los períodos horarios que se hayan definido.

<sup>209</sup> Cada canal de paso (*door channel*) de entrada o salida permite el flujo simultáneo —en uno u otro sentido— de una única fila o hilera de pasajeros, por lo que puede asimilarse a cada puerta simple o individual (de tal forma que una puerta doble contabilizaría como dos canales, pudiendo ser ambos de entrada, ambos de salida, o uno de entrada y otro de salida).

- El segundo sumando en el cálculo del tiempo acumulado de estaciones o paradas corresponde a la parte de dicho tiempo dedicada a los procesos de apertura y cierre de puertas<sup>210</sup> en el conjunto de paradas. El cálculo de este segundo sumando consiste en multiplicar el tiempo medio por parada destinado a dar cumplimiento a este tipo de procesos (variable  $oct_{rn}^m$  con  $m=0$ , que ha de ser dividida entre 60 para convertirla de segundos a minutos) por el número de veces que ha de ejecutarse la apertura y cierre en cada trayecto entre terminales inicial y final. En el caso de líneas convencionales (longitudinales de doble sentido), este número de veces coincide con el número total de estaciones o paradas (incluyendo ambas terminales extremas). En el caso de líneas circulares, es igual al número de paradas o estaciones (incluyendo la terminal de cierre) más uno. La cuestión es que, en cualquiera de los dos casos (línea longitudinal o circular), el número de veces que se aplican los procesos de apertura y cierre coincide a su vez con el número de tramos intermedios o secciones entre paradas de la línea (el cual viene indicado por la variable  $Nsc_i$ ) aumentado en una unidad. La utilización de esta variable en vez del número de paradas hace por tanto que la misma fórmula sea válida para ambos tipos de líneas. En cualquier caso, nótese que en estos cálculos se está considerando que todas las paradas se efectúan de forma preceptiva, independientemente de que pueda darse la circunstancia de que en alguna de ellas no se baje ni esté esperando a subir ningún pasajero. Esta misma consideración es aplicable también al siguiente punto.
- El tercer sumando en el tiempo total de detenciones relacionadas con paradas o estaciones corresponde a la demora de reincorporación a la circulación en tráfico mixto acumulada en el conjunto de paradas del trayecto completo. El punto de partida para la obtención de este término es, lógicamente, el valor que se haya calculado para la demora media de reincorporación del autobús convencional al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía, el cual está determinado por las variables  $rd_{rijk}^*$  o  $rd_{rijk}^s$  (divididas entre 60 como factor de conversión de segundos a minutos). A continuación debe plantearse cuántas paradas están afectadas por este fenómeno a lo largo del trayecto entre las terminales inicial y final (o entre dos circulaciones por la terminal de cierre en el caso de líneas de recorrido circular). Para ello, en primer lugar, ha de tenerse en cuenta que el número de veces que un autobús ha de reemprender la marcha en cada uno de estos trayectos es igual al número total de paradas o estaciones ( $Nst_i$ ) menos uno en el caso de líneas convencionales (longitudinales de doble sentido). Por su parte, para líneas circulares coincide con el número de paradas o estaciones de la línea ( $Nst_i$ ). Pero en cualquiera de los dos casos (línea longitudinal o circular), el número de veces que se reemprende la marcha resulta igual al número de tramos intermedios o segmentos entre paradas de la línea (dado por la variable  $Nsc_i$ , que se introduce como factor en la fórmula). Ahora bien, la demora de reincorporación a la circulación en tráfico mixto debe aplicarse solamente a la fracción de paradas o estaciones que efectivamente son de tipo entrante o en bahía (paradas 'off-line'). La variable  $ols_{ik}$  es la que indica dicho dato, por lo que aparece como un factor más en el cálculo de este término. Por último, ha de incorporarse la posible influencia de normas de circulación que obliguen a los conductores de vehículos particulares a ceder o facilitar la reincorporación a la circulación de los vehículos de transporte público desde una parada. La potencial reducción del tiempo de reincorporación originada por dicha obligación se introduce en la formulación mediante el factor  $1-yc_{rijk}$ , donde  $yc_{rijk}$  representa un índice o proporción de cumplimiento de la citada norma de circulación, con valores comprendidos entre 0 y 1. Recuérdese que en caso de que esta norma no esté vigente o no sea aplicable en una determinada división administrativa, la variable  $yc_{rijk}$  deberá haber tomado previamente valor 0. Por el contrario, le correspondería un valor 1 solamente si, además de estar vigente dicha norma, se garantizase un total y riguroso cumplimiento de la misma por parte de todos los conductores (circunstancia poco probable en la mayor parte de los casos).

<sup>210</sup> Puede incluir también, en el caso de los autobuses, el tiempo de activación del mecanismo de inclinación lateral o arrodillamiento (*kneeling*), si bien generalmente este puede considerarse simultáneo a la apertura de puertas.

- Por último, sobre la suma de estas tres componentes del tiempo de detenciones relacionadas con paradas o estaciones, ha de aplicarse el potencial incremento del mismo por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de las paradas, incorporando así los tiempos adicionales eventualmente perdidos por los autobuses mientras permanecen en espera de un espacio libre de embarque/desembarque en dichas paradas o estaciones. Este potencial incremento aparece reflejado en las correspondientes ecuaciones mediante el factor  $1 + \tau_{ryijk}^{0s}$  (o  $1 + \tau_{rijk}^*$  en el caso particular del año base), donde los valores de  $\tau_{rijk}^*$  y  $\tau_{ryijk}^{0s}$  han sido obtenidos en el epígrafe 8.3.4.4 en función del cociente entre el intervalo programado para la operación de la línea de autobús convencional y su intervalo mínimo de diseño. Recuérdese que estas variables toman valor 0 si dicho cociente ( $h/Hmin$ ) es mayor o igual que un cierto umbral, fijado en el modelo en 2.0.

Así pues, el cálculo del tiempo de operación para autobús convencional en tráfico mixto queda configurado según las siguientes ecuaciones:

**Para el año base**

$$To_{rijk}^* = \frac{L_i}{VFB_{rik}} \cdot 60 \cdot \left[ 1 + \alpha f_{rik} \cdot (VCR_{rijk}^*)^{\beta f_{rik}} \right] + \left[ q_{ijk}^{*0} \cdot \frac{Hs_{ijk}^*}{60} \cdot \frac{2 - bas_{rijk}}{fdp_{r,TypV_i^0}^0 \cdot Ndc_{TypV_i^0}^0} \cdot \frac{pst_{rijk}^*}{60} + (Nsc_i + 1) \cdot \frac{oct_{r,TypV_i^0}^0}{60} + Nsc_i \cdot ols_{ik} \cdot (1 - yc_{rijk}) \cdot \frac{rd_{rijk}^*}{60} \right] \cdot (1 + \tau_{rijk}^*) \quad (8.23.a)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0**

$$To_{ryijk}^{0s} = \frac{L_i}{VFB_{rik}} \cdot 60 \cdot \left[ 1 + \alpha f_{rik} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^{\beta f_{rik}} \right] + \left[ q_{ryijk}^{0s} \cdot \frac{h_{ryijk}^{0s}}{60} \cdot \frac{2 - bas_{rijk}}{fdp_{r,TypV_i^0}^0 \cdot Ndc_{TypV_i^0}^0} \cdot \frac{pst_{ryijk}^{0s}}{60} + (Nsc_i + 1) \cdot \frac{oct_{r,TypV_i^0}^0}{60} + Nsc_i \cdot ols_{ik} \cdot (1 - yc_{rijk}) \cdot \frac{rd_{ryijk}^s}{60} \right] \cdot (1 + \tau_{ryijk}^{0s}) \quad (8.23.b)$$

donde el intervalo genérico  $h$  se particulariza, según el tipo de bucle iterativo en ejecución, de la siguiente forma:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hb_{ryijk}^{0s}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hs_{ryijk}^{0s}$

En cuanto a los índices genéricos ( $r,s,y,i,j,k$ ) presentes en la ecuación 8.23.b, estos han de adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.4.5.b. Tiempo de operación para metro ligero o tranvía

El cálculo del tiempo de operación para metro ligero o tranvía ( $To_{ryijk}^{RR}$ ) se rige por la ecuación 8.24. Esta ecuación se configura a partir de las componentes que se indican a continuación:

- El primero de los sumandos tiene por objeto el cálculo del tiempo acumulado de recorrido de todos los tramos entre paradas o estaciones consecutivas, desde la terminal inicial hasta la final (o entre la salida y llegada a la terminal de cierre en el caso de líneas de recorrido circular). Por tanto, constituye el tiempo total que el vehículo de metro ligero o tranvía emplea en situaciones de circulación (incluyendo eventuales detenciones en caso de ser necesarias) en cada trayecto completo, fuera de las paradas. Su cálculo parte del tiempo teórico de recorrido en condiciones ideales de sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica (variable  $Trl_{ik}^m$ ), particularizado en este caso para el sistema de metro ligero o tranvía ( $m=R$ ) y para la línea y sentido objeto de estudio. Este tiempo teórico, el cual ha sido calculado únicamente a partir de parámetros cinemáticos básicos (aceleración y deceleración del vehículo, máxima velocidad programada u objetivo en cada tramo y longitud del tramo entre paradas) ha de ser dividido entre el valor del coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  para obtener de este modo el tiempo estimado en condiciones representativas de la operación real. Recuérdese que el coeficiente  $\omega_{ryijk}^m$  presenta siempre, por definición, valores positivos menores o iguales que 1, y que dichos valores dependen del intervalo entre vehículos o unidades de transporte público, siendo menores a medida que dicho intervalo desciende por debajo de un determinado umbral.
- Los dos restantes sumandos de la ecuación 8.24 constituyen el cálculo del tiempo acumulado de estaciones o paradas. Cada uno de estos sumandos corresponde a los siguientes componentes:
  - El segundo sumando de la ecuación 8.24 calcula el tiempo acumulado de servicio a pasajeros, es decir, el tiempo medio utilizado, en cada trayecto completo, para el acceso o salida de viajeros del vehículo de transporte público en todas las paradas existentes en el sentido de circulación bajo estudio, incluyendo las terminales. La estructura de este sumando es análoga a la utilizada para el cálculo del término equivalente en el caso del autobús convencional en tráfico mixto, por lo que se remite al lector a la explicación incluida en el epígrafe anterior. Lógicamente, en este caso han de adoptarse para las variables pertinentes los valores que corresponden al sistema de metro ligero o tranvía ( $m=R, s=R$ ).
  - El tercer sumando de la ecuación 8.24 corresponde a la parte del tiempo acumulado de estaciones o paradas destinada a las operaciones de apertura y cierre de puertas a lo largo del conjunto de paradas de un trayecto completo. De nuevo, la estructura de cálculo de este sumando es idéntica a la señalada para el término equivalente en el caso del autobús convencional en tráfico mixto (véase explicación en el epígrafe 8.3.4.5.a), pero tomando en esta ocasión el valor de la variable  $oct_m^m$  que corresponda a los vehículos de metro ligero o tranvía (es decir, con  $m=R$ ).

Por tanto, el tiempo de operación para metro ligero o tranvía se determina en el modelo según la formulación indicada a continuación:

**Para los módulos de cálculo M-R1, M-R2 y M-R3**

$$To_{ryijk}^{RR} = \frac{1}{\omega_{ryijk}^R} \cdot Trl_{ik}^R + q_{ryijk}^{RR} \cdot \frac{h_{ryijk}^{RR}}{60} \cdot \frac{2 - bas_{ryijk}}{fdp_{r,TypV_i^R}^R \cdot Ndc_{TypV_i^R}^R} \cdot \frac{pst_{ryijk}^{RR}}{60} + (Nsc_i + 1) \cdot \frac{oct_{r,TypV_i^R}^R}{60} \quad (8.24)$$

donde se particulariza el intervalo genérico  $h$  del siguiente modo, dependiendo del tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{RR} \equiv Hb_{ryijk}^{RR}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{RR} \equiv Hs_{ryijk}^{RR}$

Por su parte, los índices de carácter genérico  $(r,y,i,j,k)$  de la ecuación 8.24 deben adoptar los valores que se señalan a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = \left\{ Yma_r^R \right\}_{M-R1}, \left\{ Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1 \right\}_{M-R2}, \left\{ Yma_r^R + 1, \dots, Yap \right\}_{M-R3} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.4.5.c. Tiempo de operación para BHLS o BRT

El tiempo de operación para BHLS o BRT ( $To_{ryijk}^{BB}$ ) se calcula a través de la ecuación 8.25. A su vez, esta ecuación está compuesta por los términos que a continuación se describen:

- El primer sumando calcula el tiempo acumulado de recorrido de todos los tramos entre estaciones o paradas consecutivas, desde la inicial hasta la final (o entre la salida y llegada a la terminal de cierre para líneas de recorrido circular). Corresponde, como en los casos anteriores, al tiempo total que el autobús emplea en situaciones de circulación en cada trayecto completo, incluyendo las eventuales detenciones no relacionadas con las estaciones o paradas que pueda ser necesario efectuar. El cálculo de este término responde a la misma estructura que se indicó anteriormente para el caso del metro ligero o tranvía, pero tomando los valores particularizados de las variables que corresponden al sistema BHLS o BRT (es decir, con  $m=B$ ).
- Los restantes términos de la ecuación 8.25 tienen por objeto el cálculo del tiempo total de detenciones relacionadas con paradas o estaciones. En esta parte de la ecuación se pueden distinguir los siguientes componentes:
  - El primer sumando de la parte entre corchetes se encarga de calcular el tiempo medio empleado, en cada trayecto completo, para el acceso o salida de pasajeros del vehículo de transporte público a lo largo de todas las estaciones o paradas existentes en el sentido de circulación objeto de análisis (incluyendo terminales), es decir, el tiempo acumulado de servicio a pasajeros. La estructura del cálculo de este término es idéntica a la ya explicada para los casos de metro ligero o tranvía y autobús convencional en tráfico mixto (véase al respecto el epígrafe 8.3.4.5.a), pero adoptando para las variables oportunas los valores que correspondan al sistema de BHLS o BRT (por tanto, con  $m=B, s=B$ ).
  - El segundo sumando de la parte entre corchetes corresponde al tiempo dedicado a los procesos de apertura y cierre de puertas en el conjunto de paradas o estaciones. Una vez más, la configuración de este término es totalmente análoga a la ya indicada para los casos de metro ligero o tranvía y autobús convencional en tráfico mixto (véase epígrafe 8.3.4.5.a), pero tomando el valor de la variable  $oct_m^m$  particularizado para los vehículos del sistema BHLS o BRT ( $m=B$ ).
  - Finalmente, sobre la suma de las dos componentes anteriores se aplica el eventual incremento del tiempo de detenciones relacionadas con paradas o estaciones por efecto de la posible superación momentánea de la capacidad de las mismas. Este potencial aumento se incorpora mediante el factor  $1 + \tau_{ryijk}^{BB}$ , donde el valor de  $\tau_{ryijk}^{BB}$  ha sido calculado en el epígrafe 8.3.4.4 (con  $\tau_{ryijk}^{BB} = 0$  si el cociente entre el intervalo previsto para la operación de la línea de BHLS/BRT y su intervalo mínimo de diseño es mayor o igual que 2.0). Por último, nótese que en el caso del BHLS o BRT, a diferencia del autobús convencional en tráfico mixto, no se añade en el tiempo de detenciones relacionadas con paradas o estaciones la demora de reincorporación a la circulación, ya que, incluso si existen paradas de tipo entrante o en bahía (*off-line stops*), la salida del autobús desde dichas paradas se realiza directamente a la plataforma reservada, libre por tanto de la influencia del tráfico mixto.

Con todas estas premisas, el cálculo del tiempo de operación de una línea en BHLS o BRT queda configurado según la formulación siguiente:

**Para los módulos de cálculo M-B1, M-B2 y M-B3**

$$To_{ryijk}^{BB} = \frac{1}{\omega_{ryijk}^B} \cdot Trl_{ik}^B + \left[ q_{ryijk}^{BB} \cdot \frac{h_{ryijk}^{BB}}{60} \cdot \frac{2 - bas_{rijk}}{fdp_{r,TypV_i^B}^B \cdot Ndc_{TypV_i^B}^B} \cdot \frac{pst_{ryijk}^{BB}}{60} + (Nsc_i + 1) \cdot \frac{oct_{r,TypV_i^B}^B}{60} \right] \cdot (1 + \tau_{ryijk}^{BB}) \quad (8.25)$$

donde el intervalo genérico  $h$  se particulariza de la siguiente forma, atendiendo al tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{BB} \equiv Hb_{ryijk}^{BB}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{BB} \equiv Hs_{ryijk}^{BB}$

Por lo que respecta a los índices genéricos  $(r,y,i,j,k)$  presentes en la ecuación 8.25, estos han de tomar los valores indicados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; y = \left\{ Yma_r^B \right\}_{M-B1}, \left\{ Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1 \right\}_{M-B2}, \left\{ Yma_r^B + 1, \dots, Yap \right\}_{M-B3} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**8.3.4.6. Velocidad media de operación del transporte público**

La variable  $Vo_{ryijk}^{ms}$  señala, para la simulación aleatoria  $r$ , la velocidad media de operación del modo  $m$  de transporte público existente en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación, para el caso de la línea  $i$  recorrida durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Su variable equivalente para el año base se designa como  $Vo_{rijk}^*$ , donde se omiten, por innecesarios, los índices correspondientes al modo ( $m$ ), al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

Las unidades utilizadas en la formulación del modelo para las variables  $Vo_{ryijk}^{ms}$  y  $Vo_{rijk}^*$  son kilómetros por hora [km/h].

La velocidad de operación se define como la velocidad promedio de un vehículo o unidad de transporte público a lo largo del trayecto de una línea, entre los dos puntos terminales de la misma (Vuchic, 2005: p. 20; Molinero y Sánchez, 2005: pp. 403-404). Incluye por tanto los tiempos de estación o parada, así como cualesquiera otras demoras en los tramos intermedios. La velocidad de operación constituye la medida más representativa de la velocidad media de desplazamiento ofrecida a los usuarios del transporte público en la etapa de su viaje en la que permanecen a bordo del vehículo.

De acuerdo a la definición de velocidad de operación, las variables  $Vo_{rijk}^*$  y  $Vo_{ryijk}^{ms}$  se calculan como la longitud de la línea en kilómetros (variable  $L_i$ ) dividida entre el tiempo de operación<sup>211</sup> que corresponda a cada modo de transporte público objeto de estudio ( $To_{rijk}^*$  o  $To_{ryijk}^{ms}$ , debiendo expresarse en horas). Esto da lugar a las ecuaciones 8.26.a y 8.26.b, donde el factor 60 aparece como elemento de conversión entre minutos y horas. En conclusión se aplican, para el año base y para los demás módulos de cálculo, las siguientes formulaciones:

**Para el año base**

$$Vo_{rijk}^* = 60 \cdot \frac{L_i}{To_{rijk}^*} \quad (8.26.a)$$

<sup>211</sup> Obsérvese que en este caso el tiempo de operación está incluyendo también el tiempo de estación o parada (servicio a pasajeros) en las terminales inicial y final (pero no el tiempo adicional de terminales propiamente dicho), por lo que la velocidad de operación así calculada podría interpretarse como la experimentada por un viajero que accediese el primero al vehículo en la terminal inicial del trayecto y se apease el último en la terminal de final de ruta.

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$Vo_{ryijk}^{ms} = 60 \cdot \frac{L_i}{To_{ryijk}^{ms}} \quad (8.26.b)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m = \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R & \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.5. Obtención de atributos del transporte público

#### 8.3.5.1. Tiempo medio a bordo del vehículo para los usuarios del transporte público

La variable  $tv_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo medio consumido por cada pasajero a bordo del vehículo del modo  $m$  de transporte público existente en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, en los viajes realizados en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$  (dada una determinada distancia media recorrida por cada usuario,  $Ltpb_{ijk}$ ). Para el caso particular del año base se define su variable equivalente  $tv_{rijk}^*$ , en la que se omiten los índices innecesarios correspondientes a modo ( $m$ ), escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).

En la presente modelización, la unidad de tiempo utilizada para expresar numéricamente las variables  $tv_{ryijk}^{ms}$  y  $tv_{rijk}^*$  es el minuto [min].

Este atributo representa el tiempo medio que los usuarios de una cierta línea de transporte público precisan invertir en la etapa de su viaje —en un determinado sentido— en la que permanecen a bordo del vehículo, dadas unas ciertas condiciones de operación (cambiantes según el período horario). Por tanto, las variables  $tv_{rijk}^*$  y  $tv_{ryijk}^{ms}$  se calculan —dado el nivel de agregación del modelo— dividiendo la distancia media recorrida por cada pasajero desde la parada o estación de subida hasta la parada o estación de bajada (variable  $Ltpb_{ijk}$ ) entre la velocidad de operación del transporte público (variables  $Vo_{rijk}^*$  o  $Vo_{ryijk}^{ms}$ ). Este planteamiento conduce a las ecuaciones 8.27.a y 8.27.b, en las que el factor 60 aparece como elemento de conversión de horas a minutos. Así pues se obtiene:

Para el año base

$$tv_{rijk}^* = 60 \cdot \frac{Ltpb_{ijk}}{Vo_{rijk}^*} \quad (8.27.a)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$tv_{ryijk}^{ms} = 60 \cdot \frac{Ltpb_{ijk}}{Vo_{ryijk}^{ms}} \quad (8.27.b)$$

donde todos los índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$  presentes en la ecuación 8.27.b han de adoptar idénticos valores a los indicados anteriormente en la ecuación 8.26.b para el cálculo de la variable  $Vo_{ryijk}^{ms}$ .

### 8.3.5.2. Incremento del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos

A continuación se procede a incorporar en la modelización el efecto que sobre el coste unitario o desutilidad del tiempo de viaje en transporte público ejerce el hecho de que el pasajero se vea obligado a tener que viajar de pie (en contraposición a disponer de algún asiento libre en el vehículo), así como la influencia del nivel de aglomeración o densidad de pasajeros de pie existente en dichos vehículos.

Las revisiones probablemente más completas y destacables sobre los distintos estudios relativos a la congestión o aglomeración de viajeros (*crowding*) en sistemas de transporte público y su correspondiente valoración se deben a Wardman y Whelan (2011) y a Li y Hensher (2011). La primera de estas revisiones está centrada fundamentalmente en una serie de 17 estudios realizados en el Reino Unido para viajes efectuados en transporte ferroviario, incluyendo un meta-análisis realizado por los autores a partir de dicho conjunto de estudios. La segunda revisión (Li y Hensher, 2011), aunque se basa en un menor número de estudios, incluye un ámbito geográfico más diverso (Reino Unido, Australia, Estados Unidos e Israel) y una mayor variedad de modos de transporte público colectivo (si bien es cierto que el ferrocarril sigue siendo mayoritario). Por otra parte, a diferencia de Wardman y Whelan (2011), Li y Hensher (2011) se centran no solamente en la congestión o aglomeración de viajeros a bordo de los vehículos, sino que incorporan también algunos estudios que analizaron la congestión en las vías de acceso, en las zonas de entrada y en los andenes y estaciones de los sistemas de transporte público. No obstante, la gran mayoría de estudios sobre la valoración de la congestión o aglomeración de viajeros en transporte público se han focalizado en las condiciones experimentadas por los viajeros a bordo de los vehículos (Li y Hensher, 2011), de tal forma que la modelización desarrollada en esta tesis también se centra únicamente en la congestión o aglomeración en los vehículos o unidades de transporte. Por otra parte, otro amplio y completo estudio sobre la congestión o aglomeración de pasajeros en sistemas de transporte público se debe a Tirachini *et al.* (2013). Estos autores analizan la problemática de la congestión o aglomeración de viajeros en transporte público desde un enfoque multidimensional referido a la demanda, a la oferta y a aspectos operativos, incluyendo diversos efectos sobre la velocidad de operación, tiempos de espera, fiabilidad del tiempo de viaje, bienestar del pasajero, valoración de los ahorros de tiempo de espera y tiempo en el vehículo, elección de ruta, así como sobre los niveles óptimos de frecuencia, tamaño de los vehículos y tarifas. Analizan además la influencia de la congestión o aglomeración de pasajeros en el valor estimado de los ahorros de tiempo en el vehículo y en la predicción de la demanda para servicios de metro, ferrocarril y autobús en Sydney. Una destacable conclusión es que el impacto de la congestión o aglomeración de viajeros debe considerarse desde las primeras etapas de la evaluación de proyectos o políticas de transporte público, ya que el diseño del sistema y la estimación de la demanda y sus beneficios socioeconómicos dependen en gran medida de



que se incorporen los efectos de la congestión o aglomeración de pasajeros en la evaluación formal de tales proyectos (Tirachini *et al.*, 2013).

En cuanto a las causas de índole física y psicológica que están detrás del impacto negativo que los fenómenos de congestión y aglomeración de pasajeros tienen sobre el bienestar y salud de los viajeros (y que por tanto provocan un aumento de la desutilidad o coste del tiempo de viaje), se han identificado en la literatura relativa a este tema diversos factores. Según se recopila en Tirachini *et al.* (2013), aparte de la propia incomodidad de compartir un espacio físico limitado con varias personas, se pueden destacar: aumento de la ansiedad, stress y sensación de agotamiento, percepción de riesgo para la seguridad personal, sensación de invasión de la privacidad, sensación de una mayor propensión a llegar tarde al trabajo o a otra cita, así como posible pérdida de productividad del tiempo para aquellos pasajeros que podrían realizar algún tipo de trabajo –o actividades de otros tipos– mientras permanecen sentados en los vehículos de transporte público.

En principio, el coste o valor negativo de la congestión o aglomeración de pasajeros puede ser medido por medio de tres vías alternativas (Li y Hensher, 2011): como un multiplicador adimensional del tiempo (o del coste de dicho tiempo), como un incremento aditivo del coste o valor monetario por unidad de tiempo (por ejemplo, en €/h), o como un coste o valor monetario por cada viaje (por ejemplo, en €/viaje). Para la modelización presentada en esta tesis se ha adoptado el primero de los enfoques (factores multiplicadores), ya que estos resultan inherentemente mucho más transferibles entre distintas áreas geográficas y entre grupos de viajeros de diferentes características que las valoraciones basadas en unidades monetarias sin adimensionalizar (Wardman y Whelan, 2011). Además, la valoración mediante factores multiplicadores es la práctica más común en la literatura consultada sobre esta materia. En algunos casos singulares (Kroes *et al.*, 2014) se ha encontrado que una especificación con una desutilidad constante por viaje (en la línea del tercer enfoque) proporcionaba un mejor ajuste a los datos procedentes de encuestas en preferencias declaradas (SP) que la utilización de multiplicadores del tiempo de viaje. Sin embargo, incluso en el caso citado (Kroes *et al.*, 2014), los autores prefieren adoptar el desarrollo de factores multiplicadores para su uso en aplicaciones prácticas, argumentando que las penalizaciones por congestión o aglomeración que son proporcionales al tiempo de viaje pueden ser fácilmente incorporadas a los modelos empleados con fines de evaluación, mientras que las penalizaciones constantes por viaje serían mucho más problemáticas de utilizar en la práctica.

Por otra parte, se puede destacar que la gran mayoría de los estudios que han afrontado la valoración de la congestión o aglomeración de viajeros en sistemas de transporte público están basados en datos provenientes de la realización de encuestas en preferencias declaradas (SP). Una notable excepción a este hecho la constituye el estudio desarrollado por Tirachini *et al.* (2016), que obtiene valores de los multiplicadores para pasajeros de pie en el metro de Singapur mediante datos tomados de preferencias reveladas (RP). Un enfoque mixto, utilizando datos tanto de preferencias declaradas (SP) como de reveladas (RP), fue el adoptado por Batarce *et al.* (2015) para analizar la valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros en el transporte público colectivo de Santiago de Chile (con los datos en preferencias reveladas procedentes de elecciones observadas en la red de metro). También en Kroes *et al.* (2014) puede encontrarse un intento de contrastar los resultados de modelos realizados a partir de encuestas en preferencias declaradas (SP) mediante observaciones directas de preferencias reveladas (RP), apuntándose que este último método parece conducir a valoraciones inferiores de los efectos de la congestión o aglomeración del transporte público sobre las elecciones de los viajeros.

En conclusión, en lo que concierne a la modelización desarrollada en esta tesis, la influencia de la congestión o aglomeración de viajeros en transporte público se materializa, a efectos de cálculo, mediante la aplicación de un factor multiplicador sobre el coste básico o estándar del tiempo de viaje a bordo del transporte público. Para ello se define este último coste como el aplicable a pasajeros sentados sin presencia de otros pasajeros de pie (es decir, en situaciones en las que la densidad de pasajeros de pie es nula). La revisión de la bibliografía consultada revela que el valor de este factor multiplicador depende, principalmente, de que el viajero se encuentre sentado o de pie y del nivel de

concentración de pasajeros de pie existente en cada situación (expresado este nivel mediante la densidad de pasajeros de pie o mediante la tasa de ocupación por asiento o ‘load factor’<sup>212</sup>).

Por tanto, para poder aplicar convenientemente dicho factor multiplicador es necesario, en primer lugar, segmentar las distintas circunstancias experimentadas por los pasajeros a lo largo de su viaje a bordo del vehículo de transporte público en tres grupos de posibles situaciones:

- Pasajeros sentados en secciones (tramos intermedios entre paradas) en las que todos los demás viajeros están también sentados (es decir, no existen pasajeros de pie en esa sección al ser el número de asientos suficiente para todos ellos).
- Pasajeros que viajan sentados en secciones en las que se da la presencia de viajeros de pie (con una densidad determinada, distinta de cero, ya que el número total de pasajeros en el vehículo en esa sección excede el número de asientos).
- Pasajeros que efectivamente viajan de pie (aplicable a las mismas secciones que el punto anterior).

Evidentemente, cada pasajero individual puede experimentar a lo largo de su desplazamiento entre la parada de origen y la de destino cada una de estas situaciones en diferentes secciones o puntos del viaje. Por ello, la magnitud elemental para cuantificar la fracción o proporción que, sobre el total, corresponda a cada una de estas tres situaciones ha de ser el ‘pasajero-distancia’<sup>213</sup> (expresado usualmente en unidades de pasajero-km) en lugar del pasajero individual propiamente dicho.

Una vez que se haya establecido la cuantía de estas fracciones o proporciones, el siguiente paso ha de consistir en determinar el valor de los multiplicadores parciales aplicables a cada uno de los tres grupos de situaciones definidos anteriormente. En el caso del primero de ellos (pasajeros sentados en ausencia de pasajeros de pie) no es necesario realmente efectuar —bajo las premisas establecidas en el desarrollo de la presente modelización— cálculo alguno, ya que el factor multiplicador a aplicar a estas situaciones es directamente la unidad, puesto que corresponden al conjunto de condiciones para las que se define el coste básico o estándar del tiempo de viaje. En el caso de los otros dos grupos, el cálculo de sus multiplicadores parciales debe capturar la influencia de la mayor o menor concentración de pasajeros de pie experimentada por los usuarios incluidos en dichos grupos.

Finalmente, se procederá a ponderar cada multiplicador parcial por la fracción de pasajeros (o, estrictamente hablando, de pasajeros-km) a la que afecta, de modo que se obtenga un multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del modo de transporte público bajo estudio por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en sus vehículos.

Así pues, a continuación se detalla cada uno de los pasos desarrollados específicamente en la presente tesis al objeto de tratar de incorporar este efecto al tipo de modelo planteado.

### 8.3.5.2.a. Fracción de pasajeros sentados con presencia de otros pasajeros de pie

La variable  $NSP_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de pasajeros-km (sobre el total) que son realizados por pasajeros que viajan sentados en secciones o tramos entre paradas en los que se da la presencia de otros pasajeros de pie, para los viajes efectuados a bordo del vehículo del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello en las condiciones relativas al escenario  $s$  y al año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación. Su

<sup>212</sup> La tasa de ocupación por asiento (denominada habitualmente en la literatura anglosajona como ‘load factor’, literalmente factor de carga) se define como el número de ocupantes en el vehículo (tanto sentados como de pie) dividido entre el número de asientos que equipa dicho vehículo, expresándose normalmente como porcentaje. Así, una tasa de ocupación por asiento de, por ejemplo, el 200% significaría que la mitad de los pasajeros han de permanecer de pie, mientras que la otra mitad disponen de asiento.

<sup>213</sup> Rigurosamente, se debería considerar como magnitud elemental el ‘pasajero-tiempo’ (por ejemplo con unidades de pasajero-minuto) para reflejar con mayor nivel de exactitud el tiempo que el conjunto de viajeros experimentan en cada situación, ya que es esta magnitud —y no tanto la distancia— la realmente decisiva. Nótese que ambos planteamientos coincidirían si la velocidad de operación del transporte público fuese realmente uniforme a lo largo de la línea.

variable equivalente para el año base se designa como  $NSP^*_{ijk}$ , donde se omiten, por innecesarios, los índices correspondientes al escenario ( $s$ ), al modo ( $m$ ), al año ( $y$ ) y a la simulación aleatoria ( $r$ ).

Se trata, en cualquiera de los dos casos, de variables de tipo adimensional.

La variable  $NSP^*_{ijk}$  (o  $NSP^*_{ijk}$ ) trata de representar el cociente entre el número de pasajeros-km que se efectúan por parte de pasajeros que pueden viajar sentados en aquellas secciones en las que se produce simultáneamente la presencia de otros pasajeros de pie, y el volumen total de pasajeros-km acumulados en los tres grupos de posibles situaciones que se definieron anteriormente, todo ello dadas unas ciertas condiciones de operación que son propias de cada línea, período horario, sentido, etc. Por tanto, se deduce conceptualmente que esta fracción o proporción puede definirse en esta tesis como <sup>214</sup>:

$$NSP = \frac{\int_0^L Nse \cdot f \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{\int_0^L P(s) \cdot ds} \quad (8.28)$$

donde  $L$  representa la longitud de la línea;  $Nse$  es el número de asientos en cada vehículo o unidad de transporte;  $f$  representa la frecuencia de operación (en  $h^{-1}$ );  $P(s)$  es el volumen de pasajeros por hora que pasan, en un determinado sentido, por el punto o sección diferencial dado por la coordenada longitudinal  $s$ ; y  $H_0$  representa la función escalón de Heaviside <sup>215</sup> especificada de tal forma que devuelva el valor 0 cuando el argumento es igual a 0. Recuérdese además que la integral entre 0 y  $L$  de  $P(s) \cdot ds$  es igual, por definición, al producto  $\delta \cdot L \cdot PM$ .

No obstante, la obtención de los valores de las variables  $NSP^*_{ijk}$  y  $NSP^*_{ijk}$  se efectúa, por lo que al modelo respecta, mediante la serie de ecuaciones comprendidas entre la 8.29.a.i y 8.29.b.ii. Estas son expresiones aproximadas o simplificadas de la ecuación 8.28, formuladas en base a la hipótesis de que el volumen de pasajeros en los distintos puntos o secciones diferenciales del recorrido de la línea se distribuye o reparte de forma lineal (independientemente del orden físico de dichas secciones) entre la sección de máxima demanda y aquella otra sección que presente un menor volumen de viajeros. Además, para los casos en los que el coeficiente  $\delta_{ijk}$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea) sea menor de 0.5, la hipótesis de reparto lineal entre máximo y mínimo lleva aparejada la existencia teórica de uno o más puntos o secciones en los que el número de pasajeros sea nulo, de ahí que el cálculo de la variable  $NSP^*_{ijk}$  (o  $NSP^*_{ijk}$ ) presente una formulación específica para dichos casos. Se trata, en suma, del mismo tipo de hipótesis que se había supuesto para el cálculo de la densidad de pasajeros de pie a lo largo de la línea (variables  $DavI^*_{ijk}$  y  $DavI^*_{ijk}$ , en el epígrafe 8.3.2.4.b).

Así pues, las variables  $NSP^*_{ijk}$  y  $NSP^*_{ijk}$  se evalúan atendiendo a los procedimientos indicados a continuación para el año base y para los posteriores módulos de cálculo, respectivamente.

<sup>214</sup> Nótese que en las ecuaciones 8.28, 8.30, 8.32, 8.33 y 8.35 se asume implícitamente la condición simplificadora de reparto uniforme de los viajeros entre los distintos vehículos que operan el servicio durante un mismo período horario.

<sup>215</sup> La función escalón de Heaviside,  $H(x)$ , toma valor 0 para argumentos negativos y valor 1 para argumentos positivos. El valor de la función para un argumento igual a 0 se puede especificar de varias formas alternativas (usualmente  $\frac{1}{2}$  o 1). En este caso particular se debe definir como  $H_0(0)=0$ , de ahí que a la función  $H$  se le haya añadido el subíndice 0.

Para el año base

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$  :

$$NSP_{ijk}^* = 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^0}^0}{PM_{ijk}^* \cdot HS_{ijk}^*} \cdot \min \left\{ 1, \frac{\max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^0}^0}{PM_{ijk}^* \cdot HS_{ijk}^*}, 0 \right\}}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})} \right\} \cdot \frac{1}{\delta_{ijk}} \quad (8.29.a.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$  :

$$NSP_{ijk}^* = 2 \cdot \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^0}^0}{PM_{ijk}^* \cdot HS_{ijk}^*}, 0 \right\} \cdot 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^0}^0}{PM_{ijk}^* \cdot HS_{ijk}^*} \quad (8.29.a.ii)$$

donde los índices  $(i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.29.a.i y 8.29.a.ii adoptan los siguientes valores:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$  :

$$NSP_{ryijk}^{ms} = 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}} \cdot \min \left\{ 1, \frac{\max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}, 0 \right\}}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})} \right\} \cdot \frac{1}{\delta_{ijk}} \quad (8.29.b.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$  :

$$NSP_{ryijk}^{ms} = 2 \cdot \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}, 0 \right\} \cdot 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}} \quad (8.29.b.ii)$$

En las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii el intervalo genérico  $h$  se particulariza, según el tipo de bucle iterativo en ejecución, del siguiente modo:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv HS_{ryijk}^{ms}$

Por su parte, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii deben tomar los valores indicados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} =0 \quad \text{si } s=0 \\ =0 \quad \text{si } s=R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ =R \quad \text{si } s=R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ =0 \quad \text{si } s=B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ =B \quad \text{si } s=B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\};$$

$$i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \left\{ \begin{array}{l} =1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ =1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.3.5.2.b. Fracción de pasajeros de pie

La variable  $SSP_{ryijk}^{ms}$  define, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de pasajeros-km (sobre el total) que corresponden a pasajeros viajando de pie, para el conjunto de viajes efectuados a bordo del vehículo del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dadas las condiciones relativas al escenario  $s$  y al año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Para el caso particular del año base se define asimismo su variable equivalente  $SSP_{ijk}^*$ , en la cual se prescinde de los índices innecesarios correspondientes al escenario ( $s$ ), al modo ( $m$ ), al año ( $y$ ) y a la simulación aleatoria ( $r$ ).

Tanto la variable  $SSP_{ryijk}^{ms}$  como su equivalente  $SSP_{ijk}^*$  son, de nuevo, de tipo adimensional.

Más detalladamente, las variables  $SSP_{ryijk}^{ms}$  y  $SSP_{ijk}^*$  están destinadas a representar el cociente entre el número de pasajeros-km que son realizados por pasajeros que se ven obligados a viajar de pie y el volumen total de pasajeros-km que corresponde conjuntamente a los tres grupos de posibles situaciones definidas al principio del epígrafe 8.3.5.2, dadas las condiciones de operación establecidas para cada línea, período horario, sentido de viaje, etc. Se deduce por tanto que este cociente, expresado en términos matemáticos, toma en esta tesis la siguiente forma:

$$SSP = \frac{\int_0^L (P(s) - Nse \cdot f) \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{\int_0^L P(s) \cdot ds} \quad (8.30)$$

donde todas las variables y funciones presentan los mismos significados que ya se expusieron en el caso de la ecuación 8.28.

A efectos prácticos, los valores de las variables  $SSP_{ijk}^*$  y  $SSP_{ryijk}^{ms}$  se obtienen en el modelo de acuerdo a las expresiones señaladas a continuación para el año base (ecuaciones 8.31.a.i y 8.31.a.ii) y para los módulos de cálculo posteriores (ecuaciones 8.31.b.i y 8.31.b.ii). Al igual que en el caso de las variables  $NSP_{ijk}^*$  y  $NSP_{ryijk}^{ms}$ , se trata de formulaciones que pretenden reflejar una razonable aproximación a la complejidad de las situaciones reales, estando desarrolladas bajo las mismas hipótesis simplificadoras que en el caso anterior.

#### Para el año base

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$ :

$$SSP_{ijk}^* = \min \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse^0 \cdot TypV_i^0}{PM_{ijk}^* \cdot Hs_{ijk}^*}, 0 \right\} \right)^2}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})} \cdot \frac{1}{\delta_{ijk}}, 1 - NSP_{ijk}^* \right\} \quad (8.31.a.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$  :

$$SSP_{ijk}^* = \left( \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^0}^0}{PM_{ijk}^* \cdot HS_{ijk}^*}, 0 \right\} \right)^2 \quad (8.31.a.ii)$$

donde los índices  $(i,j,k)$  de las ecuaciones 8.31.a.i y 8.31.a.ii han de adoptar los valores siguientes:

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $\delta_{ijk} > 0.5$  :

$$SSP_{ryijk}^{ms} = \min \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}, 0 \right\} \right)^2}{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})} \cdot \frac{1}{\delta_{ijk}}, 1 - NSP_{ryijk}^{ms} \right\} \quad (8.31.b.i)$$

Si  $\delta_{ijk} \leq 0.5$  :

$$SSP_{ryijk}^{ms} = \left( \max \left\{ 1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i^m}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}, 0 \right\} \right)^2 \quad (8.31.b.ii)$$

En las ecuaciones 8.31.b.i y 8.31.b.ii se particulariza el intervalo genérico  $h$  de la siguiente forma, dependiendo del tipo de bucle iterativo en ejecución:

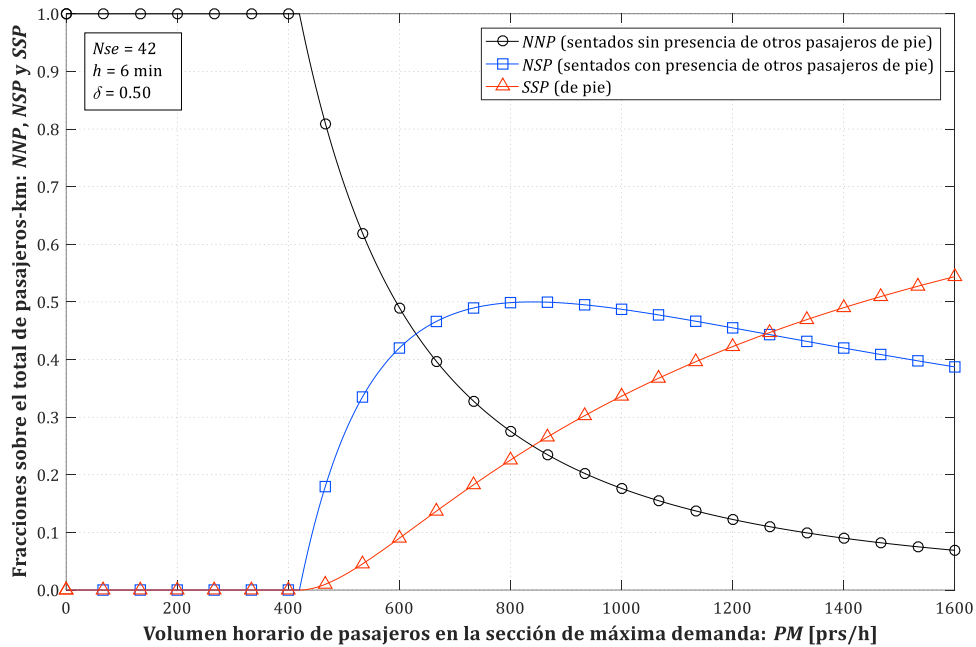
- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Además, todos los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.31.b.i y 8.31.b.ii han de recibir los mismos valores que se señalaron previamente en las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii para el cálculo de la variable  $NSP_{ryijk}^{ms}$ .

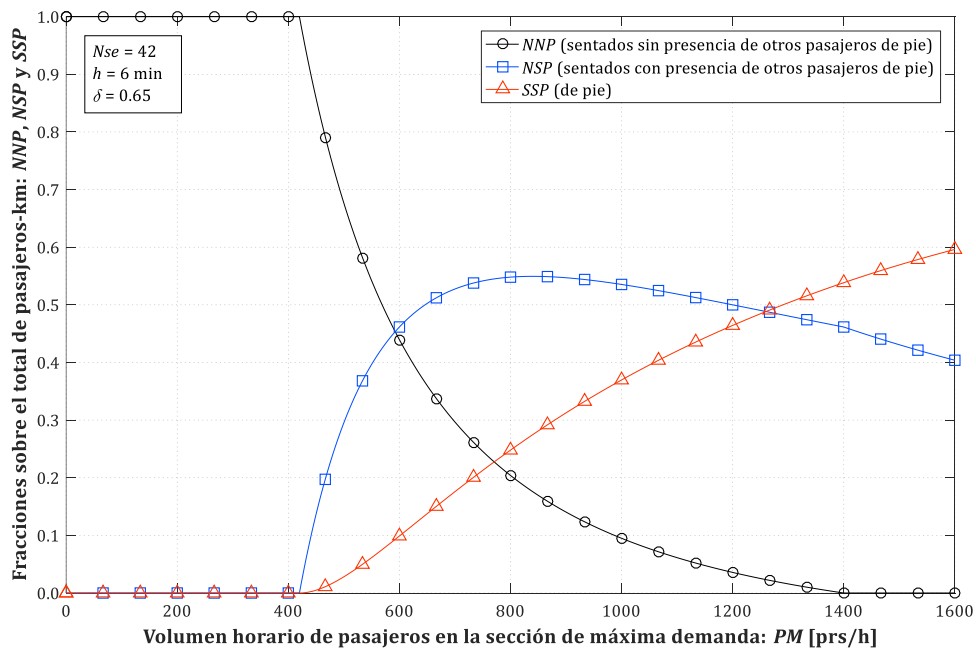
Finalmente las Figuras 8.9, 8.10 y 8.11 ilustran, a título de ejemplo, los resultados obtenidos en el cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-km correspondientes a cada uno de los tres grupos de situaciones posibles. Dichos resultados se presentan en función del volumen de pasajeros que atraviesan, en un determinado sentido, la sección de máxima demanda de la línea durante una hora (denotado como  $PM$ ), y han sido calculados a partir de hipotéticos valores de los argumentos de las respectivas ecuaciones (8.29.a.i a 8.29.b.ii y 8.31.a.i a 8.31.b.ii). Concretamente, los valores fijados han sido:  $Nse = 42$  (plazas);  $h = 6$  min. Por su parte, para el coeficiente  $\delta$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la línea) se han tomado, en las distintas figuras, tres valores diferentes:  $\delta = 0.50$  (Figura 8.9);  $\delta = 0.65$  (Figura 8.10);  $\delta = 0.80$  (Figura 8.11). Nótese además que, para poder mostrar de un modo más claro el comportamiento de las distintas proporciones con el aumento del volumen horario de pasajeros  $PM$ , en estos ejemplos se ha mantenido constante el intervalo  $h$  (igual a 6 minutos independientemente del volumen de pasajeros), a pesar de que en la aplicación del modelo propuesto el intervalo se readaptaría en función del respectivo volumen de diseño. Por otra parte, obsérvese también que en estas figuras se ha introducido la variable auxiliar  $NNP$ , que no es más que la fracción o proporción correspondiente a pasajeros sentados en secciones en las que no existen pasajeros de pie. Dicha proporción, que estrictamente se definiría en esta tesis según la ecuación 8.32 (con los

mismos significados de variables y funciones que en 8.28 y 8.30), puede obtenerse de forma más simple como  $1-(NSP+SSP)$ .

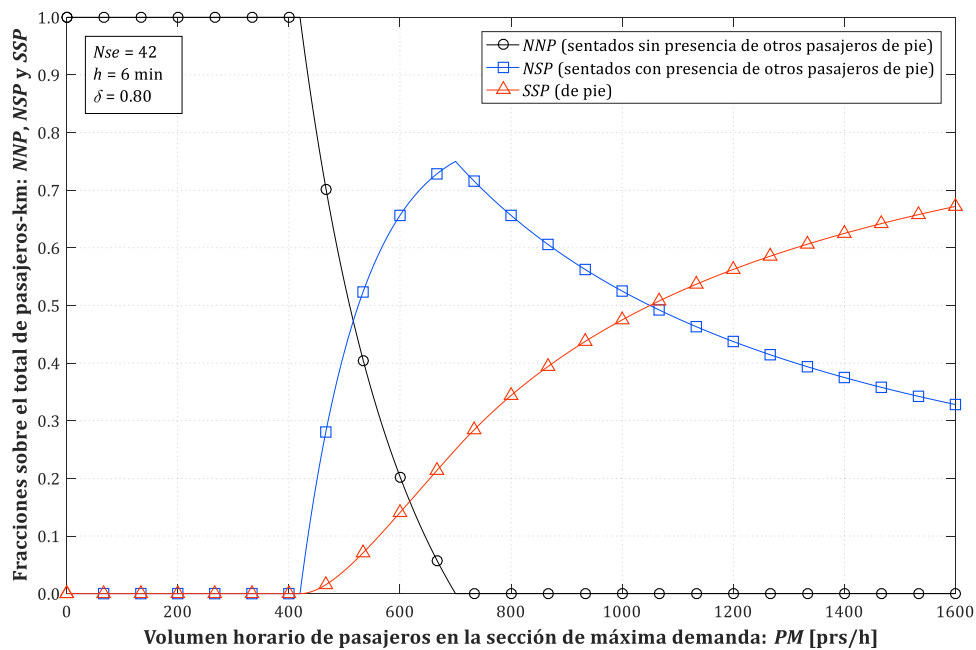
$$NNP = \frac{\int_0^L P(s) \cdot [1 - H_0(P(s) - Nse \cdot f)] \cdot ds}{\int_0^L P(s) \cdot ds} \tag{8.32}$$



**Figura 8.9.** Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y  $\delta=0.50$ .



**Figura 8.10.** Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y  $\delta=0.65$ .



**Figura 8.11.** Ejemplo de cálculo de las fracciones o proporciones de pasajeros-kilómetro correspondientes a cada una de las posibles situaciones de los pasajeros en cuanto a disponibilidad de asientos libres, con intervalo fijo entre vehículos y  $\delta=0.80$ .

**8.3.5.2.c. Multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie**

La variable  $Mcns_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el valor del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público aplicable a la fracción de pasajeros<sup>216</sup> que viajan sentados en secciones o tramos entre paradas en los que se da la presencia de otros pasajeros de pie (en función del nivel de concentración de estos últimos), para viajes efectuados a bordo del vehículo del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones correspondientes al escenario  $s$  y al año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación. Para el caso del año base se define su variable equivalente  $Mcns^*_{rijk}$ , en la que se prescinde, por innecesarios, de los índices correspondientes a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ) y año ( $y$ ).

La variable  $Mcns_{ryijk}^{ms}$ , así como su equivalente  $Mcns^*_{rijk}$ , son de tipo adimensional.

En la bibliografía disponible sobre la valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros en sistemas de transporte público puede apreciarse que existe una notable disparidad en los valores obtenidos para los multiplicadores del coste o desutilidad del tiempo de viaje. Una buena muestra de este hecho queda recogida por Wardman y Whelan (2011) en la Tabla 4 y en el Apéndice 1 de dicha referencia. Además es común la utilización de diferentes indicadores para graduar el nivel de aglomeración de pasajeros al que están expuestos los usuarios del transporte público (tasa de ocupación por asiento, densidad de pasajeros de pie o, en ocasiones, medidas simplemente cualitativas), lo cual dificulta adicionalmente la comparabilidad entre estudios. Este conjunto de hechos permite dilucidar que la valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros —y consecuentemente la selección de los multiplicadores de tiempo de viaje a aplicar en la modelización— está en general sujeta a un nivel de incertidumbre bastante elevado. Por todo ello, en el modelo desarrollado se ha optado por un enfoque aleatorizado en el que los valores de los multiplicadores parciales del coste unitario del tiempo de viaje para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie (variables  $Mcns_{ryijk}^{ms}$  o  $Mcns^*_{rijk}$ ) se obtienen de acuerdo a una distribución triangular de probabilidad a partir de la componente aleatoria  $TRMcns_r$ , la cual procede, para cada simulación, de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y

<sup>216</sup> Recuérdese que, estrictamente hablando, esta fracción o proporción se establece en términos de pasajeros-km.



moda  $\frac{1}{2}$ ) sobre la que se generaron en su momento las correspondientes extracciones (epígrafe 6.4.3.1). En consecuencia, es preciso definir las funciones o expresiones matemáticas que establecen el mínimo, la moda y el máximo de la distribución triangular final de este multiplicador en función del grado de aglomeración de pasajeros experimentado por los usuarios del transporte público bajo unas determinadas condiciones de operación.

Al respecto cabe plantear de inicio dos cuestiones. Una primera cuestión es establecer la forma funcional de dichas expresiones. La segunda cuestión, que se abordará posteriormente, consiste en cuantificar la densidad de pasajeros de pie que se debe utilizar como variable independiente en dichas funciones, con el fin de que represente lo más fielmente posible el valor medio de este atributo tal como es experimentado por el grupo de pasajeros objeto de estudio.

En relación con la forma funcional, la práctica común es utilizar formulaciones lineales para la estimación de los valores de los multiplicadores de tiempo de viaje en función de la tasa de ocupación por asiento (o, en su caso, de la densidad de pasajeros de pie), aunque esta práctica no tiene por qué estar necesariamente justificada por los datos empíricos (Wardman y Whelan, 2011), sino que responde más bien a cuestiones metodológicas. No obstante, algunos autores (Whelan y Crockett, 2009) han probado diferentes formas funcionales para la obtención de los multiplicadores del tiempo de viaje sin encontrar diferencias significativas en la bondad de ajuste para las distintas especificaciones, por lo que, por su mayor simplicidad, seleccionaron el modelo lineal. Así pues, en la presente modelización se opta también por adoptar funciones lineales para la determinación del mínimo, moda y máximo de las distribuciones triangulares de los valores de los multiplicadores.

En cuanto al establecimiento de los propios valores de los multiplicadores, se han tomado como referencia de base los resultados reportados por Whelan y Crockett (2009) a partir de un amplio estudio realizado por *MVA Consultancy* en 2008 por encargo del Departamento de Transportes del Reino Unido (*UK Department for Transport, DfT*). Una primera característica de este trabajo es el elevado tamaño de la muestra utilizada en comparación con otros estudios (en la Tabla 1 de Li y Hensher (2011) puede apreciarse este hecho). Otra importante ventaja es que ofrece los valores de los multiplicadores del tiempo de viaje —tanto para viajeros sentados como para viajeros de pie— en función de la densidad de pasajeros de pie. Esta característica constituye una ventaja significativa ya que vehículos de diferentes modos (e incluso distintos modelos de vehículo dentro del mismo modo) presentan distintas configuraciones interiores y por tanto diferentes proporciones entre la superficie disponible para permanecer de pie y el número de asientos, lo que hace que la tasa de ocupación por asiento (el otro cuantificador habitualmente utilizado) no sea tan versátil para reflejar de un modo homogéneo y transferible el grado de incomodidad causado por la aglomeración de pasajeros. De hecho, Wardman y Whelan (2011) indican que la densidad de pasajeros de pie por metro cuadrado es un indicador claramente superior para el cálculo de la desutilidad asociada a permanecer de pie y posiblemente también para el grado de incomodidad experimentado por viajeros sentados debido a la presencia de otros pasajeros de pie. Otra ventaja del estudio de Whelan y Crockett (2009) es que, en consonancia con el criterio establecido en la modelización desarrollada para esta tesis, fija en todos los casos un multiplicador de valor 1 para los pasajeros sentados en aquellas situaciones en las que todavía no se produce —o resulta prácticamente inapreciable— la presencia de pasajeros de pie (densidad de 0 personas de pie por metro cuadrado). Esto no solo facilita la aplicación de los multiplicadores indicados (evitando la utilización de factores correctores) sino que repercute favorablemente en el grado de congruencia entre la modelización desarrollada y los datos utilizados para ello. Una ventaja final para la selección del citado estudio, aunque en absoluto menos importante, es que los multiplicadores obtenidos en el mismo se hallan dentro de un rango intermedio entre los diversos y dispares valores propuestos por el conjunto de estudios dedicados a la valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros en transporte público.

Por el contrario, entre los posibles inconvenientes que se podrían argumentar en contra de la selección del estudio de Whelan y Crockett (2009) para su aplicación al modelo desarrollado en esta tesis, figurarían el hecho de estar focalizado en un ámbito geográfico concreto (en este caso Gran Bretaña) y el estar dedicado únicamente a viajes realizados en ferrocarril. Con respecto al primero de los inconve-

nientes, se puede aducir que es una limitación común a la práctica totalidad de estudios realizados de carácter original (al margen de posibles meta-análisis efectuados a partir de los mismos), por lo que ciertamente no supone una desventaja significativa con respecto a otros estudios. Además, la utilización de multiplicadores de coste o desutilidad en lugar de incrementos del valor monetario por unidad de tiempo o por viaje (CU/h o CU/viaje) repercute muy favorablemente sobre la transferibilidad de resultados entre distintas zonas geográficas, lo que aminora en gran medida el primero de los inconvenientes indicados. El segundo de los inconvenientes parecería, en principio, susceptible de revestir mayor importancia. No obstante, la observación de resultados contenidos en algunos otros estudios parece restar trascendencia a este hecho. En concreto, en Kroes *et al.* (2014) se incluye un estudio de valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros en el sistema de transporte público colectivo de París y su gran corona metropolitana (Île-de-France), realizado por encargo de STIF (*Syndicat des Transports d'Île-de-France*<sup>217</sup>), y en el cual se analizan de forma segmentada muestras procedentes de diferentes modos: metro, trenes regionales (RER) y de cercanías, y autobús y tranvía conjuntamente. Los multiplicadores calculados en este estudio resultan prácticamente idénticos para los dos grupos de modos de gran capacidad (metro y trenes regionales y de cercanías). Para los modos de inferior capacidad (autobús y tranvía), los multiplicadores obtenidos por estos autores son ligeramente mayores que en los dos casos anteriores, pero siempre con una diferencia muy limitada (0.173 en el peor de los casos). Esto permite inferir que existe una razonable homogeneidad entre diferentes modos de transporte público colectivo en cuanto a la percepción del coste o desutilidad adicionales generados por la congestión o aglomeración de pasajeros.

A continuación se compendian, en la Tabla 8.6, los multiplicadores por congestión o aglomeración de pasajeros obtenidos por Whelan y Crockett (2009) para el caso de viajeros sentados. Obsérvese que este estudio realiza segmentaciones de la muestra total por propósito del viaje (viajes de negocios frente a “no-negocios”) y por el ámbito territorial del viaje (Londres y región del Sudeste de Inglaterra, regionales, e interurbanos).

**Tabla 8.6.** Multiplicadores del tiempo de viaje aplicables a pasajeros sentados por congestión o aglomeración de viajeros a bordo del vehículo, según Whelan y Crockett (2009).

Densidad de pasajeros de pie (prs/m <sup>2</sup> )	Muestra global	Propósito del viaje		Ámbito territorial		
		“No-negocios”	Negocios	Londres y SE	Regionales	Interurbanos
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.11	1.10	1.13	1.09	1.24	1.11
2	1.21	1.21	1.27	1.18	1.48	1.23
3	1.32	1.31	1.40	1.27	1.72	1.34
4	1.42	1.41	1.54	1.36	1.96	1.46
5	1.53	1.52	1.67	1.45	2.20	1.57
6	1.63	1.62	1.81	1.54	2.44	1.69

Fuente: Whelan y Crockett (2009).

Entre las distintas segmentaciones disponibles en el estudio de Whelan y Crockett (2009) se ha seleccionado, como referencia fundamental para el establecimiento de los multiplicadores, la correspondiente al ámbito territorial de Londres y el Sudeste de Inglaterra, ya que es la que previsiblemente mantiene un mayor grado de similitud con el tipo de desplazamientos objeto de estudio en la presente tesis (transporte metropolitano y urbano). Las muestras segmentadas por ámbito territorial incluyen, en las proporciones correspondientes, tanto viajes de tipo “no-negocios” como viajes de negocios (estos últimos suponen el 9% del total de la muestra).

Así pues, la segmentación correspondiente a Londres y el Sudeste de Inglaterra proporciona una relación entre la densidad de pasajeros de pie y los valores de los multiplicadores definida por la función

<sup>217</sup> Autoridad organizadora del transporte en la región de Île-de-France.

$M=1.00+0.09 \cdot D$ , donde  $M$  representa el multiplicador del tiempo de viaje y  $D$  la densidad (prs/m<sup>2</sup>) a la que están sometidos los viajeros. Esta relación, caracterizada por un intercepto u ordenada en el origen de valor 1.00 y una pendiente de 0.09 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, es la que se adopta como función generadora de la moda de las distribuciones triangulares del valor de los multiplicadores. Para establecer las funciones correspondientes al mínimo y al máximo se actuará únicamente sobre el valor de la pendiente, ya que, por la forma en que se ha definido en la modelización desarrollada el coste básico o estándar del tiempo de viaje a bordo de los vehículos de transporte público, el multiplicador aplicable a viajeros sentados con una densidad de pasajeros de pie de 0 prs/m<sup>2</sup> debe tomar siempre valor 1.

Por tanto, para los valores mínimos de los multiplicadores se adopta una pendiente rebajada en un 25% con respecto a la moda, quedando así en 0.0675 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>. Por su parte, para configurar la función de valores máximos se incrementa la pendiente en un 50% con respecto a la moda, proporcionando como resultado una pendiente de 0.1350 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>. Obsérvese que las distribuciones triangulares adoptadas resultan, en este caso, asimétricas. Esta asimetría positiva responde a la conveniencia de que los valores máximos se aproximen —aún siendo un poco inferiores— a los multiplicadores resultantes del meta-análisis (Modelo III, con viajeros de tipo *commuters*) realizado por Wardman y Whelan (2011)<sup>218</sup>. Nótese al respecto que en dicho meta-análisis se incluye una proporción bastante alta de estudios que proporcionaban valores de los multiplicadores por congestión o aglomeración de pasajeros en transporte público notablemente altos en comparación con estudios más recientes como Whelan y Crockett (2009), Kroes *et al.* (2014) o Tirachini *et al.* (2016), este último utilizando observaciones en preferencias reveladas. Por otra parte, la pauta adoptada para los mínimos se ha establecido de tal manera que, bajo un mismo criterio homogéneo, los multiplicadores aplicables a pasajeros de pie (determinados en el epígrafe siguiente) muestren un buen ajuste con los reportados por Kroes *et al.* (2014)<sup>219</sup>, los cuales se encuentran en un rango inferior dentro de la serie de estudios que han afrontado la valoración de la congestión o aglomeración de pasajeros de pie en transporte público. Nótese que esto provoca que los valores mínimos de los multiplicadores aplicables a pasajeros sentados resulten, en cambio, un poco inferiores a los indicados por Kroes *et al.* (2014).

Una vez fijados los rangos de variación de estos multiplicadores parciales, la siguiente cuestión relevante es establecer el valor de la densidad de pasajeros de pie que refleje con fidelidad el nivel medio de concentración de viajeros percibido por la fracción de pasajeros a la que se han de aplicar dichos multiplicadores parciales. Así pues, este atributo se cuantifica mediante la media (calculada en base al número de pasajeros-km) de las densidades experimentadas por los viajeros que pueden viajar sentados en aquellas secciones o tramos entre paradas en las que se produce la presencia de pasajeros de pie (es decir, donde el número de ocupantes en el vehículo excede el número de asientos con el que este está equipado). En un caso general, esta densidad media ( $D_{NS}$ ) se puede definir matemáticamente en esta tesis mediante la siguiente expresión:

<sup>218</sup> Los multiplicadores obtenidos en el meta-análisis de Wardman y Whelan (2011) se presentan en función de la tasa de ocupación por asiento o '*load factor*'. Una equivalencia plausible con la densidad de pasajeros de pie puede establecerse en base a la hipótesis de que el 40% de la capacidad definida a razón de 4 prs/m<sup>2</sup> corresponde a asientos, con lo que una tasa de ocupación por asiento del 250% equivaldría a una densidad de 4 prs/m<sup>2</sup>, partiendo de la base de que una tasa de ocupación del 100% corresponda a una densidad de 0. De esta forma, la posible equivalencia entre cualquier tasa de ocupación por asiento que supere el 100% y su correspondiente densidad de pasajeros de pie se definiría mediante la relación  $D=(LF-100) \cdot 4/150$ , con la tasa de ocupación por asiento ( $LF$ ) expresada en porcentaje y la densidad ( $D$ ) en prs/m<sup>2</sup>.

<sup>219</sup> En Kroes *et al.* (2014) los niveles de congestión o aglomeración de pasajeros se establecen también en función de la tasa de ocupación por asiento, por lo que se puede aplicar la misma relación de equivalencia con la densidad que se ha propuesto para Wardman y Whelan (2011).

$$\begin{aligned}
 D_{NS} &= \frac{\int_0^L D(s) \cdot Nse \cdot f \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{\int_0^L Nse \cdot f \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds} = \frac{\int_0^L \max\left\{Dref \cdot \frac{P(s) - Nse \cdot f}{f \cdot (CAPu - Nse)}, 0\right\} \cdot Nse \cdot f \cdot ds}{NSP \cdot \int_0^L P(s) \cdot ds} = \\
 &= \frac{Nse \cdot f \cdot \int_0^L \max\left\{Dref \cdot \frac{P(s) - Nse \cdot f}{f \cdot (CAPu - Nse)}, 0\right\} \cdot ds}{NSP \cdot \delta \cdot L \cdot PM}
 \end{aligned}
 \tag{8.33}$$

donde, al margen de las variables y funciones ya definidas para ecuaciones anteriores (8.28, 8.30 y 8.32),  $D(s)$  representa la densidad de pasajeros de pie en el punto o sección diferencial dada por la coordenada longitudinal  $s$ . Se recuerda que  $CAPu$  simboliza la capacidad unitaria o número de plazas (sentados y de pie) por cada vehículo o unidad de transporte, mientras que  $Dref$  representa la densidad de pasajeros de pie tomada como referencia para establecer dicha capacidad.

Dado que la estructura de datos planteada como 'input' de la modelización desarrollada no conlleva la exigencia de detallar pormenorizadamente los valores de la función  $P(s)$  o, más concretamente, sus valores discretos  $P_n$  por cada tramo, sino que estos se condensan en un pequeño conjunto de parámetros característicos (volumen de viajes por hora, coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda y coeficiente de compacidad del perfil), la expresión teórica recogida en la ecuación 8.33 debe ser simplificada y adaptada a la información disponible. Para ello se asume una vez más la hipótesis simplificadora de que la cantidad de pasajeros a bordo en los diversos puntos o 'secciones diferenciales' del recorrido de la línea se reparte o distribuye linealmente (independientemente del orden físico de las secciones) entre la sección de máxima demanda y la sección con un menor número de viajeros a bordo de los vehículos. Bajo esta premisa, si el coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea ( $\delta_{ijk}$ ) es menor de 0.5, la sección o secciones con un menor número de viajeros corresponderían teóricamente a puntos en los que el número de pasajeros a bordo sea nulo. Por el contrario, si el coeficiente  $\delta_{ijk}$  es mayor de 0.5, el número de pasajeros que atraviesan la sección con menor volumen ha de ser mayor que 0. En cualquiera de los dos casos, el número de pasajeros por vehículo que viajan sentados en aquellos puntos en los que se produce la presencia de pasajeros de pie es constante (e igual al número de asientos) a lo largo de todas las secciones en las que se cumple dicha condición, por lo que todas las posibles densidades comprendidas entre la máxima y la mínima —sea esta igual o distinta de cero— son experimentadas por el mismo número de viajeros sentados. De ahí que la densidad media a que se ven sometidos los individuos pertenecientes a esta fracción o grupo de pasajeros venga dada simplemente por el punto medio entre la densidad en la sección de máxima demanda y la densidad en la sección o secciones con un menor número de pasajeros a bordo. Esta expresión, una vez generalizada tanto para los casos en los que la densidad mínima de pasajeros de pie es nula como para aquellos otros en los que es mayor que 0, es la que desempeña el papel de variable independiente (entre corchetes) en las funciones lineales definidas por las ecuaciones 8.34.a.ii a 8.34.a.iv y 8.34.b.ii a 8.34.b.iv.

Con todo ello, la obtención de los multiplicadores parciales aplicables a pasajeros que viajan sentados en secciones o tramos entre paradas en los que se da la presencia de otros pasajeros de pie (variables  $Mcns^*_{rijk}$  y  $Mcns^{ms}_{rijk}$ ) queda regida por las ecuaciones 8.34.a.i a 8.34.a.iv (para el caso del año base) y 8.34.b.i a 8.34.b.iv (para los posteriores módulos de cálculo). Por su parte, los valores propuestos para los coeficientes (pendiente y ordenada en el origen) de las funciones lineales encargadas del cálculo de la moda, mínimo y máximo de estas variables se recopilan en la Tabla 8.7. Por último, se indica que en la Figura 8.12 (incorporada en el epígrafe siguiente) se incluye la representación gráfica de dichas funciones (moda, mínimo y máximo del multiplicador  $Mcns$ ) una vez sustituidos los coeficientes genéricos por los valores propuestos.

Para el año base

$$Mcns^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRMcns_r \mid Mcnsmin^*_{ijk}, Mcnsmax^*_{ijk}, Mcnsmod^*_{ijk} \right) \quad (8.34.a.i)$$

donde:

$$Mcnsmod^*_{ijk} = Kmd1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot HS^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmd0_{MCNS} \quad (8.34.a.ii)$$

$$Mcnsmin^*_{ijk} = Kmn1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot HS^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmn0_{MCNS} \quad (8.34.a.iii)$$

$$Mcnsmax^*_{ijk} = Kmx1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot HS^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmx0_{MCNS} \quad (8.34.a.iv)$$

Los índices  $(r,i,j,k)$  involucrados en las ecuaciones 8.34.a.i a 8.34.a.iv deben recibir los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$Mcns^{ms}_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRMcns_r \mid Mcnsmin^{ms}_{ryijk}, Mcnsmax^{ms}_{ryijk}, Mcnsmod^{ms}_{ryijk} \right) \quad (8.34.b.i)$$

donde:

$$Mcnsmod^{ms}_{ryijk} = Kmd1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^{ms}_{ryijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}}} \right\} \right) \right] + Kmd0_{MCNS} \quad (8.34.b.ii)$$

$$Mcnsmin^{ms}_{ryijk} = Kmn1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^{ms}_{ryijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}}} \right\} \right) \right] + Kmn0_{MCNS} \quad (8.34.b.iii)$$

$$Mcnsmax^{ms}_{ryijk} = Kmx1_{MCNS} \cdot \left[ \frac{Dmls^{ms}_{ryijk}}{2} \cdot \left( 2 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot h^{ms}_{ryijk}}} \right\} \right) \right] + Kmx0_{MCNS} \quad (8.34.b.iv)$$

El intervalo genérico  $h$  se particulariza en las ecuaciones 8.34.b.ii a 8.34.b.iv del modo indicado a continuación, en función del tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Además, todos los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  contenidos en este conjunto de ecuaciones (8.34.b.i a 8.34.b.iv) han de adoptar idénticos valores a los que ya se señalaron en las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii para el caso de la variable  $NSP_{ryijk}^{ms}$ .

**Tabla 8.7.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros sentados con presencia de pasajeros de pie ( $Mcns$  o  $Mcns^*$ ).

	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd1_{MCNS} = 9.000000 \cdot 10^{-2}$	$Kmd0_{MCNS} = 1.000000$
<b>Mínimo</b>	$Kmn1_{MCNS} = 6.750000 \cdot 10^{-2}$	$Kmn0_{MCNS} = 1.000000$
<b>Máximo</b>	$Kmx1_{MCNS} = 1.350000 \cdot 10^{-1}$	$Kmx0_{MCNS} = 1.000000$

**8.3.5.2.d. Multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie**

La variable  $Mc_{ss}_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público a aplicar a la fracción de pasajeros<sup>220</sup> que necesariamente han de viajar de pie (en función del nivel de aglomeración por ellos experimentado), para aquellos viajes efectuados a bordo del vehículo del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones correspondientes al escenario  $s$  y al año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el año base se designa como  $Mc_{ss}^*_{rijk}$ , donde se omiten los índices innecesarios correspondientes a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ) y año ( $y$ ).

Ambas variables ( $Mc_{ss}_{ryijk}^{ms}$  y  $Mc_{ss}^*_{rijk}$ ) son de tipo adimensional.

Al igual que en el caso de los multiplicadores parciales aplicables a pasajeros sentados en secciones en las que se produce la presencia de pasajeros de pie, el cálculo de valores para las variables  $Mc_{ss}^*_{rijk}$  y  $Mc_{ss}_{ryijk}^{ms}$  va a ser objeto de un enfoque estocástico, en el que dichos valores se obtienen según distribuciones triangulares de probabilidad en base a la componente aleatoria  $TRMc_{ss}_r$ , procediendo esta, para cada simulación, de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Recuérdese que sobre esta última distribución se generaron previamente (epígrafe 6.4.3.2) las respectivas extracciones aleatorias. Por consiguiente, es necesario ahora definir las funciones que calculan el mínimo, la moda y el máximo de las distribuciones triangulares finales de los multiplicadores parciales aplicables a pasajeros de pie.

En este sentido, se mantiene la ecuación lineal como forma funcional básica, en consonancia con lo indicado anteriormente para el caso de los multiplicadores correspondientes a pasajeros sentados.

Congruentemente con los criterios seguidos para el establecimiento de los multiplicadores aplicables a viajeros sentados con presencia de pasajeros de pie, se toman los resultados obtenidos para viajeros de pie por Whelan y Crockett (2009) como referencia básica para este caso, por los mismos motivos que se señalaron anteriormente. En este sentido, se detallan en la Tabla 8.8 los valores de los multiplicadores por congestión o aglomeración de pasajeros obtenidos por dichos autores para el caso de viajeros de pie. Las segmentaciones de la muestra total, al igual que en el caso precedente, vienen dadas en función del

<sup>220</sup> Recuérdese que, estrictamente hablando, esta fracción o proporción se establece en términos de pasajeros-km.

motivo o propósito del viaje (viajes de negocios frente a “no-negocios”) y del ámbito territorial del desplazamiento (Londres y región del Sudeste de Inglaterra, regionales, e interurbanos).

**Tabla 8.8.** Multiplicadores del tiempo de viaje aplicables a pasajeros de pie por congestión o aglomeración de viajeros a bordo del vehículo, según Whelan y Crockett (2009).

Densidad de pasajeros de pie (prs/m <sup>2</sup> )	Muestra global	Propósito del viaje		Ámbito territorial		
		“No-negocios”	Negocios	Londres y SE	Regionales	Interurbanos
0	1.53	1.48	1.91	1.43	1.34	1.77
1	1.62	1.58	1.95	1.56	1.61	1.81
2	1.70	1.68	1.99	1.69	1.88	1.85
3	1.79	1.77	2.03	1.82	2.16	1.89
4	1.87	1.87	2.08	1.95	2.43	1.92
5	1.96	1.97	2.12	2.08	2.70	1.96
6	2.04	2.06	2.16	2.21	2.97	2.00

Fuente: Whelan y Crockett (2009).

Entre las segmentaciones disponibles se selecciona, a efectos de establecer los multiplicadores en la modelización desarrollada, la perteneciente al ámbito territorial de Londres y Sudeste de Inglaterra por su mayor semejanza con el tipo de viajes que son objeto de interés en esta tesis. Los resultados mostrados para dicha segmentación conducen a una relación entre la densidad de pasajeros de pie y los valores de los multiplicadores dada por la función  $M=1.43+0.13 \cdot D$ , siendo  $M$  el multiplicador del tiempo de viaje y  $D$  la densidad (prs/m<sup>2</sup>) a la que se ven sometidos los viajeros. El intercepto u ordenada en el origen, de valor 1.43, indica la cuantía (43% en este caso) de la penalización atribuible al simple hecho de tener que permanecer de pie, con respecto al coste o desutilidad de poder viajar sentado. Por su parte, la pendiente de la función, de valor 0.13 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, señala el coste o desutilidad marginal (en términos proporcionales al coste o desutilidad estándar de viajar sentado) que perciben los pasajeros que han de viajar de pie ante un aumento de la densidad de 1 prs/m<sup>2</sup>. Estos valores son por tanto los que se adoptan para definir la moda de las distribuciones triangulares de los multiplicadores aplicables a pasajeros de pie en función de la densidad de los mismos.

Por su parte, para establecer los valores mínimos de los multiplicadores se rebajan en un 25% (con respecto a la moda) tanto la penalización imputable a tener que permanecer de pie como la pendiente de la función, indicadora del coste o desutilidad marginal asociada a la densidad de pasajeros de pie. Con ello, la ordenada en el origen para la función de valores mínimos queda establecida en 1.3225 (resultado de  $1+0.43 \cdot (1-0.25)$ ), mientras que la pendiente se fija en 0.0975 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>. Por lo que respecta a la función de valores máximos, la penalización por tener que permanecer de pie y el coste o desutilidad marginal de la densidad (pendiente de la función) se aumentan en un 50% con respecto a la moda. De esta forma, se obtiene una ordenada en el origen de 1.645 (resultado de  $1+0.43 \cdot (1+0.50)$ ) y una pendiente de 0.195 (prs/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>. Obsérvese que las disminuciones e incrementos porcentuales adoptados en este epígrafe son similares a los aplicados en el caso de los multiplicadores destinados a pasajeros sentados, salvo que para estos últimos se actuaba únicamente sobre la pendiente (ya que, lógicamente, a los pasajeros sentados no les es aplicable ninguna penalización por permanecer de pie).

Por tanto las distribuciones triangulares resultantes son, al igual que en el caso anterior, asimétricas. Los valores mínimos presentan un notable nivel de coincidencia con los multiplicadores indicados por Kroes *et al.* (2014), especialmente para el caso de la muestra formada por usuarios de autobús y tranvía. Por su parte, los valores máximos están en el entorno de los calculados en el meta-análisis (Modelo III, viajeros de tipo *commuters*) desarrollado por Wardman y Whelan (2011), especialmente para valores no muy altos de la densidad o tasa de ocupación por asiento (ya que la pendiente media resultante de dicho meta-análisis es sensiblemente mayor que la aquí considerada).

Tras haber establecido la moda y los límites de variación de este tipo de multiplicadores parciales, se ha de determinar el valor de la densidad de pasajeros de pie que sea representativa del nivel medio de concentración o aglomeración de viajeros a que están sometidos los propios individuos pertenecientes al grupo de pasajeros de pie. La cuantía de dicho atributo viene dada por la media (calculada en base al número de pasajeros-km) de las densidades experimentadas por el conjunto de pasajeros que efectivamente han de viajar de pie en aquellas secciones o tramos entre paradas en las que el número de ocupantes por vehículo sobrepasa el número de asientos con el que este cuenta. Con carácter general, esta densidad media ( $D_{SS}$ ) quedaría definida matemáticamente en esta tesis a través de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 D_{SS} &= \frac{\int_0^L D(s) \cdot (P(s) - Nse \cdot f) \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{\int_0^L (P(s) - Nse \cdot f) \cdot H_0(P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds} = \\
 &= \frac{\int_0^L \max \left\{ D_{ref} \cdot \frac{P(s) - Nse \cdot f}{f \cdot (CAPu - Nse)}, 0 \right\} \cdot (P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{SSP \cdot \int_0^L P(s) \cdot ds} = \\
 &= \frac{\int_0^L \max \left\{ D_{ref} \cdot \frac{P(s) - Nse \cdot f}{f \cdot (CAPu - Nse)}, 0 \right\} \cdot (P(s) - Nse \cdot f) \cdot ds}{SSP \cdot \delta \cdot L \cdot PM}
 \end{aligned} \tag{8.35}$$

donde se emplea la misma notación para variables y funciones que en las ecuaciones anteriores del mismo tipo (8.28, 8.30, 8.32 y 8.33). Nótese por otra parte que, a diferencia de lo que sucedía en la ecuación 8.33, el número de pasajeros afectados por la situación objeto de estudio (permanecer de pie en este caso) varía entre las distintas secciones en las que se produce la presencia de pasajeros de pie, por lo que depende de la coordenada longitudinal  $s$ .

Al igual que en casos anteriores tales como el de la ecuación 8.33, la expresión teórica definida en la ecuación 8.35, a efectos prácticos de incorporación a la estructura del modelo desarrollado, necesita ser simplificada y adaptada a la información disponible. Para este fin se recurre de nuevo, en consonancia con casos anteriores, a la hipótesis simplificadora de suponer que la cantidad de pasajeros a bordo de los vehículos en los diversos puntos o ‘secciones diferenciales’ del recorrido de la línea se distribuya o reparta linealmente (siendo irrelevante el orden físico de las secciones) entre la sección de máxima demanda y aquella otra sección con un menor número de viajeros a bordo. Esta última sección correspondería teóricamente a puntos en los que el número de pasajeros a bordo sea nulo si el coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la línea ( $\delta_{ijk}$ ) fuese menor de 0.5 y, por el contrario, a volúmenes de pasajeros distintos de 0 en dicha sección si el coeficiente  $\delta_{ijk}$  es mayor de 0.5. En cualquier caso, todas las posibles densidades comprendidas entre la máxima y la mínima —sea esta igual o distinta de cero— son experimentadas por distinto número de viajeros de pie, ya que, tal como se avanzó anteriormente, el número de pasajeros de pie varía entre los distintos puntos o ‘secciones diferenciales’ en los que se produce esta circunstancia. En concreto, existe una proporcionalidad lineal entre la densidad de pasajeros de pie en un punto o sección y el número de viajeros (de pie) que experimentan esa densidad (de forma que las densidades más altas son soportadas por un mayor número de pasajeros y las densidades más bajas por un menor número de viajeros). Así pues, bajo la hipótesis de distribución o reparto lineal del número de viajeros a bordo, la densidad media a la que se ven sometidos los individuos que en algún momento de su viaje permanecen de pie es igual a la densidad máxima menos un tercio de la diferencia entre la máxima y la mínima (media resultante de integrar el número de pasajeros de pie que experimentan cada una de las posibles densidades en ese rango). Esta expresión, tras ser generalizada tanto para los casos en los que la densidad mínima de



pasajeros de pie es nula como para aquellos otros en los que es mayor que 0, es la que aparece desempeñando el papel de variable independiente (entre corchetes) en las funciones lineales dadas por las ecuaciones 8.36.a.ii a 8.36.a.iv y 8.36.b.ii a 8.36.b.iv.

En síntesis, la obtención de los multiplicadores parciales a aplicar a pasajeros de pie (variables  $Mc_{ss}^*_{rijk}$  y  $Mc_{ss}^{ms}_{ryijk}$ ) se rige por las ecuaciones 8.36.a.i a 8.36.a.iv (para el año base) y 8.36.b.i a 8.36.b.iv (para los posteriores módulos de cálculo). Por su parte, en la Tabla 8.9 se recogen los valores propuestos para los coeficientes de las funciones lineales destinadas al cálculo de la moda, mínimo y máximo de dichos multiplicadores.

**Para el año base**

$$Mc_{ss}^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRMc_{ss,r} \mid Mc_{ssmin}^*_{ijk}, Mc_{ssmax}^*_{ijk}, Mc_{ssmod}^*_{ijk} \right) \quad (8.36.a.i)$$

donde:

$$Mc_{ssmod}^*_{ijk} = Kmd1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot Hs^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmd0_{MCSS} \quad (8.36.a.ii)$$

$$Mc_{ssmin}^*_{ijk} = Kmn1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot Hs^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmn0_{MCSS} \quad (8.36.a.iii)$$

$$Mc_{ssmax}^*_{ijk} = Kmx1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls^*_{ijk}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^0_{TypV_i^0}}{PM^*_{ijk} \cdot Hs^*_{ijk}}} \right\} \right) \right] + Kmx0_{MCSS} \quad (8.36.a.iv)$$

En las ecuaciones 8.36.a.i a 8.36.a.iv, los índices  $(r,i,j,k)$  han de adoptar los valores que se indican a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$Mc_{ss}^{ms}_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRMc_{ss,r} \mid Mc_{ssmin}^{ms}_{ryijk}, Mc_{ssmax}^{ms}_{ryijk}, Mc_{ssmod}^{ms}_{ryijk} \right) \quad (8.36.b.i)$$

donde:

$$Mc_{ssmod}^{ms}_{ryijk} = Kmd1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls^{ms}_{ryijk}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse^m_{TypV_i^m}}{PM^{ms}_{ryijk} \cdot H^{ms}_{ryijk}}} \right\} \right) \right] + Kmd0_{MCSS} \quad (8.36.b.ii)$$

$$Mc_{ssmin}_{ryijk}^{ms} = Kmn1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls_{ryijk}^{ms}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}} \right\} \right) \right] + Kmn0_{MCSS} \quad (8.36.b.iii)$$

$$Mc_{ssmax}_{ryijk}^{ms} = Kmx1_{MCSS} \cdot \left[ \frac{Dmls_{ryijk}^{ms}}{3} \cdot \left( 3 - \min \left\{ 1, \frac{2 \cdot (1 - \delta_{ijk})}{1 - 60 \cdot \frac{Nse_{TypV_i}^m}{PM_{ryijk}^{ms} \cdot h_{ryijk}^{ms}}} \right\} \right) \right] + Kmx0_{MCSS} \quad (8.36.b.iv)$$

De nuevo, el intervalo genérico  $h$  se particulariza en las ecuaciones 8.36.b.ii a 8.36.b.iv del siguiente modo, dependiendo del tipo de bucle iterativo en ejecución:

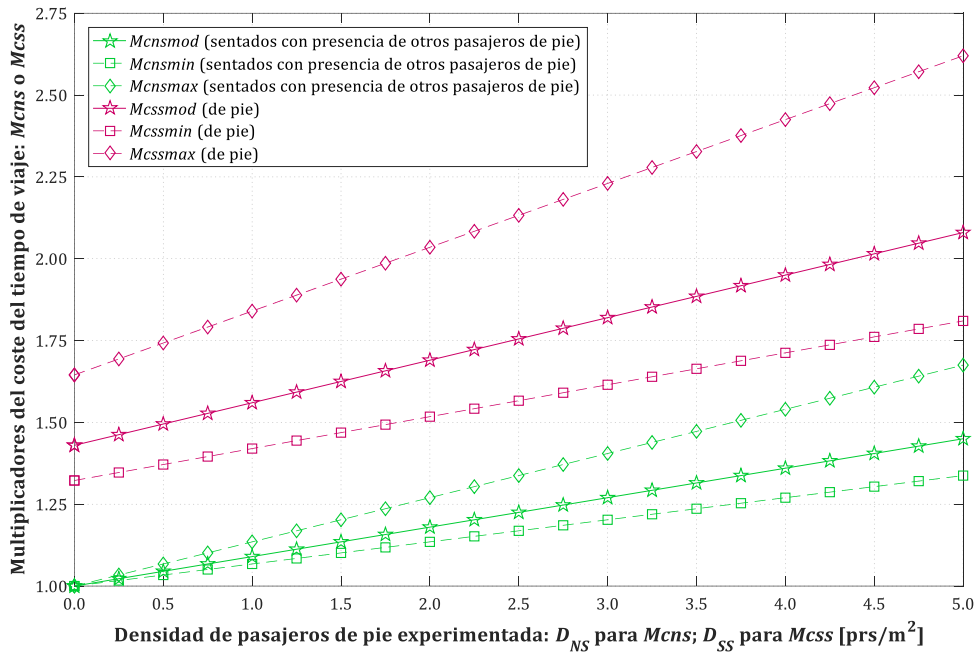
- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Además, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en este conjunto de ecuaciones (8.36.b.i a 8.36.b.iv) deben tomar los mismos valores que ya se indicaron anteriormente para el caso de la variable  $NSP_{ryijk}^{ms}$  (véanse las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii).

**Tabla 8.9.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del multiplicador parcial del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público para pasajeros de pie ( $Mc_{ss}$  o  $Mc_{ss}^*$ ).

	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd1_{MCSS} = 1.300000 \cdot 10^{-1}$	$Kmd0_{MCSS} = 1.430000$
<b>Mínimo</b>	$Kmn1_{MCSS} = 9.750000 \cdot 10^{-2}$	$Kmn0_{MCSS} = 1.322500$
<b>Máximo</b>	$Kmx1_{MCSS} = 1.950000 \cdot 10^{-1}$	$Kmx0_{MCSS} = 1.645000$

Finalmente, en la Figura 8.12 se muestra la representación gráfica obtenida para estas funciones (moda, mínimo y máximo del multiplicador  $Mc_{ss}$ ) al reemplazar los coeficientes genéricos por los valores propuestos, junto con las respectivas funciones de moda, mínimo y máximo de los multiplicadores parciales aplicables a pasajeros sentados ( $Mc_{ns}$ ), las cuales proceden del epígrafe anterior. Nótese al respecto que la densidad de pasajeros de pie representada en el eje de abscisas debe interpretarse como  $D_{NS}$  en el caso de los multiplicadores aplicables a viajeros sentados ( $Mc_{ns}$ ) y como  $D_{SS}$  para los multiplicadores correspondientes a pasajeros de pie ( $Mc_{ss}$ ).



**Figura 8.12.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de los multiplicadores parciales del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público en función de la densidad de pasajeros de pie experimentada por los viajeros afectados.

### 8.3.5.2.e. Multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros

La variable  $Mcav_{ryijk}^{ms}$  constituye, para la simulación aleatoria  $r$ , el multiplicador general o promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público a aplicar agregadamente al conjunto de pasajeros por efecto del nivel de aglomeración en los vehículos, para los viajes efectuados a bordo del modo  $m$  de transporte público en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones correspondientes al escenario  $s$  y al año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Para el caso particular del año base se define su variable equivalente  $Mcav^*_{rijk}$ , en la que se prescinde, por innecesarios, de los índices correspondientes a escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ) y año ( $y$ ).

La variable  $Mcav_{ryijk}^{ms}$ , así como su equivalente  $Mcav^*_{rijk}$ , son de tipo adimensional.

Para el cálculo de este multiplicador general o promediado se ponderan los multiplicadores parciales obtenidos anteriormente ( $Mcns_{ryijk}^{ms}$  o  $Mcns^*_{rijk}$  y  $McSS_{ryijk}^{ms}$  o  $McSS^*_{rijk}$ ) según la fracción o proporción de pasajeros-km realizados por el conjunto de usuarios en cada una de las posibles situaciones que estos pueden experimentar (pasajeros sentados en secciones en las que se produce la presencia de viajeros de pie, pasajeros que efectivamente viajan de pie, y pasajeros sentados en secciones en las que todos los viajeros disponen de asiento). Las fracciones correspondientes a los dos primeros grupos vienen dadas por las variables  $NSP_{ryijk}^{ms}$  (o  $NSP^*_{ijk}$ ) y  $SSP_{ryijk}^{ms}$  (o  $SSP^*_{ijk}$ ), respectivamente, mientras que la proporción del tercer grupo puede obtenerse directamente como 1 menos la suma de las dos fracciones anteriores. Recuérdese que en el caso de este tercer grupo no se utiliza multiplicador parcial alguno (o, visto de otro modo, se aplica un multiplicador parcial de valor unitario) debido a que se corresponde con las condiciones para las cuales se ha definido el coste básico o estándar del tiempo de viaje en transporte público.

En conclusión, el cálculo de las variables  $Mcav^*_{rijk}$  (para el año base) y  $Mcav_{ryijk}^{ms}$  (para los posteriores módulos de cálculo) se ajusta a las ecuaciones indicadas a continuación.

Para el año base

$$M_{cav}^*_{rijk} = NSP^*_{ijk} \cdot Mcns^*_{rijk} + SSP^*_{ijk} \cdot Mcss^*_{rijk} + 1 - (NSP^*_{ijk} + SSP^*_{ijk}) \tag{8.37.a}$$

donde:

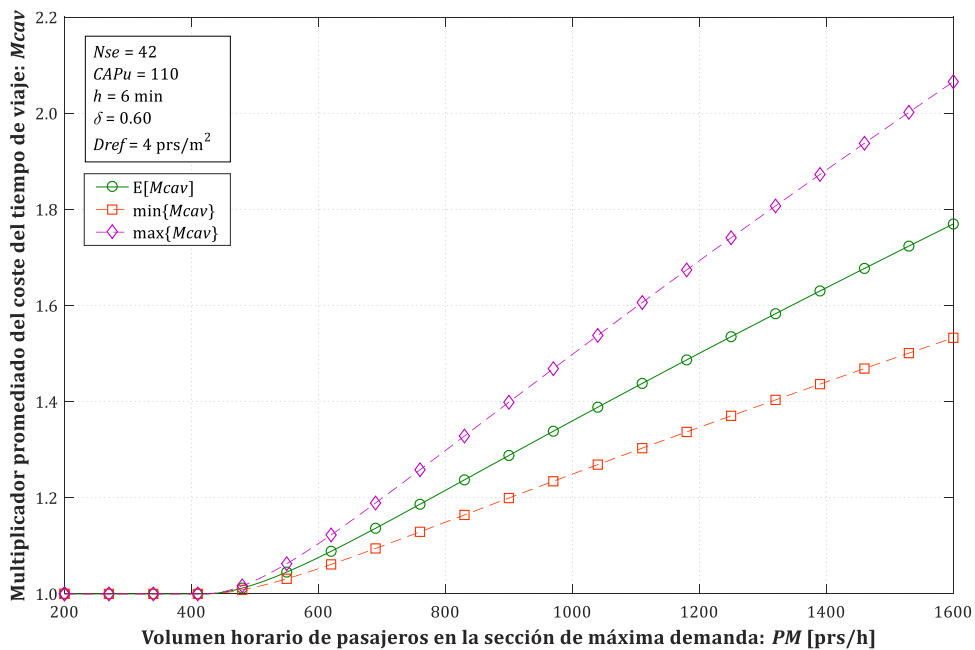
$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$M_{cav}^{ms}_{ryijk} = NSP^{ms}_{ryijk} \cdot Mcns^{ms}_{ryijk} + SSP^{ms}_{ryijk} \cdot Mcss^{ms}_{ryijk} + 1 - (NSP^{ms}_{ryijk} + SSP^{ms}_{ryijk}) \tag{8.37.b}$$

donde los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  adoptan de nuevo los mismos valores que ya fueron señalados en las ecuaciones 8.29.b.i y 8.29.b.ii para el cálculo de la variable  $NSP^{ms}_{ryijk}$ .

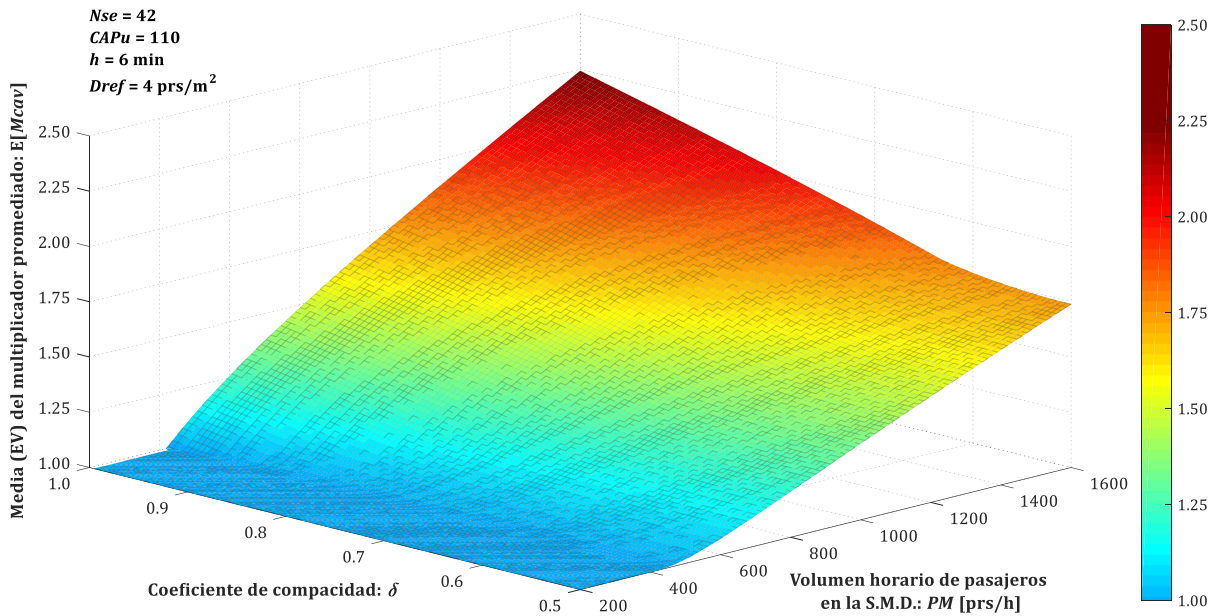
Complementariamente, la Figura 8.13 muestra gráficamente, a modo de ejemplo, los valores mínimo y máximo del multiplicador general o promediado que, en unas condiciones determinadas, podrían obtenerse en función del volumen de pasajeros que atraviesen, en un determinado sentido, la sección de máxima demanda de la línea durante una hora (es decir, en función del volumen  $PM$ ). Junto con estos valores mínimo y máximo, se representa también la media o esperanza matemática<sup>221</sup> de la distribución de los posibles valores de este multiplicador. Dichos valores han sido calculados para el siguiente conjunto de datos hipotéticos:  $h=6$  min (constante independientemente del volumen horario de pasajeros  $PM$ );  $CAPu=110$  (plazas);  $Nse=42$  (plazas);  $Dref=4$  prs/m<sup>2</sup>;  $\delta=0.60$ .



**Figura 8.13.** Ejemplo de los rangos de variación del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por congestión de pasajeros en función del volumen horario de usuarios en la sección de máxima demanda, dado un intervalo fijo entre vehículos y  $\delta=0.60$ .

<sup>221</sup> Nótese que en este caso se representa la media o esperanza matemática en lugar de la moda de la distribución debido a la viabilidad de obtenerla de forma analítica, ya que, a diferencia de la moda, la esperanza matemática es un operador lineal para cualquier conjunto de variables aleatorias, es decir,  $E[a \cdot X + b \cdot Y + c] = a \cdot E[X] + b \cdot E[Y] + c$ . En el caso de la suma de variables aleatorias con distribuciones triangulares, solo se podría garantizar la linealidad de la moda si las distribuciones triangulares fuesen simétricas, ya que en ese caso la moda coincide con la media. No obstante, recuérdese que la distribución de probabilidad resultante de sumar dos variables aleatorias distribuidas triangularmente no es una nueva distribución triangular.

En relación con la influencia del coeficiente  $\delta$  (coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea) se ha incluido también la Figura 8.14, en la que se reproduce, de modo continuo, la variación de la media o esperanza matemática del multiplicador general o promediado en función tanto del volumen horario de pasajeros en la sección de máxima demanda (*PM*) como del propio coeficiente  $\delta$ . Este último se ha representado solamente entre 0.5 y 1, ya que valores de  $\delta$  menores de 0.5 proporcionan los mismos resultados que  $\delta=0.5$ .



**Figura 8.14.** Ejemplo de cálculo de la media o esperanza matemática del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por congestión de pasajeros en función del volumen horario de usuarios en la sección de máxima demanda y del coeficiente de compacidad  $\delta$ , dado un intervalo fijo entre vehículos.

### 8.3.5.3. Tiempo medio de espera en parada para el usuario del transporte público

La variable  $tw_{ryjk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo medio de espera en parada o estación de los usuarios del modo  $m$  de transporte público existente en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación, para el caso de los desplazamientos efectuados en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ . Su variable equivalente para el año base se designa como  $tw_{rijk}^*$ , donde se omiten los índices innecesarios relativos a modo ( $m$ ), escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).

La unidad de tiempo utilizada en el modelo para las variables  $tw_{ryjk}^{ms}$  y  $tw_{rijk}^*$  es el minuto [min].

El tiempo de espera en parada se define como el período transcurrido entre la llegada de un pasajero a una parada o estación y el momento de partida desde la misma del vehículo o unidad de transporte que tome para su viaje (Vuchic, 2005: p. 17).

Para la determinación del tiempo medio de espera en parada de un conjunto de usuarios se debe comenzar considerando que la actuación individual de cada pasajero se puede ajustar a dos grandes patrones de comportamiento (Jolliffe y Hutchinson, 1975; Bowman y Turnquist, 1981):

- Por un lado, pasajeros cuya llegada a la parada o estación se produce de forma aleatoria, independientemente de los horarios previstos para el paso del vehículo o unidad de transporte por dicha parada o estación. Por tanto, las llegadas de este tipo de viajeros se producen de manera uniformemente distribuida entre los momentos de partida de dos vehículos consecutivos de la línea en cuestión, es decir, la tasa de llegadas aleatorias de pasajeros a la parada es constante a lo largo de dicho período (Ceder, 2007: p. 537). Lógicamente, este tipo de comportamiento es claramente

mayoritario cuando el servicio presenta una alta frecuencia y, por tanto, los intervalos entre vehículos (y consecuentemente el tiempo máximo que un pasajero podría pasar esperando) son relativamente cortos.

- Por otro lado, una cierta proporción de pasajeros puede tratar de ajustar, con mayor o menor precisión y margen de ‘seguridad’, el momento de su llegada a la parada al horario previsto para el paso del vehículo o unidad de transporte, al objeto de obtener una reducción significativa de su tiempo de espera con respecto al tiempo medio esperable si llegasen a la parada de forma aleatoria. Esta proporción de pasajeros aumentará a medida que también crezca ese potencial ahorro de tiempo, lo que corresponde a situaciones en las que el intervalo entre vehículos es relativamente prolongado. Estrictamente, el comportamiento de esta proporción de pasajeros está afectado también por factores adicionales como la fiabilidad percibida de los horarios de paso y la regularidad de los intervalos. En consecuencia, resulta ser un tipo de conducta más asociada a los viajeros familiarizados con un determinado sistema de transporte público que a viajeros ocasionales. No obstante, actualmente se debe tener en cuenta además la frecuente disponibilidad (vía web o en dispositivos móviles) de sistemas de información en tiempo real sobre el momento previsto de llegada de los vehículos o unidades de transporte a las paradas, lo que influye también sobre el comportamiento de este grupo de pasajeros, al permitirles reducir su tiempo de espera con mayores niveles de fiabilidad e información.

Sin embargo, algunos autores (Jolliffe y Hutchinson, 1975) incluyeron un tercer grupo de pasajeros: aquellos que llegan a una parada de forma coincidente con la permanencia del vehículo o unidad de transporte en la parada o que lo ven desde cierta distancia y apuran su marcha —o incluso corren— para tomar dicho vehículo. El planteamiento de los citados autores es que todos estos viajeros tienen un tiempo de espera igual a cero. Sin embargo, este criterio no resultaría demasiado congruente con la definición de tiempo de espera en parada dada anteriormente, en la que la finalización de dicho tiempo para cada pasajero se produce con la partida del vehículo, no con la entrada del pasajero en el mismo. Por tanto, de acuerdo a dicha definición, tan solo un único pasajero (como máximo) podría tener un tiempo de espera exactamente igual a cero. Por tanto, en los análisis que se realizan a continuación en el presente epígrafe se ha optado por prescindir de dicho efecto<sup>222</sup>.

Así pues, en base a la combinación de los dos principales patrones de comportamiento explicados anteriormente, el tiempo medio de espera en parada de un conjunto de pasajeros ( $\bar{w}$ ) viene dado por la siguiente expresión genérica (Ceder, 2007: p. 541):

$$\bar{w} = (1 - p) \cdot E[w_{rnd}] + p \cdot w_{sch} \quad (8.38.a)$$

donde  $p$  es la proporción de viajeros que tratan de ajustar su llegada a la parada al horario previsto para el paso o salida del vehículo o unidad de transporte;  $E[w_{rnd}]$  es la esperanza matemática del tiempo de espera para los pasajeros cuya llegada se produce de forma aleatoria; y  $w_{sch}$  representa el tiempo medio esperado por aquellos viajeros que tratan de optimizar o minimizar su tiempo de espera ajustando su llegada a la parada. La interpretación dada a esta última variable por Jolliffe y Hutchinson (1975) es un tanto diferente, ya que estos autores establecen, en base a observaciones experimentales de los tiempos de partida de autobuses homólogos en varias paradas a lo largo de diferentes días, un tiempo mínimo de espera ( $w_{min}$ ). Este tiempo mínimo de espera lo definen como el menor valor de la función ‘tiempo previsible de espera’ (definida para cualquier momento  $t$ ) comprendido entre la hora más temprana y la hora media de partida de un determinado servicio de transporte público en la parada objeto de estudio. Nótese que con este último planteamiento el tiempo mínimo de espera podría ser incluso cero —independientemente del intervalo— si la desviación típica de las horas reales de partida de un determinado servicio de transporte público fuese también nula (es decir, para un servicio cuyo horario

<sup>222</sup> Nótese que en la formulación presentada por Ceder (2007: p. 541) en base a los análisis de Jolliffe y Hutchinson (1975), pese a que se menciona la existencia de las llegadas coincidentes (*see and rush*), también se omite dicha proporción en el cálculo del tiempo medio de espera.

de salida fuese perfectamente fiable todos los pasajeros que traten de ajustar su momento de llegada podrían llegar a la parada al mismo tiempo que la partida del vehículo). Como este planteamiento parece, en la práctica, poco realista y complejo de aplicar (especialmente en ausencia de observaciones experimentales particulares), se ha preferido la primera de las interpretaciones.

La proporción  $p$  de pasajeros que tratan de ajustar su llegada a la parada al horario previsto para la salida del vehículo debe estar siempre en el rango entre 0 y 1, ha de ser igual a 0 cuando el potencial ahorro de tiempo entre  $w_{sch}$  y  $E[w_{rnd}]$  sea nulo, y debe ser monótona creciente con la magnitud de dicho ahorro. En base a estas premisas, Jolliffe y Hutchinson (1975) propusieron para  $p$  una función de la siguiente forma:

$$p = 1 - \exp(-K \cdot g) \quad (8.38.b)$$

donde  $K$  (con  $K > 0$ ) juega el papel de un parámetro a ajustar, y  $g$  representa precisamente la potencial ganancia o ahorro de tiempo por parte de un pasajero entre intentar acomodar la llegada a la parada al horario de partida del vehículo o unidad de transporte y la esperanza matemática del tiempo de espera si llega a la parada de forma aleatoria. Por tanto:

$$g = E[w_{rnd}] - w_{sch} \quad (8.38.c)$$

Obsérvese que introduciendo la ecuación 8.38.c en 8.38.b, y esta a su vez en 8.38.a, se obtiene, tras agrupar términos, la siguiente expresión general para el tiempo medio de espera en parada:

$$\bar{w} = w_{sch} + \exp[-K \cdot (E[w_{rnd}] - w_{sch})] \cdot (E[w_{rnd}] - w_{sch}) \quad (8.39)$$

Dado que las llegadas de los viajeros que se comportan de forma aleatoria se producen de manera uniformemente distribuida entre las partidas de dos vehículos consecutivos, la media del tiempo de espera para estos pasajeros es igual a la mitad de la esperanza matemática del cuadrado del intervalo dividida entre la esperanza matemática del propio intervalo, donde el término 'intervalo' debe entenderse en este caso como el realmente existente entre el paso de dos vehículos, el cual a su vez es estrictamente una variable aleatoria (designada aquí como  $H$ ) en la operación real del servicio a lo largo de la línea. Por tanto:  $E[w_{rnd}] = \frac{1}{2} \cdot E[H^2] / E[H]$  (véase deducción en Ceder, 2007: p. 537). Si por razones de simplicidad se prescinde, a efectos de desarrollo del conjunto del modelo, del efecto debido a la variabilidad de los intervalos (es decir, se anula su varianza)<sup>223</sup>, se pueden considerar iguales  $E[H^2]$  y  $E^2[H]$ , resultando  $E[w_{rnd}] = \frac{1}{2} \cdot E[H]$ . Finalmente, aceptando que la media o esperanza matemática del intervalo real es el intervalo de operación previsto o programado ( $h$ ), se tiene que el tiempo medio de espera para los usuarios que lleguen aleatoriamente se podría aproximar así por un medio del intervalo programado ( $h/2$ ).

Por otra parte, el tiempo medio de espera de los viajeros que tratan de ajustar su momento de llegada a la parada ( $w_{sch}$ ) debe plantearse como una función del intervalo. Dicha función ha de satisfacer al menos las siguientes condiciones necesarias: (i) Debe pasar por el origen de coordenadas, es decir,  $w_{sch} = 0$  para  $h = 0$ ; (ii) Ha de ser menor que  $E[w_{rnd}]$  para cualquier  $h > 0$ ; (iii) Debe ser monótona creciente, por tanto, su primera derivada ha de ser positiva; y (iv) Su segunda derivada debe ser negativa, con lo que resulta una función cóncava hacia abajo. La primera condición ha de interpretarse desde un plano meramente teórico, ya que ante un supuesto intervalo nulo (frecuencia infinita) no tendría sentido ajustar el momento de llegada a la parada, ya que el tiempo de espera sería siempre cero. La segunda condición establece que, en términos de media o esperanza matemática, existe una ganancia o ahorro de tiempo de espera por ajustar el momento de llegada a la parada frente a las llegadas aleatorias (nótese que debido a la variabilidad de los horarios reales de paso —y por tanto también de los intervalos reales— esto no se

<sup>223</sup> La expresión completa es:  $E[w_{rnd}] = E[H]/2 \cdot (1 + \text{Var}[H]/E^2[H]) = E[H]/2 \cdot (1 + CV^2[H])$ , donde CV representa el coeficiente de variación (cociente entre desviación típica y media aritmética). Recuérdese también que  $\text{Var}[H] = E[H^2] - E^2[H]$ .

cumplirá necesariamente para todas las observaciones individuales, pero sí debe cumplirse a nivel de media o esperanza matemática). La tercera condición puede interpretarse como un reflejo de la aversión al riesgo de perder el autobús, tranvía o metro ligero que se pretendía tomar a una determinada hora. Si el intervalo de paso entre vehículos es elevado, la ‘penalización de tiempo’ por perder un determinado autobús, tranvía o metro ligero será también mayor, y consecuentemente el ‘margen temporal de seguridad’ previsto por los pasajeros que traten de ajustar su momento de llegada aumentará. Pero este ‘margen de seguridad’ tiende a estabilizarse (aumentar a menor ritmo) cuando el intervalo se hace muy prolongado. Este comportamiento queda reflejado por la cuarta condición. Nótese que, estrictamente, el tiempo medio de espera en parada de este tipo de usuarios podría estar también influenciado por los niveles de fiabilidad de los horarios del transporte público. Por ejemplo, si el paso de los vehículos por las paradas soliese presentar habitualmente desviaciones importantes con respecto al horario programado, los usuarios tenderían a prever un mayor ‘margen temporal de seguridad’ en su llegada a la parada (e inversamente para horarios muy fiables). No obstante, no se ha incluido en el tiempo de espera en parada dicha influencia debido a su magnitud claramente menor (en comparación con la dependencia del intervalo), y a que los efectos de la fiabilidad de horarios en el transporte público son incorporados al modelo por separado (véase posteriormente el epígrafe 8.3.5.4).

Así pues, para el tipo de modelización desarrollada se ha propuesto que la función  $w_{sch}(h)$  sea igual a  $h/(4+h/15)$ , o lo que es lo mismo,  $w_{sch}(h)=15\cdot h/(60+h)$ , con  $h$  y  $w_{sch}$  medidos en minutos. Obsérvese que, como ejemplo, algunos de los puntos de esta función son:  $w_{sch}=3$  min para  $h=15$  min;  $w_{sch}=5$  min para  $h=30$  min;  $w_{sch}=6.43$  min para  $h=45$  min;  $w_{sch}=7.5$  min para  $h=60$  min.

Aplicando las propuestas anteriormente indicadas para los valores de  $E[w_{rmd}]$  y  $w_{sch}$ , la expresión general dada por la ecuación 8.39 queda particularizada, a efectos de servir de base al desarrollo de la presente modelización, del siguiente modo:

$$\bar{w} = \frac{15 \cdot h}{60 + h} + \exp \left[ -K \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{15 \cdot h}{60 + h} \right) \right] \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{15 \cdot h}{60 + h} \right) \quad (8.40)$$

En cualquier caso, resulta bastante evidente que el cálculo o estimación del tiempo medio de espera en parada para los usuarios de un determinado servicio de transporte público está sujeto a un grado de incertidumbre relativamente elevado. En consecuencia, en el ámbito del modelo desarrollado, el valor de la variable  $tw_{ryijk}^{ms}$  (o  $tw_{ryijk}^*$ ) en cada simulación se obtiene de acuerdo a una distribución triangular de probabilidad a partir de la componente aleatoria  $TRtw_{ryijk}$ , cuyo valor procede a su vez de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) sobre la cual se generaron en su momento (epígrafe 6.4.4.1) las respectivas extracciones. La moda y los límites mínimo y máximo de la distribución triangular del tiempo medio de espera se determinan, para cada correspondiente valor del intervalo entre vehículos, en base a la expresión dada por la ecuación 8.40, siendo los distintos posibles valores del parámetro  $K$  los que dan lugar a las diferencias entre el mínimo, la moda y el máximo (obsérvese que valores de  $K$  más altos conllevan menores tiempos medios de espera e, inversamente, valores de  $K$  más reducidos producen mayores tiempos de espera).

En cuanto a la propia cuantía del parámetro  $K$ , Jolliffe y Hutchinson (1975) determinaron, en base al ajuste de los datos tomados, valores de 0.131 para períodos de hora punta y 0.015 para horas o períodos valle<sup>224</sup> (valores de  $K$  para tiempos expresados en minutos). Así pues, se ha tomado el valor de 0.131 para cuantificar los mínimos de las variables  $tw_{ryijk}^{ms}$  y  $tw_{ryijk}^*$ , y la media entre ambos (0.073) para la moda. La introducción de estos valores en la ecuación 8.40 proporciona tiempos medios de espera en parada en el entorno de lo apriorísticamente esperable (véanse  $twmin$  y  $twmod$  en la Figura 8.15, calculados respectivamente con  $K=0.131$  y  $K=0.073$ ). Sin embargo, no ocurre lo mismo con  $K=0.015$ , que claramente parece sobrevalorar los tiempos medios de espera (o, dicho de otro modo, infravalora la

<sup>224</sup> El parámetro aquí designado como  $K$  recibe el nombre de  $\lambda$  en la fuente original (Jolliffe y Hutchinson, 1975).



proporción de pasajeros que tratan de ajustar su momento de llegada a la parada al horario previsto para el paso del vehículo). Como ejemplo de esto último puede señalarse que, para  $K=0.015$ , la proporción  $p$  de este tipo de viajeros sería de solo el 28.6% para un intervalo tan prolongado como 60 minutos, resultando en un tiempo medio de espera de 23.55 minutos, bastante próximo a la esperanza matemática del tiempo de espera en caso de llegadas puramente aleatorias ( $h/2=30$  min). En consecuencia, se ha optado, para la determinación de los valores máximos de las variables  $tw_{ryijk}^{ms}$  y  $tw_{rijk}^*$ , por adoptar para  $K$  un valor intermedio entre el tomado para la moda (0.073) y el indicado por Jolliffe y Hutchinson (1975) para horas o períodos valle (0.015). Este valor (punto medio entre ambos) resulta ser 0.044, proporcionando los resultados que se muestran en la Figura 8.15 para  $twmax$ . En resumen, se propone la adopción de valores  $Kmd_{TW}=0.073$ ,  $Kmn_{TW}=0.131$  y  $Kmx_{TW}=0.044$  para la obtención de la moda, el mínimo y el máximo, respectivamente, de las distribuciones triangulares de las variables  $tw_{ryijk}^{ms}$  y  $tw_{rijk}^*$  (estos valores aparecen compendiados en la Tabla 8.10).

En conclusión, se obtienen para el cálculo de las variables  $tw_{rijk}^*$  y  $tw_{ryijk}^{ms}$  el conjunto de expresiones que se presentan a continuación.

**Para el año base**

$$tw_{rijk}^* = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRtw_{rijk} \mid twmin_{ijk}^*, twmax_{ijk}^*, twmod_{ijk}^* \right) \quad (8.41.a.i)$$

donde:

$$twmod_{ijk}^* = \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} + \exp \left[ -Kmd_{TW} \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \right] \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \quad (8.41.a.ii)$$

$$twmin_{ijk}^* = \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} + \exp \left[ -Kmn_{TW} \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \right] \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \quad (8.41.a.iii)$$

$$twmax_{ijk}^* = \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} + \exp \left[ -Kmx_{TW} \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \right] \cdot \left( \frac{Hs_{ijk}^*}{2} - \frac{15 \cdot Hs_{ijk}^*}{60 + Hs_{ijk}^*} \right) \quad (8.41.a.iv)$$

Los subíndices ( $r, i, j, k$ ) presentes en este conjunto de ecuaciones (8.41.a.i a 8.41.a.v) han de adoptar las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$tw_{ryijk}^{ms} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRtw_{rijk} \mid twmin_{ryijk}^{ms}, twmax_{ryijk}^{ms}, twmod_{ryijk}^{ms} \right) \quad (8.41.b.i)$$

siendo:

$$twmod_{ryijk}^{ms} = \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} + \exp \left[ -Kmd_{TW} \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \right] \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \quad (8.41.b.ii)$$

$$twmin_{ryijk}^{ms} = \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} + \exp \left[ -Kmn_{TW} \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \right] \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \quad (8.41.b.iii)$$

$$twmax_{ryijk}^{ms} = \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} + \exp \left[ -Kmx_{TW} \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \right] \cdot \left( \frac{h_{ryijk}^{ms}}{2} - \frac{15 \cdot h_{ryijk}^{ms}}{60 + h_{ryijk}^{ms}} \right) \quad (8.41.b.iv)$$

El intervalo genérico  $h$  se particulariza en las ecuaciones 8.41.b.ii a 8.41.b.iv del siguiente modo, en función del tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

En cuanto a los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de este conjunto de ecuaciones (8.41.b.i a 8.41.b.v), se han de tomar las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

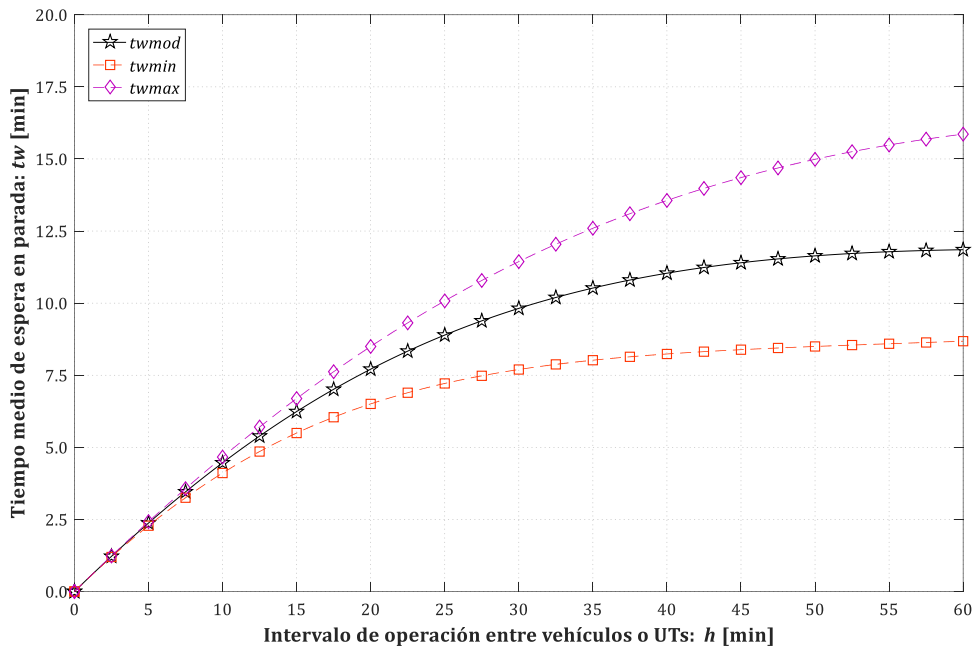
**Tabla 8.10.** Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de espera en parada o estación para los usuarios del transporte público ( $tw$  o  $tw^*$ ).

	Moda	Mínimo	Máximo
<b>Parámetro en el argumento de la función exponencial</b>	$Kmd_{tw} = 7.300000 \cdot 10^{-2}$	$Kmn_{tw} = 1.310000 \cdot 10^{-1}$	$Kmx_{tw} = 4.400000 \cdot 10^{-2}$

Complementariamente, la Figura 8.15 muestra gráficamente las funciones obtenidas al aplicar los valores del parámetro  $K$  recogidos en la Tabla 8.10 al cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares del tiempo medio de espera en parada para el usuario del transporte público ( $tw$ ). Obsérvese que para las funciones incorporadas al conjunto del modelo es importante que se cumpla que sean crecientes, al menos dentro del rango de intervalos razonablemente alcanzables (recuérdese que el dominio de variación del intervalo está limitado superiormente por la variable  $Hmax_{ij}^m$ , que representa el intervalo máximo de servicio o ‘policy headway’, el cual nunca –salvo tal vez casos excepcionalmente singulares– superará los 60 minutos para transporte público regular de ámbito urbano o metropolitano). Este requisito contrasta, por ejemplo, con la forma de la función mostrada en Vuchic (2005: p. 18, Fig. 1.8), donde el tiempo medio real de espera en parada (*actual*  $\bar{t}_w$ ) sí presenta un tramo decreciente aproximadamente entre los intervalos de 15 y 20 minutos. Dependiendo de cómo se seleccionen las combinaciones entre el tiempo medio de espera para los viajeros que tratan de ajustar su momento de llegada a la parada ( $w_{sch}$ ) y el parámetro  $K$ , expresiones de la forma de la ecuación 8.39 pueden efectivamente conducir a la presencia de tramos decrecientes en el cálculo del tiempo medio de espera en parada en función del intervalo. Sin embargo, en el contexto de la presente modelización se ha preferido evitar ese tipo de comportamiento de las funciones, ya que su hipotético uso resultaría inconsistente con las preferencias esperables por parte de los potenciales pasajeros. Esto se debe a que en el modelo desarrollado en esta tesis el tiempo medio previsible de espera en parada se utiliza como uno de los atributos de valoración de las opciones modales de viaje en transporte público (aumentando el coste generalizado para el viajero o, visto de otro modo, disminuyendo la utilidad de la opción), en

lugar de emplear directamente variables más simples como la frecuencia o el intervalo. Por ello, no sería razonable que, a igualdad de todos los demás atributos, un servicio de transporte público con menor frecuencia (mayor intervalo, por ejemplo, 20 min) resultase más atractivo para el potencial viajero —por disminuir comparativamente el coste generalizado o aumentar la utilidad al tener asociado un menor tiempo medio de espera— que ese mismo servicio pero prestado con una frecuencia mayor (menor intervalo, por ejemplo, 15 min). En conclusión, para evitar esta posible incongruencia se desaconseja en este caso el uso de funciones de tiempo medio de espera en parada que presenten segmentos decrecientes dentro de los posibles rangos habituales de variación del intervalo entre vehículos.

Por otra parte, nótese que en este caso las distribuciones triangulares del tiempo medio de espera en parada resultantes de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo no son simétricas, aunque para intervalos relativamente prolongados se aproximan bastante a ello.



**Figura 8.15.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de espera en parada o estación para los usuarios del transporte público en función del intervalo entre vehículos o unidades de transporte.

### 8.3.5.4. Fiabilidad de horarios en transporte público

#### 8.3.5.4.a. Consideraciones preliminares

En sentido amplio, el concepto de fiabilidad del transporte público puede definirse como la frecuencia o asiduidad con la que el servicio es ofrecido de acuerdo a los estándares de calidad y nivel de servicio comprometidos, incluyendo diversos aspectos como los tiempos de espera, tiempos totales de viaje, predictibilidad o consistencia de los tiempos de llegada a destino de los pasajeros entre un día y otro, niveles de ocupación en los vehículos y en estaciones o paradas, etc. (TCRP, 2013: p. 11.38). Adicionalmente pueden incorporarse cuestiones relacionadas con la inexistencia de interrupciones en la operación, como la ausencia de averías en cualquiera de los sistemas involucrados en la prestación del servicio (vehículos, infraestructuras de circulación, sistemas de seguridad, suministro de energía, información, etc.) o la disponibilidad en todo momento de un número suficiente de vehículos y operadores o conductores.

En general, los factores que inciden sobre la fiabilidad del transporte público se pueden dividir entre internos (aquellos que se hallan bajo el control de la entidad operadora o agencia de transporte público) y externos (aquellos que no están sujetos a dicho control), existiendo además interacciones entre ambos

tipos de factores (TCRP, 2013: pp. 3.13-3.14). Entre los factores internos pueden destacarse la factibilidad de los horarios previstos o programados, las estrategias de control y supervisión de las operaciones, las características de las rutas planificadas, la disponibilidad de recursos humanos y la experiencia de estos, el nivel de mantenimiento de infraestructuras y vehículos, y, en general, la disponibilidad de capital y recursos financieros suficientes. Por su parte, entre los factores externos se hallan las condiciones de las infraestructuras de circulación (especialmente en el caso de operación en tráfico mixto, con factores como la congestión del tráfico y su variabilidad o los posibles cortes por obras en vías públicas), la variabilidad en la demanda (picos en el volumen de pasajeros, eventual utilización de las rampas o elevadores de sillas de ruedas, etc.), e incluso aspectos ambientales como fenómenos meteorológicos adversos.

Desde el punto de vista del impacto sobre los viajeros, el estudio de la fiabilidad del transporte público se suele centrar en el análisis de cómo esta afecta a los tiempos de viaje de pasajeros y potenciales usuarios, influyendo no solo en los retrasos realmente sufridos sino también en los márgenes adicionales de tiempo que los pasajeros deben añadir en la planificación horaria de su viaje para adaptarse a las posibles irregularidades del servicio. Así pues, la fiabilidad de los tiempos de viaje constituye un atributo sensiblemente relevante para los viajeros (especialmente para aquellos que están sometidos a restricciones temporales en la hora de llegada a destino, como es el caso habitual de los *commuters*), de tal forma que la inclusión de los beneficios generados por potenciales mejoras en la fiabilidad de los tiempos de viaje ha ido ganando presencia en las técnicas de evaluación del transporte público durante las últimas décadas (véase, por ejemplo, van Oort (2011)).

Particularmente, la fiabilidad de horarios en transporte público puede comprender aspectos relacionados tanto con la puntualidad con respecto a las horas previstas de paso por estaciones y paradas como con la regularidad de los intervalos entre dos vehículos o unidades de transporte sucesivas. Estos aspectos relativos a la fiabilidad de horarios suelen traducirse principalmente en tres tipos de medidas o índices (TCRP, 2013: pp. 5.28-5.33):

- Puntualidad (*on-time performance*). Los criterios de puntualidad se basan en el análisis de las desviaciones con respecto al horario previsto o programado, es decir, las diferencias entre la hora real de salida de una estación o parada tomada como punto de control y la hora programada o prevista para dicha partida. Así, el índice de puntualidad se define como la fracción o porcentaje de desviaciones con respecto al horario previsto o programado que se encuentran dentro de un rango o intervalo determinado, considerado como admisible, y que se caracteriza por un límite de adelanto y un límite de retraso (generalmente diferentes entre sí). En este sentido, el *'Transit Capacity and Quality of Service Manual'* (TCRP, 2013: p. 5.29) propone —al menos en relación con el transporte público regular en el ámbito estadounidense— la adopción de un intervalo de puntualidad definido por un límite de adelanto de 1 minuto y un límite de retraso de 5 minutos, ambos medidos en la salida de las estaciones o paradas de control<sup>225</sup>. Los puntos de control para determinar el índice de puntualidad pueden incluir una sola estación o parada (en cuyo caso deberá ser seleccionada convenientemente en función de los patrones de subidas y bajadas a lo largo de la ruta), o preferiblemente, un conjunto de paradas o estaciones distribuidas a lo largo de la línea. Este último caso permite un mejor diagnóstico de las causas de la posible falta de puntualidad. Los criterios de puntualidad, aunque se pueden aplicar con carácter general siempre que exista un horario tabulado para el servicio de transporte público, resultan más adecuados para condiciones en las que se opera con intervalos no muy reducidos (mayores de 10 minutos según TCRP, 2013: p. 5.28).
- Regularidad de intervalos (*headway adherence*). Esta medida de fiabilidad se fundamenta en analizar la dispersión de los intervalos observados entre el paso de dos vehículos o unidades de transporte consecutivos (de la misma línea) en comparación con el intervalo programado o establecido para un determinado período horario. Se evalúa mediante el coeficiente de variación de los intervalos, dado

<sup>225</sup> Para el caso particular de que el punto de control sea la terminal de destino de la ruta, se consideraría únicamente la hora de llegada, con un retraso máximo admisible de 5 minutos.

por la desviación típica o estándar de los intervalos realmente observados dividida entre el intervalo medio. Las medidas de regularidad de intervalos resultan particularmente indicadas para servicios que se operan con intervalos cortos (10 minutos o menos), especialmente en condiciones de tráfico mixto, ya que además se relacionan con la mayor o menor probabilidad de que se produzcan fenómenos de alcance o apelsonamiento de vehículos de la misma línea (*vehicle bunching*).

- Exceso de tiempo de espera (*excess wait time*). El exceso de tiempo de espera se define como la diferencia entre la hora real de salida de una determinada parada o estación y la hora de partida programada o anunciada, por lo que representa el tiempo extra que los pasajeros han de permanecer esperando en la parada en comparación con lo anunciado en los horarios previstos. El exceso de tiempo de espera constituye una medida de la inconveniencia causada a los usuarios durante un viaje determinado, pero existen otras medidas relacionadas que tienen en cuenta los márgenes o tiempos adicionales que los pasajeros, basándose en su experiencia previa y conocimiento sobre la fiabilidad del servicio, han de añadir en la planificación horaria de su viaje para tener cierta certidumbre de llegar a tiempo a su destino. Entre estas medidas se encuentran: el tiempo adicional de espera en previsión de posibles adelantos (*excess platform waiting time*), que representa el tiempo extra de anticipación sobre el horario anunciado con el que los viajeros deben planificar su llegada a la parada para evitar —con un cierto nivel de confianza (98% según TCRP, 2013: p. 5.32)— perder un vehículo que parta de la parada con adelanto; el tiempo de espera potencial (*potential waiting time*), que representa el posible retraso en la salida del vehículo desde la parada —con respecto al horario anunciado— con el que los viajeros deben contar para evitar llegar tarde a su destino más que un cierto porcentaje de las veces (5% según TCRP, 2013: p. 5.32); y el tiempo de espera asignado o presupuestado (*budgeted waiting time*), que viene dado por la suma de los dos anteriores.

Como característica general, la fiabilidad de los tiempos de viaje se puede considerar como un concepto contrapuesto a la variabilidad o dispersión de los mismos. Los tiempos de viaje entre dos puntos de la red de transportes presentan intrínsecamente un carácter aleatorio, de tal modo que ese comportamiento aleatorio puede ser descrito o definido mediante una distribución estadística determinada. Bajo este enfoque, la mayor o menor dispersión de esa distribución estadística constituye un indicador inverso de la fiabilidad de los tiempos de viaje (es decir, mayor dispersión implica menor fiabilidad y menor dispersión conlleva mayor fiabilidad).

Por otra parte, en el ámbito de los estudios destinados a valorar cuantitativamente la fiabilidad de los tiempos de viaje como atributo de interés para los viajeros —ya sea en transporte público o en transporte privado— se han identificado tradicionalmente diferentes enfoques a la hora de definir o especificar dicho atributo. Estos enfoques o marcos teóricos son básicamente los siguientes (Li *et al.*, 2010; Carrion y Levinson, 2012):

- Medidas de dispersión con respecto a un valor central (*centrality-dispersion* o *mean-variance*). Se basan fundamentalmente en que la variabilidad del tiempo de viaje (o, en otras palabras, su falta de fiabilidad o predictibilidad) se considera una fuente de desutilidad para el viajero, asociada, en cierto modo, a su aversión al riesgo. Esta fuente de desutilidad actúa adicionalmente a la del propio tiempo de viaje, aunque lógicamente, con valoraciones diferentes para cada una de ellas. Este enfoque de ‘centralidad-dispersión’ también recibe habitualmente los nombres de media-dispersión (*mean-dispersion*) o media-varianza (*mean-variance*), ya que es común utilizar la media de la distribución como valor central y un parámetro ligado a la varianza (usualmente la desviación típica o estándar) como medida de la dispersión o variabilidad. No obstante, los parámetros indicadores de centralidad y dispersión pueden variar entre diferentes estudios. En cualquier caso, el cociente entre el valor o coste de una unidad de variabilidad del tiempo de viaje (por ejemplo, un minuto de desviación típica) y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo medio de viaje se denomina generalmente ratio de fiabilidad (*reliability ratio*) en el contexto de la econometría del transporte.
- Retrasos sobre la planificación del viajero (*scheduling delays*). Este enfoque es más sensible al punto de vista del viajero, al considerar la existencia intrínseca de una hora preferida de llegada (PAT o

*preferred arrival time*) por parte de aquel, la cual condiciona además la elección de su hora de salida. Esta hora preferida de llegada marcaría el punto de referencia para delimitar si el momento real de llegada constituye un retraso o un adelanto. Paralelamente, este marco teórico permite incorporar el hecho de que habitualmente el viajero valora de forma distinta el tiempo de retraso y el tiempo de adelanto. Nótese además que, en su versión más completa (*scheduling delays & dispersion*), este enfoque resulta notablemente más complejo, entre otros factores por requerir no solo la distribución de los tiempos de viaje sino también la de las horas preferidas de llegada de los viajeros. Finalmente, se debe señalar que algunos autores (Bates *et al.*, 2001; Fosgerea y Karlstrom, 2010) han encontrado que, bajo ciertas condiciones, pueden establecerse equivalencias entre los modelos basados en los retrasos sobre la planificación del viajero y aquellos otros fundamentados en la dispersión con respecto a un valor central.

- Retraso medio (*mean lateness*). Este enfoque tiene en cuenta, como fuentes de desutilidad para el viajero, las desviaciones entre el horario previsto o programado para la partida del servicio de transporte y la salida real (*lateness at boarding*), y entre el horario programado o previsto (por el operador) para la llegada a destino y la hora real de llegada (*lateness at destination*). Ha sido un enfoque utilizado principalmente en el ferrocarril británico de pasajeros, pero su marco de aplicación —con las adaptaciones que se estimen convenientes en cada caso— puede extenderse a la evaluación de los beneficios derivados de mejoras en la fiabilidad de los medios de transporte público en general (o, al menos, para todos aquellos en los que el servicio trate de ajustarse a un horario tabulado). Así, este marco conceptual se aplica, por ejemplo, en el *'Economic Evaluation Manual'* de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2016: p. 5.460), donde las mejoras de fiabilidad en transporte público se evalúan a partir de la disminución del retraso medio con respecto a los horarios previstos. Un enfoque relativamente similar se encuentra en la *'Transport Analysis Guidance'* (TAG) del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017c: pp. 14-15), donde también se propone la evaluación de los beneficios o costes asociados a la fiabilidad del transporte público en base al concepto de retraso medio <sup>226</sup>.

Por lo que respecta a la forma de aplicar la valoración de la fiabilidad de los tiempos de viaje en el modelo desarrollado en la presente tesis, una primera cuestión a dilucidar es la selección del enfoque más apropiado para la cuantificación de la fiabilidad en los modos de transporte público objeto de estudio. Para esta elección debe tomarse en consideración que además debe existir una congruencia adecuada entre el tipo de índice o magnitud en que se mida dicho atributo y el formato del valor o coste unitario que se utilice para su valoración. A la luz de la información analizada anteriormente, el enfoque de la variabilidad o dispersión de los tiempos de viaje sería el apropiado para los desplazamientos efectuados en vehículo privado, mientras que para los viajes en transporte público resulta más adecuado —o al menos más común— un enfoque basado en la medición de los retrasos. Esta diferenciación entre enfoques para transporte público y privado es la aplicada por NZTA (2016: pp. 5.212, 5.460) y por DfT (2017c: pp. 12-15). Así pues, se adopta el enfoque de los retrasos medios como medida cuantitativa de la fiabilidad de los tiempos de viaje en los modos de transporte público a analizar.

Nótese, no obstante, que esta elección no resulta trivial al no tratarse de un criterio estandarizado sobre el que exista un amplio consenso. Por ejemplo, Kouwenhoven *et al.* (2014), en uno de los estudios que recientemente han abordado con más amplitud la valoración de la fiabilidad y del tiempo de viaje por parte de los viajeros (con encuestas en preferencias declaradas realizadas en los Países Bajos), adoptan la desviación típica de los tiempos de viaje como medida de la fiabilidad, independientemente de que se trate de transporte público o privado. Dichos autores argumentan que este enfoque resulta más sencillo de integrar en los modelos predictivos de transporte comúnmente utilizados para el análisis coste-

<sup>226</sup> En el caso de la *'Transport Analysis Guidance'* (DfT, 2017c: pp.14-15), se plantea —al menos idealmente— la incorporación también de la variabilidad del propio retraso, medida a través de su desviación típica. No obstante, dado que en muchas ocasiones la información necesaria para calcular la desviación típica del retraso no estará disponible, y que la importancia relativa de la variabilidad es reducida en comparación con el efecto del retraso propiamente dicho, se admite que por motivos prácticos se pueda prescindir de la incorporación explícita de la variabilidad (en su lugar se propone un incremento del 20% en el coste o valor de cada unidad de tiempo de retraso medio).

beneficio, de forma que cualquier otra opción implicaría “pedirle demasiado” a dichos modelos. Del mismo modo, en HEATCO (2006: pp. 66-68) se aboga también por el uso de la desviación típica de los tiempos de viaje como indicador cuantitativo de la fiabilidad del transporte (con una visión bastante orientada al transporte por carretera), manifestando unos argumentos similares a los señalados por Kouwenhoven *et al.* (2014).

En conclusión, se aborda a continuación el estudio de la fiabilidad de tiempos de viaje ofrecida a pasajeros y potenciales usuarios por los distintos modos de transporte público bajo análisis, utilizando para ello la perspectiva de los retrasos medios (*mean/average lateness*), si bien se reconoce la existencia de diferentes criterios al respecto.

#### 8.3.5.4.b. Tiempo de retraso medio en el transporte público

La variable  $mlt_{ryjk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , una estimación del tiempo medio de retraso en el servicio de transporte público operado en la línea  $i$  mediante el modo  $m$  (autobús en tráfico mixto, metro ligero o tranvía, y BHLS o BRT), durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones de operación previstas para el escenario  $s$  en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el año base se designa  $mlt_{ryjk}^*$ , donde se omiten, por innecesarios, los índices especificativos de escenario ( $s$ ), modo ( $m$ ) y año ( $y$ ).

La unidad de tiempo empleada en la presente formulación para expresar la cuantía de las variables  $mlt_{ryjk}^{ms}$  y  $mlt_{ryjk}^*$  es el minuto [min].

En este contexto, se define el tiempo medio de retraso (o, abreviadamente, retraso medio) como la esperanza matemática o media de las desviaciones (sin contabilizar los posibles tiempos de adelanto como desviaciones negativas) entre la hora real de partida desde las estaciones y paradas de una línea y el horario previsto, programado o anunciado para cada una de esas salidas. Una cuestión importante en relación con esta definición consiste en cómo han de ser tratados los adelantos o desviaciones negativas. El criterio adoptado al respecto es que los posibles adelantos sean considerados de forma neutra, es decir, que en el cálculo del tiempo medio de retraso se computen como si se tratase de servicios puntuales en lugar de contabilizarlos como ‘retrasos de signo negativo’. Este tipo de criterio es común en el análisis de la fiabilidad de servicios ferroviarios (ATOC, 2005; Batley e Ibáñez, 2009; Li *et al.*, 2010; Carrion y Levinson, 2012; DfT, 2017c: pp. 14-15), pudiendo justificarse su extensión a otros modos de transporte público en un balance o equilibrio entre efectos perjudiciales y beneficiosos del posible adelanto. Por un lado se tiene que aquella fracción de viajeros que lleguen a la correspondiente parada en un momento demasiado próximo al horario programado para la salida pueden verse afectados negativamente por el adelanto, al perder el vehículo o unidad de transporte que pretendían tomar y tener que esperar por el siguiente servicio (esta circunstancia tendrá mayor o menor repercusión en función del intervalo o frecuencia del servicio). Por otra parte, el adelanto supondrá un cierto beneficio en los tiempos de viaje para los usuarios que ya se encontraban en ese momento en la parada (ven reducido su tiempo de espera) y para los que ya viajan a bordo del vehículo, que pueden llegar a su destino antes de lo previsto. Así pues, el posible adelanto puede suponer un perjuicio considerable para un pequeño grupo de usuarios y un beneficio individual de bastante menor magnitud para la mayor parte de los pasajeros, por lo que, a falta de criterios más precisos, se adopta el enfoque de neutralidad de los adelantos.

Para establecer el tiempo de retraso medio asignado a cada modo de transporte público en unas condiciones determinadas se ha de diferenciar la metodología de análisis en función del entorno operativo en el que aquellos circulan (tráfico mixto frente a dotación de plataforma reservada y priorización semafórica), ya que los factores principales (variables independientes en las funciones de cálculo) que pueden incidir sobre la pérdida de fiabilidad de los tiempos de viaje son distintos en uno u otro caso. Por otra parte, la información tomada como referencia para establecer la magnitud de los retrasos medios en cada uno de estos dos tipos de modos va a proceder de los valores orientativos del índice de puntualidad dados por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit 5.21*). Dichos índices o porcentajes de

puntualidad están referidos a un intervalo de desviaciones admisibles limitado por un adelanto máximo de 1 minuto y un retraso límite de 5 minutos, ambos medidos en la salida de las estaciones o paradas (excepto en el caso particular de la terminal de final de ruta, donde se aplicaría un retraso máximo en la llegada de 5 minutos pero sin limitar su adelanto máximo). En cualquier caso, dado que estas medidas de fiabilidad del transporte público están dadas en forma de índice de puntualidad, es necesario establecer una equivalencia con el retraso medio correspondiente, ya que esta última es la magnitud que se ha decidido emplear en el desarrollo de la modelización. Sin embargo, el índice de puntualidad, por sí solo, no es un elemento suficiente para determinar unívocamente el retraso medio equivalente, por lo que resulta imprescindible asumir ciertas hipótesis para poder desarrollar la relación de equivalencia entre ambas medidas.

La primera de estas hipótesis consiste en que tanto los posibles retrasos, por una parte, como los posibles adelantos, por otra, se distribuyen de acuerdo a una de las mitades de sendas distribuciones normales de media 0 y, en general, distintas desviaciones típicas o estándar (una para la parte correspondiente a los retrasos y otra diferente para la parte de los adelantos). Estas condiciones significan que la función de densidad de probabilidad de las desviaciones  $d$  entre las horas reales de partida desde las estaciones y paradas ( $t$ ) y el horario previsto en cada caso ( $t_s$ ), tal que  $d=t-t_s$ , es asimétrica y presenta un máximo (moda) en  $d=0$  (véase Figura 8.16). La segunda de las hipótesis se relaciona con la magnitud de dicha asimetría. En general parece razonable suponer que la fracción de vehículos o unidades de transporte que transitan con un cierto retraso ( $d>0$ ) es mayor que la de aquellos que circulan con adelanto ( $d<0$ ), especialmente a la vista de la propia asimetría (con respecto a  $d=0$ ) del intervalo de cumplimiento del criterio de puntualidad. Además, también parece lógico que el desequilibrio entre la fracción de retrasos y la de adelantos sea menos acusada cuando se alcancen índices de puntualidad muy elevados, pero aumente a medida que disminuye el cumplimiento del criterio de puntualidad (es decir, para servicios poco puntuales la gran mayoría de los incumplimientos se producirían por exceso de retraso, ya que es mucho más sencillo corregir los posibles adelantos que los retrasos acumulados). Así pues, denominando  $\Lambda$  a la fracción de vehículos o unidades de transporte que transitan con retraso y  $P$  al índice de puntualidad (expresado en forma decimal, no en porcentaje), se asume que la relación entre ambos venga dada por la expresión  $\Lambda=1-P/9-2\cdot P^2/9$ . Con esta relación,  $\Lambda$  valdría dos tercios ( $2/3$ ) para un índice de puntualidad igual a 1 (100%) y alcanzaría el valor 1 (todos los vehículos retrasados) en caso de un hipotético incumplimiento absoluto del criterio de puntualidad ( $P=0$ )<sup>227</sup>.

En resumen, la función de densidad de probabilidad de las desviaciones horarias ( $f_D$ ) se construye formalmente a partir de las siguientes premisas:

$$f_D(d) : \begin{cases} \text{si } d \geq 0 : f_D(d) = \Lambda \cdot f_L(d), \text{ siendo } L = |X| / X \sim N(0, \sigma_X) \\ \text{si } d < 0 : f_D(d) = (1 - \Lambda) \cdot f_E(|d|), \text{ siendo } E = |Y| / Y \sim N(0, \sigma_Y) \end{cases} \quad (8.42.a.i)$$

donde  $f_L$  es la función de densidad de probabilidad de la cuantía de los retrasos (variable aleatoria  $L$ );  $f_E$  es la función de densidad de probabilidad de la cuantía de los adelantos<sup>228</sup> (variable aleatoria  $E$ ); y  $X$  e  $Y$  son variables aleatorias auxiliares que se distribuyen según distribuciones normales de media 0 y desviaciones típicas  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$ , respectivamente.

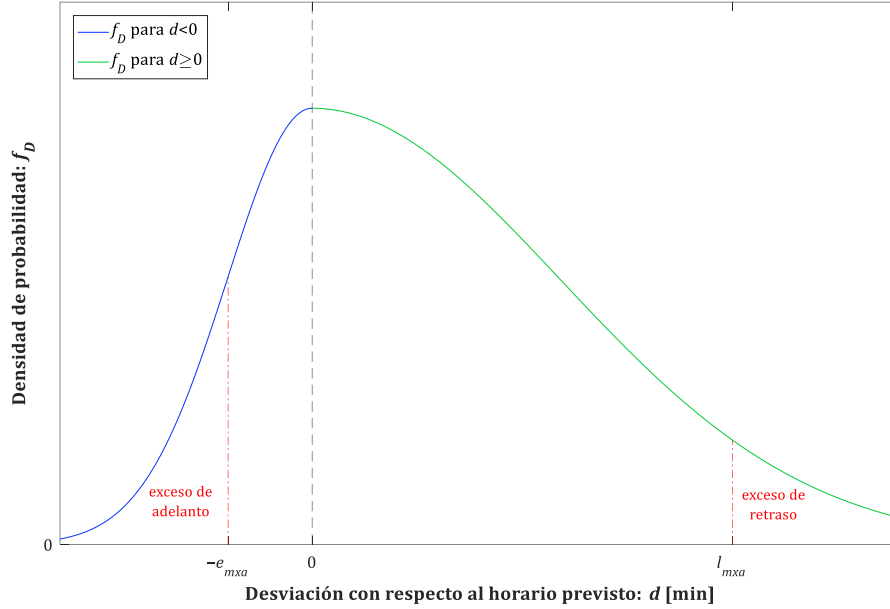
Así pues, de forma más específica,  $f_D$  queda definida matemáticamente del siguiente modo (véase también Figura 8.16):

<sup>227</sup> A un índice de puntualidad del 50% ( $P=0.50$ ) se le ha asignado un valor de  $\Lambda$  de  $8/9$  a fin de determinar totalmente la relación cuadrática entre  $P$  y  $\Lambda$ .

<sup>228</sup> La variable tiempo de adelanto ( $E$ ) se considera una magnitud positiva en esta formulación (igual por tanto al valor absoluto de la desviación negativa).



$$f_D(d): \begin{cases} \text{si } d \geq 0 : f_D(d) = \Lambda \cdot 2 \cdot \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{\sigma_X}\right)^2\right] \\ \text{si } d < 0 : f_D(d) = (1 - \Lambda) \cdot 2 \cdot \frac{1}{\sigma_Y \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{\sigma_Y}\right)^2\right] \end{cases} \quad (8.42.a.ii)$$



**Figura 8.16.** Ejemplo ilustrativo de la función de densidad de probabilidad (definida por subdominios) de las desviaciones entre las horas observadas de partida real desde las estaciones o paradas y el respectivo horario previsto o programado.

En principio, las desviaciones típicas  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  son dos incógnitas desconocidas cuyos valores dependen del índice de puntualidad  $P$  (junto con los límites del intervalo que definen el criterio de puntualidad) y de  $\Lambda$  (que a su vez se considera función de  $P$ ). No obstante, se puede establecer una relación entre  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  —reduciéndolas así a una sola incógnita— mediante la condición de continuidad de la función de densidad de probabilidad  $f_D$  en el punto  $d=0$ , que marca el límite entre los dos subdominios de la función. Por tanto se tiene:

$$\begin{aligned} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_D(0 + \varepsilon) &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_D(0 - \varepsilon) \Rightarrow \Lambda \cdot f_L(0) = (1 - \Lambda) \cdot f_E(0) \Rightarrow \Lambda \cdot 2 \cdot f_X(0) = \\ &= (1 - \Lambda) \cdot 2 \cdot f_Y(0) \Rightarrow \Lambda \cdot 2 \cdot \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp(0) = (1 - \Lambda) \cdot 2 \cdot \frac{1}{\sigma_Y \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp(0) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \sigma_Y = \frac{1 - \Lambda}{\Lambda} \cdot \sigma_X \end{aligned} \quad (8.42.b)$$

El paso siguiente para determinar el valor de la desviación típica  $\sigma_X$  (y con ello obtener también el de  $\sigma_Y$ ) consiste en hacer uso de la definición, en términos probabilísticos, del índice de puntualidad  $P$ , dado un intervalo de cumplimiento del criterio de puntualidad limitado por un retraso máximo admisible  $l_{mxa}$  y un máximo adelanto aceptable  $e_{mxa}$ . Nótese que el adelanto máximo aceptable, de acuerdo al criterio de signos adoptado para la variable tiempo de adelanto ( $E$ ), se define en la formulación como un valor de signo positivo. Por tanto se tiene:

$$1 - P = \Pr(d > l_{mxa}) + \Pr(d < -e_{mxa}) = (1 - F_D(l_{mxa})) + F_D(-e_{mxa}) \quad (8.42.c)$$

donde se emplea la notación  $F_V$  para referirse a la función de distribución acumulada de cualquier variable aleatoria  $V$ .

A continuación, aplicando las relaciones establecidas en las ecuaciones 8.42.a.i y 8.42.a.ii se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} 1 - F_D(l_{mxa}) &= \Lambda \cdot [1 - F_L(l_{mxa})] \\ 1 - F_L(l_{mxa}) &= 2 \cdot [1 - F_X(l_{mxa})] \end{aligned} \right\} \Rightarrow 1 - F_D(l_{mxa}) = \Lambda \cdot 2 \cdot [1 - F_X(l_{mxa})] \quad (8.42.d.i)$$

$$\left. \begin{aligned} F_D(-e_{mxa}) &= (1 - \Lambda) \cdot [1 - F_E(-e_{mxa})] \\ 1 - F_E(e_{mxa}) &= 2 \cdot [1 - F_Y(e_{mxa})] \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_D(-e_{mxa}) = (1 - \Lambda) \cdot 2 \cdot [1 - F_Y(e_{mxa})] \quad (8.42.d.ii)$$

E introduciendo las igualdades dadas por las ecuaciones 8.42.d.i y 8.42.d.ii en 8.42.c pueden obtenerse las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} 2 \cdot (\Lambda \cdot [1 - F_X(l_{mxa})] + (1 - \Lambda) \cdot [1 - F_Y(e_{mxa})]) &= 1 - P \Rightarrow \\ \Rightarrow \Lambda \cdot F_X(l_{mxa}) + (1 - \Lambda) \cdot F_Y(e_{mxa}) &= 1 - \frac{1 - P}{2} \end{aligned} \quad (8.42.e.i)$$

Finalmente, normalizando las variables  $X$  e  $Y$  a una distribución normal estándar, se llega a:

$$\begin{aligned} \Lambda \cdot F_{SN}\left(\frac{l_{mxa} - 0}{\sigma_X}\right) + (1 - \Lambda) \cdot F_{SN}\left(\frac{e_{mxa} - 0}{\sigma_Y}\right) &= 1 - \frac{1 - P}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Lambda \cdot F_{SN}\left(\frac{l_{mxa}}{\sigma_X}\right) + (1 - \Lambda) \cdot F_{SN}\left(\frac{e_{mxa}}{\frac{1 - \Lambda}{\Lambda} \cdot \sigma_X}\right) + \frac{1 - P}{2} - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (8.42.e.ii)$$

donde  $F_{SN}$  denota la función de distribución acumulada de una normal estándar  $N(0,1)$ .

La segunda igualdad de la ecuación 8.42.e.ii se ha de resolver numéricamente para obtener el valor de la desviación típica  $\sigma_X$ .

Una vez calculado el valor de  $\sigma_X$ , es posible obtener la esperanza matemática o media de la cuantía de los retrasos (es decir, de la variable aleatoria  $L$ ). Esta media o esperanza matemática  $E[L]$  es, en último término, la media de las desviaciones  $d$  condicionadas a que  $d$  sea mayor o igual que 0, pero no debe confundirse con el tiempo medio de retraso (que incluye también los posibles adelantos, aunque contabilizados como si se tratase de una desviación nula). Con un elevado nivel de aproximación,  $E[L]$  puede calcularse como:

$$E[L] \approx 0.798 \cdot \sigma_X \quad (8.42.f)$$

Mediante simulación numérica, puede comprobarse que la media de los valores  $V$  extraídos de una distribución normal de media 0 y desviación típica  $\sigma$  condicionados a  $V \geq 0$ <sup>229</sup> es aproximadamente igual a 0.798 veces la desviación típica  $\sigma$ . De ahí el factor 0.798 que aparece en la ecuación 8.42.f.

Ya por último, se puede calcular el tiempo medio de retraso ( $mlt$ ) como la media ponderada entre la esperanza matemática de la cuantía de los retrasos (fracción  $\Lambda$ ) y el valor nulo (0) que se asigna a los adelantos (fracción  $1 - \Lambda$ ). Por tanto:

$$mlt = \Lambda \cdot E[L] + (1 - \Lambda) \cdot 0 \approx \Lambda \cdot 0.798 \cdot \sigma_X \quad (8.42.g)$$

<sup>229</sup> Alternativamente, se puede tomar el valor absoluto de cualquier valor extraído  $V$ , dada la simetría de la distribución normal de media 0.

Para concluir, en la Tabla 8.11 se muestran los tiempos medios de retraso que, de acuerdo a la aplicación práctica del procedimiento descrito, resultan equivalentes a diferentes valores del índice o porcentaje de puntualidad. Los cálculos pertinentes se han efectuado para unos límites del intervalo de puntualidad iguales a los propuestos y adoptados por TCRP (2013: pp. 5.29-5.30), con lo que el retraso máximo admitido es de 5 minutos y el máximo adelanto aceptable es de 1 minuto ( $I_{mxa}=5$  y  $e_{mxa}=1$ , respectivamente). Por su parte, como función de interrelación entre  $\Lambda$  y  $P$  se ha mantenido la propuesta anteriormente, es decir,  $\Lambda=1-P/9-2\cdot P^2/9$ .

**Tabla 8.11.** Equivalencias propuestas entre índice de puntualidad y tiempo medio de retraso, para un adelanto máximo aceptable de 1 minuto y un máximo retraso admitido de 5 minutos.

Índice (porcentaje) de puntualidad: Pr( $-1 \leq d \leq 5$ ), con $d$ en minutos	Tiempo medio de retraso (min)
0.9999 (99.99%)	0.2944
0.999 (99.9%)	0.3598
0.99 (99%)	0.5084
0.95 (95%)	0.8913
0.90 (90%)	1.3466
0.85 (85%)	1.7575
0.80 (80%)	2.1639
0.75 (75%)	2.5901
0.70 (70%)	3.0516
0.65 (65%)	3.5625
0.60 (60%)	4.1379
0.55 (55%)	4.7971
0.50 (50%)	5.5661
0.45 (45%)	6.4816
0.40 (40%)	7.5979

A continuación se pasa a analizar el tiempo medio de retraso que, bajo unas condiciones de operación determinadas, corresponde asignar a cada modo de transporte público en función del entorno operativo en el que circule (tráfico mixto frente a dotación de plataforma reservada y priorización semafórica).

### 8.3.5.4.c. Tiempo de retraso medio en autobús convencional (operación en tráfico mixto)

A efectos de aplicación en el modelo desarrollado, los tiempos de retraso medio en autobús convencional (variables  $mlt_{ryijk}^{0s}$ , o  $mlt_{rijk}^*$  en el año base) son obtenidos en cada simulación en base a distribuciones triangulares de probabilidad, con valores calculados a partir de la componente aleatoria  $TRltm_{rik}$ . Este último valor procede de la correspondiente distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), para la cual se generaron con anterioridad las respectivas extracciones aleatorias (epígrafe 6.4.4.2). Así pues, resulta necesario ahora establecer, en función de las condiciones de operación, los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales que van a ser empleadas para la obtención del retraso medio.

Una primera cuestión al respecto es la selección de la variable más apropiada para ser utilizada como variable independiente en las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo. Para ello es conveniente revisar las principales fuentes potenciales de variabilidad del tiempo de operación —y consecuentemente de posibles retrasos— para el caso del autobús convencional en tráfico mixto (recuérdese el epígrafe 8.3.4.5.a). En este sentido, es de destacar, en primer lugar, el tiempo acumulado de recorrido o circulación de los tramos entre paradas, el cual se ve afectado fundamentalmente por el volumen de tráfico mixto previsto para el vial o viales de circulación en proporción a su capacidad representativa (ratio Volumen/Capacidad, dado por las variables  $VCR_{rijk}^*$  o  $VCR_{ryijk}^s$ ). En cuanto a los tiempos de parada o estación, una componente potencialmente sujeta a altos niveles de variabilidad es

la demora de reincorporación al flujo de tráfico mixto por cada parada entrante o en bahía, la cual también se calcula en función del ratio Volumen/Capacidad. Otro aspecto que no debe ser obviado es el potencial incremento del tiempo de paradas o estaciones por efecto de la posible superación momentánea de su capacidad (sobrecarga), al tener que añadirse, bajo dichas circunstancias, los tiempos adicionales eventualmente perdidos por los autobuses en espera de un espacio libre de embarque/desembarque en las correspondientes paradas o estaciones. Se asume que la ocurrencia y magnitud de estos eventos es función del cociente entre el intervalo de operación programado o previsto y el intervalo mínimo de diseño ( $h/H_{min}$ ), que guarda una relación inversamente proporcional con la proporción de utilización de la capacidad máxima de diseño (en veh/h) de la línea de transporte público. Así, estos fenómenos se pueden considerar irrelevantes para valores del cociente  $h/H_{min}$  suficientemente altos ( $h/H_{min} > 2$ ) y ganan intensidad a medida que dicho ratio desciende hasta valores próximos a 1.0. Por último, otro factor que se puede identificar como fuente de variabilidad es el tiempo dedicado a la entrada y salida de pasajeros del vehículo, fundamentalmente en lo concerniente a ciertas oscilaciones imprevistas de la demanda (dentro de un mismo período horario) y a la eventual necesidad de desplegar y hacer uso de rampas o elevadores de sillas de ruedas. No obstante, a efectos de su inclusión en las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio, la variabilidad no previsible de los tiempos de entrada y salida de pasajeros se va a considerar de importancia secundaria frente a los factores anteriores, ya que, a diferencia de aquellos, estos fenómenos no se pueden asociar claramente a unas condiciones de operación determinadas (como podría ser un elevado volumen de tráfico mixto o un intervalo de operación cercano al mínimo), por lo que se puede asumir, de forma simplificada, que se manifiestan como un nivel mínimo de variabilidad añadida que puede estar presente bajo cualquier circunstancia.

Por tanto, como variable independiente de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo se ha de adoptar un índice que combine el ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto y el cociente entre el intervalo programado para la operación del transporte público y el intervalo mínimo de diseño (o, inversamente, la proporción de utilización efectiva de la capacidad máxima de diseño —en veh/h— de la línea de transporte público). La variabilidad de los tiempos de operación, y con ello la cuantía de los posibles retrasos, aumenta previsiblemente a medida que se incrementa el ratio Volumen/Capacidad, el cual, salvo para casos excepcionales en los que la demanda de tráfico mixto llegue a superar la capacidad del viario, está comprendido entre 0 y 1 (valores adimensionales). A efectos de combinar dicho ratio Volumen/Capacidad con una medida de la utilización efectiva de la capacidad máxima de la línea de transporte público, resulta conveniente que esta segunda medida cumpla el mismo tipo de propiedades que el ratio Volumen/Capacidad (es decir, que el tiempo de retraso medio sea creciente con la medida o índice en cuestión y que el intervalo de variación de dicha magnitud adimensional esté comprendido entre 0 y 1). Por ello, en lugar de utilizar el cociente entre el intervalo programado o previsto y el intervalo mínimo de diseño ( $h/H_{min}$ ), se ha de construir el segundo componente del índice combinado en base a su valor inverso ( $H_{min}/h$ ). Dado que la posible superación momentánea de la capacidad de las paradas empieza a ponerse de relieve cuando el cociente  $h/H_{min}$  desciende por debajo de 2, inversamente, el cociente  $H_{min}/h$  debe superar el valor de 0.5 para que dicho efecto comience a ser relevante, alcanzando su máxima intensidad para  $H_{min}/h = 1$  (es decir, para  $h = H_{min}$ ). Por tanto, un primer paso hacia la construcción de ese segundo componente del índice combinado vendría dado por la expresión  $\max\{H_{min}/h - 0.5, 0\}$ . Adicionalmente, al objeto de conservar el rango de variación de este segundo componente entre 0 y 1, se ha de multiplicar dicha expresión por 2, de forma que se obtiene finalmente  $2 \cdot \max\{H_{min}/h - 0.5, 0\}$ .

Por último, se han de ponderar los dos componentes según la importancia relativa que se estime para cada uno de ellos a la hora de ser origen de potenciales retrasos en la operación de autobuses convencionales en tráfico mixto. A tal efecto, se han adoptado coeficientes de tres cuartos (3/4) para el ratio Volumen/Capacidad y de un cuarto (1/4) para la medida representativa de la proporción de utilización efectiva de la capacidad máxima (en veh/h) de la línea de autobús ( $2 \cdot \max\{H_{min}/h - 0.5, 0\}$ ).

Obsérvese que el índice resultante de esta combinación también presenta un rango de variación comprendido generalmente entre 0 y 1 (salvo para los casos excepcionales comentados anteriormente, en los que puede llegar a superar el valor 1).

En cuanto a la forma funcional de las expresiones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio, se plantean polinomios de segundo grado tales que, además de ser crecientes con el valor del índice combinado, tengan derivada segunda positiva (primera derivada creciente). Esto se traduce en que el retraso medio marginal ocasionado por un aumento diferencial en el valor del índice combinado aumenta paulatinamente a medida que este último se hace más elevado. Paralelamente, se establece que estos polinomios presenten primera derivada nula para un valor del índice combinado igual a 0.

A continuación, para completar la determinación de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo, se han de adoptar unos valores de referencia del tiempo de retraso medio en autobús convencional, tanto para las condiciones más favorables posibles (índice combinado muy próximo a 0), como para las condiciones más desfavorables (índice combinado en el entorno de 1). Al respecto, se toman como información de partida los valores orientativos del índice de puntualidad dados por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit* 5.21), los cuales están referidos a un retraso máximo admitido de 5 minutos y a un máximo adelanto aceptable de 1 minuto (en consonancia con el cuadro de equivalencias entre puntualidad y tiempo medio de retraso desarrollado en la Tabla 8.11).

Para los servicios de autobús, TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit* 5.21) indica rangos alcanzables del índice de puntualidad del 80 al 89% para ciudades de tamaño pequeño a mediano, del 70 al 79% para ciudades grandes, e índices de puntualidad inferiores al 70% como mejor resultado posible para distritos centrales (literalmente CBD o '*Central Business District*') sometidos a una elevada congestión. Nótese, por un lado, que la designación de estos índices de puntualidad como 'alcanzables' parece indicar que se trata de valores relativamente elevados en comparación con los rangos típicos más habituales, y, por otra parte, que la propia fuente reconoce que una línea determinada puede obtener unos resultados de puntualidad considerablemente mejores o peores que los señalados dependiendo de las condiciones locales.

Así pues, se toma como índice de puntualidad máximo para las condiciones más favorables (correspondientes a ciudades pequeñas, con escasa congestión) un valor del 90%, de forma que el mínimo del tiempo de retraso medio para un índice combiando igual a 0 queda establecido en 1.35 minutos (véanse equivalencias en la Tabla 8.11). Para estas mismas condiciones, la moda del tiempo medio de retraso se determina a partir de un índice de puntualidad del 80%, que equivale a 2.16 minutos de retraso medio. Por su parte, como índice mínimo de puntualidad en las condiciones favorables se ha adoptado un valor del 70% en consideración de las notificaciones expuestas en el párrafo anterior, que apuntan a que no es infrecuente obtener índices de puntualidad inferiores a los indicados por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit* 5.21). A este índice mínimo de puntualidad del 70% le corresponde un tiempo (máximo) de retraso medio de 3.05 minutos.

En el extremo opuesto, para las condiciones más desfavorables (representadas por los distritos centrales con alta congestión), se selecciona un índice máximo de puntualidad del 70%, de acuerdo al límite superior señalado por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit* 5.21). Por tanto, el tiempo (mínimo) de retraso medio para un índice combiando igual a 1 se establece en 3.05 minutos. Como índice mínimo de puntualidad en estas mismas condiciones desfavorables se ha adoptado un valor del 40%, al que corresponde un tiempo (máximo) de retraso medio de 7.60 minutos. Por último, para la moda del tiempo de retraso medio se toma un índice de puntualidad intermedio del 55%, cuya equivalencia es de 4.80 minutos.

Finalmente, con los valores de tiempo de retraso medio arriba indicados (puntos de paso de las funciones de cálculo), y la condición adicional de primera derivada nula para un índice combinado igual a 0, quedan determinados los coeficientes de los polinomios de segundo grado planteados. Obsérvese que, aunque se hayan adoptado como referencia índices de puntualidad con mínimos y máximos

simétricos respecto a la moda, las distribuciones triangulares del tiempo de retraso medio definidas por estos polinomios no son simétricas (si bien en general se aproximan bastante a ello) debido a la no linealidad de la equivalencia entre índice de puntualidad y tiempo medio de retraso.

En conclusión, la obtención de las variables  $mlt^*_{rijk}$  (para el año base) y  $mlt^{0s}_{ryijk}$  (para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0) se rige por los conjuntos de ecuaciones comprendidos entre la 8.43.a.i y 8.43.a.iv, y 8.43.b.i a 8.43.b.iv, respectivamente. Complementariamente, los valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, el mínimo y el máximo de las correspondientes distribuciones triangulares se especifican en la Tabla 8.12, de cara a la aplicación práctica de la modelización desarrollada. Asimismo, en la Figura 8.17 se muestra la representación gráfica de estas funciones al aplicar los coeficientes propuestos.

Por último, la Figura 8.18 ilustra el comportamiento del tiempo de retraso medio en autobús convencional ante variaciones en el valor de cada una de las dos magnitudes que forman parte del índice combinado ( $VCR$  y  $Hmin/h$ ). Por simplicidad de la representación gráfica se muestra únicamente la moda del tiempo de retraso medio, pero, desde un punto de vista cualitativo, el tipo de comportamiento para el mínimo y para el máximo es similar al de la moda. Obsérvese que en el gráfico se incluyen únicamente valores de  $Hmin/h$  mayores o iguales a 0.5, ya que para cualquier valor menor a esa cantidad los resultados del tiempo de retraso medio no dejan de ser iguales a los del caso  $Hmin/h=0.5$ .

**Para el año base**

$$mlt^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}}(TRl_{tm}_{rik} \mid mltmin^*_{rijk}, mltmax^*_{rijk}, mltmod^*_{rijk}) \tag{8.43.a.i}$$

donde:

$$mltmod^*_{rijk} = Kmd2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmd1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmd0_{MLT} \tag{8.43.a.ii}$$

$$mltmin^*_{rijk} = Kmn2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmn1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmn0_{MLT} \tag{8.43.a.iii}$$

$$mltmax^*_{rijk} = Kmx2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmx1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR^*_{rijk} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin^0_{ij}}{Hs^*_{ijk}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmx0_{MLT} \tag{8.43.a.iv}$$

Los subíndices ( $r,i,j,k$ ) contenidos en las ecuaciones 8.43.a.i a 8.43.a.iv han de tomar los valores siguientes:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0

$$mlt_{ryijk}^{0s} = \text{triang}^{\text{II}} \left( \text{TR}l_{m_{rik}} \mid mltmin_{ryijk}^{0s}, mltmax_{ryijk}^{0s}, mltmod_{ryijk}^{0s} \right) \quad (8.43.b.i)$$

siendo:

$$mltmod_{ryijk}^{0s} = Kmd2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmd1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmd0_{MLT} \quad (8.43.b.ii)$$

$$mltmin_{ryijk}^{0s} = Kmn2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmn1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmn0_{MLT} \quad (8.43.b.iii)$$

$$mltmax_{ryijk}^{0s} = Kmx2_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right)^2 + Kmx1_{MLT} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot VCR_{ryijk}^s + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \max \left\{ \frac{Hmin_{ij}^0}{h_{ryijk}^{0s}} - 0.5, 0 \right\} \right) + Kmx0_{MLT} \quad (8.43.b.iv)$$

El intervalo genérico  $h$  se particulariza en las ecuaciones 8.43.b.ii a 8.43.b.iv del siguiente modo, en función del tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hb_{ryijk}^{0s}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{0s} \equiv Hs_{ryijk}^{0s}$

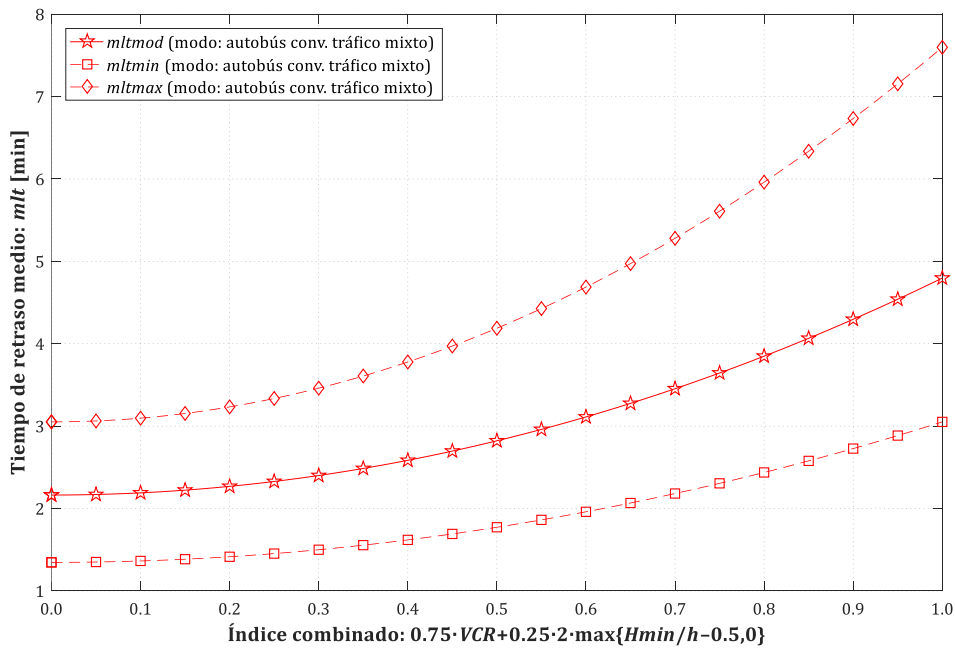
En cuanto a los índices genéricos  $(r,s,y,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.43.b.i a 8.43.b.iv, estos deben adoptar los valores indicados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

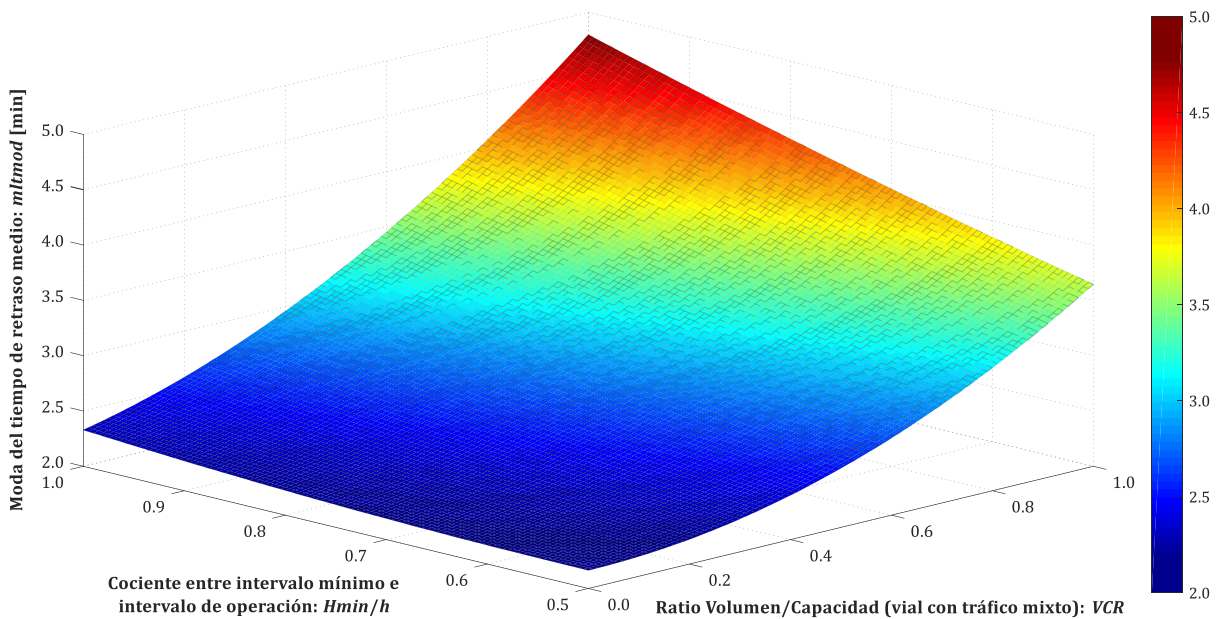
$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Tabla 8.12.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso ( $mlt$  o  $mlt^*$ ) en autobús convencional en tráfico mixto.

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd2_{MLT} = 2.633244$	$Kmd1_{MLT} = 0$	$Kmd0_{MLT} = 2.163904$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2_{MLT} = 1.705058$	$Kmn1_{MLT} = 0$	$Kmn0_{MLT} = 1.346582$
<b>Máximo</b>	$Kmx2_{MLT} = 4.546277$	$Kmx1_{MLT} = 0$	$Kmx0_{MLT} = 3.051640$



**Figura 8.17.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso en autobús convencional en tráfico mixto en función del índice combinado de utilización de las capacidades del vial de circulación y de la línea de transporte público.



**Figura 8.18.** Moda del tiempo de retraso medio en autobús convencional en función del ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto y del cociente entre el intervalo mínimo de diseño y el intervalo de operación previsto o programado.

**8.3.5.4.d. Tiempo de retraso medio en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica**

Los tiempos de retraso medio en sistemas de transporte público dotados de plataforma reservada y priorización semafórica (variable  $mlt_{ryijk}^{ms}$ , con  $m=s=R$  para metro ligero o tranvía y  $m=s=B$  para BHLS o BRT) se obtienen en las simulaciones del modelo desarrollado de acuerdo a distribuciones triangulares de probabilidad, con valores específicos determinados por la componente aleatoria  $TRltr_{rik}$  (nótese que



esta componente aleatoria  $TRl_{tr_{rik}}$  es distinta de la utilizada para los tiempos de retraso medio en autobús convencional en tráfico mixto). El valor  $TRl_{tr_{rik}}$  procede a su vez de la respectiva distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), sobre la cual fueron generadas en su momento (epígrafe 6.4.4.3) las sucesivas extracciones aleatorias. En consecuencia, procede ahora establecer los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales que se van a emplear para la obtención del retraso medio en este tipo de modos.

En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de variable independiente que va a ser utilizada en las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo, para lo que resulta adecuado revisar las fuentes fundamentales de variabilidad del tiempo de operación —y por consiguiente de posibles retrasos— en este tipo de sistemas (recuérdense los epígrafes 8.3.4.5.b y 8.3.4.5.c). Así, se deben destacar en primer término, tanto para metro ligero o tranvía como para BHLS o BRT, los factores de discordancia entre el tiempo teórico de recorrido calculado para las condiciones ideales de circulación y el tiempo efectivamente empleado en condiciones de explotación real, entre los cuales ejerce un papel preponderante la pérdida de eficacia que se produce en los sistemas de priorización del transporte público en intersecciones a nivel a medida que se acorta el intervalo entre vehículos o unidades de transporte. La importancia de esta pérdida de eficacia como potencial fuente de variabilidad depende por tanto del intervalo ( $h$ ), comenzando a presentar cierta relevancia —según la modelización desarrollada en el epígrafe 8.3.4.3— cuando el intervalo empieza a descender por debajo de 4.5 minutos. Por otra parte, para los sistemas de BHLS o BRT, una potencial fuente adicional de variabilidad radica en el posible aumento del tiempo de paradas o estaciones a causa de la eventual superación momentánea de la capacidad de estas (sobrecarga). Como se vió anteriormente, la ocurrencia y magnitud de estas incidencias se considera dependiente del cociente entre el intervalo de operación programado o previsto y el intervalo mínimo de diseño ( $h/H_{min}$ ), comenzando a ponerse de manifiesto dicho efecto cuando el cociente  $h/H_{min}$  desciende por debajo de 2. Finalmente, otra fuente adicional de variabilidad, común a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT, es la que se deriva de posibles sucesos imprevisibles en relación con los tiempos dedicados al acceso y salida de pasajeros del vehículo, identificándose como posibles causas de retrasos la existencia de picos imprevistos de demanda en un período horario determinado y la entrada y salida de personas con movilidad reducida<sup>230</sup>. De todos modos, el criterio adoptado a efectos de la inclusión de esta última fuente de variabilidad en las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo es similar al asumido en el caso del autobús convencional en tráfico mixto, por lo que, en lugar de incorporarse explícitamente en la confección de la variable independiente, se asume que dicha fuente se traduce en un nivel mínimo de variabilidad adicional que estaría presente independientemente de las condiciones particulares de operación.

Por tanto, de acuerdo a las variables que en el caso de los sistemas dotados de plataforma reservada y priorización semafórica aparecen relacionadas con las fuentes principales de variabilidad del tiempo de operación y, con ello, de posibles retrasos (es decir, los intervalos  $h$  y  $H_{min}$ ), así como a la vista del comportamiento de dicha variabilidad en función de los citados intervalos, se ha optado por seleccionar, como variable independiente compuesta para las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo, la diferencia ( $h-H_{min}$ ) entre el intervalo de operación previsto o programado y el intervalo mínimo de diseño. Esta variable compuesta se adapta de forma bastante satisfactoria a la descripción matemática de las potenciales fuentes de retrasos expuestas en el párrafo anterior, tanto para metro ligero o tranvía como para BHLS o BRT.

En este sentido, nótese que TCRP (2013: pp. 8.16-8.17, *Exhibit 8.10*) relaciona directamente la fiabilidad, aunque sea solo a nivel cualitativo y refiriéndose específicamente a modos ferroviarios, con la frecuencia del servicio (o, inversamente, con el intervalo  $h$ ), de forma que la fiabilidad es relativamente baja para

<sup>230</sup> Para el caso de los sistemas de BHLS o BRT implantados con estándares más completos y avanzados, así como para metro ligero o tranvía, la posible subida y bajada de usuarios con movilidad reducida debería suponer una perturbación mucho menor que en el caso del autobús convencional, ya que la entrada y salida de pasajeros se produce a nivel entre el andén de la parada o estación y el piso (bajo) del vehículo.

frecuencias altas (más cercanas a la capacidad máxima de diseño de la línea) y, en cambio, se mantiene una fiabilidad elevada para frecuencias inferiores (por debajo de aproximadamente 15 unidades por hora).

Por otra parte, como forma funcional de las expresiones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio en este tipo de sistemas se ha seleccionado un binomio formado por una constante y una función de tipo exponencial, convenientemente escalada. La elección de este tipo de forma funcional viene parcialmente condicionada por el rango de variación de la variable compuesta adoptada como variable independiente de las funciones de cálculo. La diferencia  $h-H_{min}$  puede tomar un valor mínimo de 0 (donde las funciones de cálculo del tiempo medio de retraso tomarán sus valores máximos) pero, en cambio, no está limitada superiormente, pudiendo alcanzar —al menos en un contexto teórico— valores tendentes a infinito. Para estos últimos (condiciones más favorables posibles) las funciones de cálculo del tiempo medio de retraso deben tender asintóticamente a sus valores mínimos.

El paso siguiente en la determinación de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica consiste en adoptar unos valores de referencia tanto para las condiciones más favorables posibles ( $h-H_{min}$  tendiendo a infinito) como para las condiciones más desfavorables ( $h$  muy próximo a  $H_{min}$ ). De nuevo se toman como referencia para ello los valores orientativos del índice de puntualidad proporcionados por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit 5.21*). Dado que en dicha fuente se hace mención explícita a los sistemas de metro ligero (*Light Rail Transit, LRT*), se comenzará proponiendo valores de referencia del tiempo de retraso medio para dicho modo de transporte público.

En este sentido, TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit 5.21*) señala rangos típicos del índice de puntualidad entre el 80 y el 89% para sistemas de metro ligero con algunos tramos de circulación a nivel de la vía pública (afecciones externas leves) y del 70 al 79% para metros ligeros en los que una mayoría de segmentos de circulación discurren a dicho nivel (afecciones externas de carácter moderado). Adicionalmente, indica rangos del 90 al 94% de puntualidad para modos con circulación guiada y plataforma segregada (a distinto nivel) que no sea compartida con vehículos ajenos al transporte público (es decir, sin afecciones externas). Si además estos modos operan significativamente por debajo de su capacidad y no presentan problemas con la infraestructura o los vehículos se podrían llegar a alcanzar índices de puntualidad en el rango entre el 95 y el 100%. Se recuerda, por otra parte, que la propia fuente admite que una línea determinada puede alcanzar unos índices de puntualidad notablemente superiores o inferiores a los señalados, dependiendo de las condiciones locales.

Así pues, como índice máximo de puntualidad en las condiciones más favorables (afecciones externas nulas o irrelevantes, siendo esta una situación equiparable a la producida al operar con intervalos muy por encima del mínimo) se adopta un valor del 95%, con lo que el mínimo del tiempo de retraso medio para  $h-H_{min}$  tendiendo a infinito se establece en 0.89 minutos (véase cuadro de equivalencias en la Tabla 8.11). Bajo estas mismas condiciones, para determinar la moda del tiempo medio de retraso se selecciona un índice de puntualidad del 90%, equivalente a 1.35 minutos de retraso medio. Finalmente, como índice mínimo de puntualidad en las condiciones más favorables se ha adoptado un valor del 85%, al cual le corresponde un tiempo (máximo) de retraso medio 1.76 minutos.

Por otra parte, en el extremo opuesto se han de seleccionar los índices de puntualidad —y con ello sus tiempos equivalentes de retraso medio— representativos de las condiciones más desfavorables, que corresponderían a situaciones operativas caracterizadas por afecciones externas entre moderadas y severas (en términos de la modelización, equiparables a situaciones con  $h-H_{min}$  igual o muy próximo a 0). Al respecto, se adopta como índice máximo de puntualidad para estas condiciones el 80%, con lo que el tiempo (mínimo) de retraso medio para  $h-H_{min}=0$  queda establecido en 2.16 minutos. Como índice mínimo de puntualidad en las condiciones más desfavorables se ha optado por tomar un valor del 60%, que es sensiblemente inferior al rango típico apuntado por TCRP (2013: p. 5.30, *Exhibit 5.21*), pero cuya

elección responde a la posible influencia de un mayor nivel de afecciones externas que el allí considerado (además de a la propia advertencia de que es posible obtener unos resultados de puntualidad considerablemente mejores o peores que los indicados). A este índice mínimo de puntualidad del 60% le corresponde un tiempo (máximo) de retraso medio de 4.14 minutos. Por último, para la moda del tiempo de retraso medio se adopta un índice de puntualidad intermedio entre el máximo y el mínimo (70%), al cual corresponden 3.05 minutos de retraso medio.

Los valores de índice de puntualidad y tiempo de retraso medio propuestos hasta el momento están, en origen, específicamente referidos a metro ligero (o tranvía moderno con plataforma reservada y priorización semafórica). No obstante, la transferibilidad de los mismos a sistemas de BHLS o BRT no debería ser en principio muy cuestionable, ya que se asume, en el contexto del modelo propuesto, que ambas clases de sistemas se diseñan e implantan con el mismo tipo de entorno operativo (plataforma exclusiva con intersecciones a nivel priorizadas para el transporte público). Esta posible transferencia estaría además respaldada por el hecho de que en algunos casos particulares en los que ambos tipos de modos han podido ser estudiados desde un punto de vista comparativo (en concreto, en la red troncal de transporte público de Nantes, Francia) no se ha apreciado que la fiabilidad horaria (regularidad y puntualidad) de la línea de BHLS (*BusWay*) sea significativamente inferior a la de las líneas de metro ligero o tranvía (Oser, 2009; Garrigue, 2009; Conles *et al.*, 2014b).

Así pues, se ha optado por mantener para BHLS o BRT los mismos valores de moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio que para metro ligero o tranvía en el caso de intervalos muy superiores al mínimo ( $h-Hmin$  tendiendo a infinito). Sin embargo, en el extremo opuesto ( $h$  cercano a  $Hmin$ ) puede tenerse en cuenta que los sistemas de BHLS o BRT son susceptibles de verse afectados, como fuente adicional de variabilidad, por los potenciales incrementos del tiempo de paradas o estaciones causados por la eventual superación momentánea o sobrecarga de la capacidad de aquellas. Por tanto, para los sistemas de BHLS o BRT se ha estimado conveniente realizar un pequeño ajuste en los valores correspondientes al caso extremo  $h-Hmin=0$ . En concreto, se ha optado por incrementar (con respecto a metro ligero o tranvía) los valores de moda, mínimo y máximo del tiempo de retraso medio para el caso  $h-Hmin=0$  con un 20% de la diferencia entre los respectivos valores de autobús convencional en tráfico mixto y metro ligero. Se obtienen así tiempos medios de retraso de 2.34 minutos para el mínimo, 3.40 minutos para la moda y 4.83 minutos para el máximo.

El conjunto de valores de tiempo de retraso medio adoptados hasta ahora (es decir, aquellos correspondientes a  $h-Hmin=0$  y a  $h-Hmin$  tendiendo a infinito) permiten fijar dos de los tres coeficientes presentes en las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo (véase forma funcional en las ecuaciones 8.44.b.i a 8.44.c.iii y coeficientes en la Tabla 8.13). Para determinar el coeficiente restante se toma la condición de que cuando el intervalo de operación previsto o programado supere en 2 minutos al mínimo ( $h-Hmin=2$ ), el tiempo de retraso medio haya descendido, con respecto al caso extremo más desfavorable ( $h-Hmin=0$ ), un 75% de la diferencia entre dicho valor y el correspondiente al extremo más favorable (la asíntota horizontal alcanzada cuando  $h-Hmin$  tiende a infinito). Este comportamiento de mejora relativamente rápida de la fiabilidad horaria al descender la frecuencia de operación (aumentar el intervalo) concuerda razonablemente bien con el mostrado —a nivel cualitativo y en referencia particularmente a modos ferroviarios— por TCRP (2013: pp. 8.16-8.17, *Exhibit* 8.10). A falta de indicaciones más específicas, el criterio anteriormente señalado se ha adoptado de forma homogénea para cualquiera de las tres funciones de cálculo (moda, mínimo o máximo) y tanto para los casos de metro ligero o tranvía como para BHLS o BRT.

En síntesis, la obtención de valores para la variable  $mlt_{ryijk}^{ms}$  en los modos metro ligero o tranvía ( $m=s=R$ ) y BHLS o BRT ( $m=s=B$ ) queda regida por las ecuaciones 8.44.a a 8.44.c.iii, donde los valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo de las respectivas distribuciones triangulares se especifican en la Tabla 8.13. Paralelamente, la Figura 8.19

muestra la representación gráfica de dichas funciones, una vez aplicados los coeficientes correspondientes tanto a metro ligero o tranvía como a BHLS o BRT.

**Para los módulos de cálculo M-R1, M-R2, M-R3, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$mlt_{ryijk}^{ms} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRl_{rik} \mid mltmin_{ryijk}^{ms}, mltmax_{ryijk}^{ms}, mltmod_{ryijk}^{ms} \right) \quad (8.44.a)$$

donde las funciones que calculan el mínimo, máximo y moda de las distribuciones triangulares finales pueden presentar distintos coeficientes dependiendo del modo en cuestión. Por tanto:

Para metro ligero o tranvía (si  $m=s=R$ ):

$$mltmod_{ryijk}^{RR} = Kmdia_{MLT} + \exp \left[ -Kmdea_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{RR} - Hmin_{ij}^R \right) \right] \cdot \left( Kmdza_{MLT} - Kmdia_{MLT} \right) \quad (8.44.b.i)$$

$$mltmin_{ryijk}^{RR} = Kmnia_{MLT} + \exp \left[ -Kmnea_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{RR} - Hmin_{ij}^R \right) \right] \cdot \left( Kmnza_{MLT} - Kmnia_{MLT} \right) \quad (8.44.b.ii)$$

$$mltmax_{ryijk}^{RR} = Kmxia_{MLT} + \exp \left[ -Kmxea_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{RR} - Hmin_{ij}^R \right) \right] \cdot \left( Kmxza_{MLT} - Kmxia_{MLT} \right) \quad (8.44.b.iii)$$

Para BHLS o BRT (si  $m=s=B$ ):

$$mltmod_{ryijk}^{BB} = Kmdib_{MLT} + \exp \left[ -Kmdeb_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{BB} - Hmin_{ij}^B \right) \right] \cdot \left( Kmdzb_{MLT} - Kmdib_{MLT} \right) \quad (8.44.c.i)$$

$$mltmin_{ryijk}^{BB} = Kmnib_{MLT} + \exp \left[ -Kmneb_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{BB} - Hmin_{ij}^B \right) \right] \cdot \left( Kmnzb_{MLT} - Kmnib_{MLT} \right) \quad (8.44.c.ii)$$

$$mltmax_{ryijk}^{BB} = Kmxib_{MLT} + \exp \left[ -Kmxeb_{MLT} \cdot \left( h_{ryijk}^{BB} - Hmin_{ij}^B \right) \right] \cdot \left( Kmxzb_{MLT} - Kmxib_{MLT} \right) \quad (8.44.c.iii)$$

En las ecuaciones 8.44.b.i a 8.44.c.iii se particulariza el intervalo genérico  $h$  del siguiente modo, según el tipo de bucle iterativo en ejecución:

- Bucles de tipo A:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hb_{ryijk}^{ms}$
- Bucles de tipo B:  $h_{ryijk}^{ms} \equiv Hs_{ryijk}^{ms}$

Por su parte, los índices  $(r, m, s, y, i, j, k)$  involucrados en este conjunto de ecuaciones (8.44.a a 8.44.c.iii) deben tomar los valores que a continuación se indican:

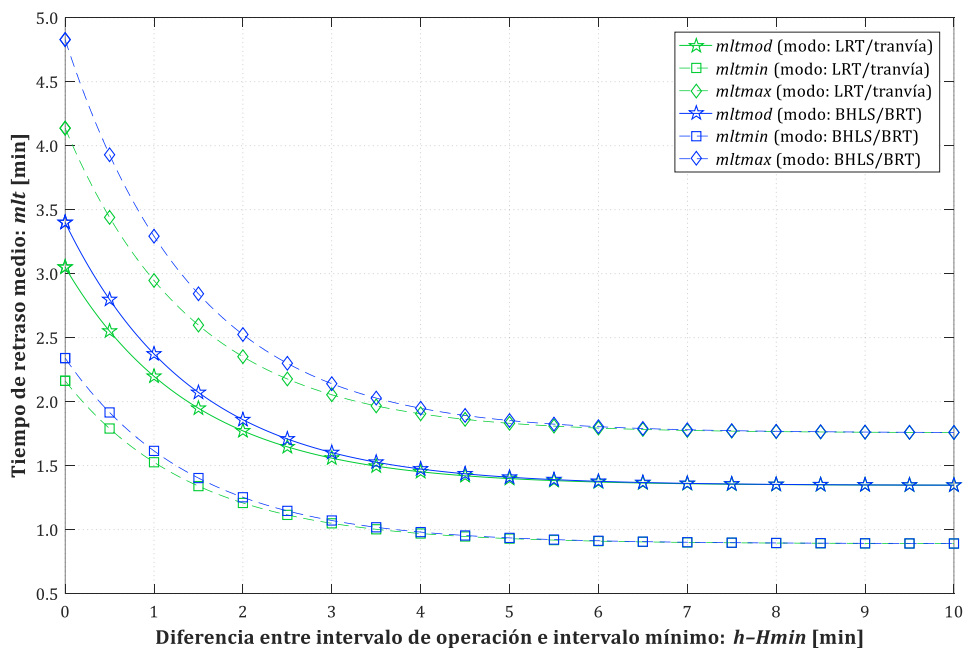
$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; m \in \{R, B\} \wedge s = m ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \left\{ Yma_r^R \right\}_{M-R1}, \left\{ Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1 \right\}_{M-R2}, \left\{ Yma_r^R + 1, \dots, Yap \right\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \left\{ Yma_r^B \right\}_{M-B1}, \left\{ Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1 \right\}_{M-B2}, \left\{ Yma_r^B + 1, \dots, Yap \right\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

**Tabla 8.13.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso ( $mlt$  o  $mlt^*$ ) en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica.

	Coef. relacionado con asíntota ( $h-H_{min} \rightarrow \infty$ )	Coef. relacionado con ordenada en el origen	Coef. en el argumento de la función exponencial
<b>Modo TP: metro ligero o tranvía (<math>m=R</math>)</b>			
<b>Moda</b>	$Kmdia_{MLT} = 1.346582$	$Kmdza_{MLT} = 3.051640$	$Kmdea_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmnia_{MLT} = 0.891276$	$Kmnza_{MLT} = 2.163904$	$Kmnea_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmxia_{MLT} = 1.757537$	$Kmxza_{MLT} = 4.137879$	$Kmxea_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$
<b>Modo TP: BHLS o BRT (<math>m=B</math>)</b>			
<b>Moda</b>	$Kmdib_{MLT} = 1.346582$	$Kmdzb_{MLT} = 3.400742$	$Kmdeb_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmnib_{MLT} = 0.891276$	$Kmnzb_{MLT} = 2.341451$	$Kmneb_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmxib_{MLT} = 1.757537$	$Kmxzb_{MLT} = 4.829887$	$Kmxeb_{MLT} = 6.931472 \cdot 10^{-1}$



**Figura 8.19.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del tiempo medio de retraso en sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica en función de la diferencia  $h-H_{min}$  entre el intervalo provisto o programado y el intervalo mínimo de diseño.

### 8.3.6. Coste (o precio) generalizado por viaje medio en el modo de transporte público

La variable  $GC_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , una cuantificación del coste o precio generalizado medio afrontado por los usuarios del modo  $m$  de transporte público por cada viaje efectuado en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dadas las condiciones previstas para el escenario  $s$  en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el año base se designa  $GC^*_{rijk}$ , donde se omiten, por prescindibles, los índices relativos al escenario ( $s$ ), al modo ( $m$ ) y al año ( $y$ ).

Las variables  $GC_{ryijk}^{ms}$  y  $GC^*_{rijk}$  son expresadas por el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

La cuantificación del coste generalizado de viaje en transporte público empleada por la formulación del modelo (ecuaciones 8.45.a, 8.45.b y 8.45.c) incorpora los siguientes componentes:

- La tarifa abonada o desembolsada, de media, por cada uso del modo de transporte público en cuestión (variable  $FARav_{ijk}^m$ ).
- El coste atribuible al tiempo medio transcurrido a bordo del vehículo de transporte público por cada viaje, que se determina mediante el producto de dicho tiempo medio (variables  $tv_{rijk}^*$  o  $tv_{ryijk}^{ms}$ , divididas entre 60 para expresarlas en horas) por el coste unitario medio del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo) en condiciones base o estándar. Este último viene dado por las variables  $VTTpb_{rijk}^*$  o  $VTTpb_{ryijk}$  (en unidades monetarias por hora).
- El incremento del coste del tiempo de viaje a bordo del transporte público por efecto del nivel de aglomeración o congestión de pasajeros en los vehículos (*crowding*). Este incremento corresponde al producto del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje a bordo del modo de transporte público (variables  $Mcav_{rijk}^*$  o  $Mcav_{ryijk}^{ms}$ ), previamente disminuido en una unidad (para tener en cuenta únicamente el efecto adicional de la aglomeración o congestión de pasajeros), por el propio coste del tiempo transcurrido a bordo del vehículo en condiciones base o estándar (calculado tal como se indica en el párrafo anterior).
- El coste del tiempo medio de espera en parada o estación por cada usuario, que se calcula como el producto de dicho tiempo de espera (variables  $tw_{rijk}^*$  o  $tw_{ryijk}^{ms}$ , divididas entre 60 para transformarlas a horas) por el coste unitario del mismo (unidades monetarias por hora). Este último se determina en relación con el coste unitario medio del tiempo de viaje a bordo del vehículo de transporte público en condiciones base o estándar ( $VTTpb_{rijk}^*$  o  $VTTpb_{ryijk}$ ), multiplicándolo por el factor de proporcionalidad o cociente  $WR_r^m$  entre el coste unitario percibido del tiempo de espera en parada o estación y el propio coste unitario medio del tiempo de viaje en el vehículo<sup>231</sup> (de tal modo que un minuto de tiempo de espera es equivalente en coste o desutilidad a  $WR$  minutos de tiempo de viaje en el vehículo en condiciones base o estándar).
- El coste medio —por cada viaje— relacionado con las deficiencias en la fiabilidad de horarios en transporte público, el cual se evalúa a través del producto del tiempo medio de retraso —sobre el horario programado o previsto— en el correspondiente modo (variables  $mlt_{rijk}^*$  o  $mlt_{ryijk}^{ms}$ , divididas entre 60 para expresarlas en horas) por el coste unitario asociado al tiempo de retraso en transporte público (unidades monetarias por hora). Este coste unitario se establece a través de un factor de proporcionalidad (variable  $LR_{rijk}$ ) que multiplica al coste unitario medio del tiempo de viaje a bordo del vehículo de transporte público en condiciones base o estándar ( $VTTpb_{rijk}^*$  o  $VTTpb_{ryijk}$ ), de tal forma que un minuto de tiempo de retraso se considera equivalente, en términos de su contribución marginal al coste generalizado o desutilidad del viaje, a  $LR$  minutos de tiempo medio de viaje (previsto) a bordo del vehículo.
- Para los nuevos modos de transporte público de posible implantación (ecuación 8.45.c) se incorpora la potencial reducción —o aumento si fuese el caso— en el coste generalizado de viaje correspondiente a la valoración monetaria del *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y BHLS o BRT con respecto al modo de referencia (autobús convencional en tráfico mixto). Dicha reducción en el coste generalizado se evalúa como el producto del *bonus* modal concerniente a otros atributos o características específicas del modo de transporte público no recogidas explícitamente en la formulación<sup>232</sup> (que viene expresado por la variable  $Bns_r^m$  inicialmente en minutos generalizados de tiempo de viaje

<sup>231</sup> En términos microeconómicos, el factor de proporcionalidad  $WR$  puede interpretarse como el ratio o relación marginal de sustitución del tiempo de espera en parada ( $tw^*$  o  $tw$ ) por tiempo a bordo del vehículo de transporte público ( $tv^*$  o  $tv$ ).

<sup>232</sup> Se recuerda que este *bonus* modal está relacionado con la valoración de aspectos tales como el confort y estabilidad de marcha, la seguridad viaria durante la circulación, la disponibilidad de servicios complementarios a bordo de los vehículos (conexión inalámbrica a internet, enchufes, etc.), la comodidad de los asientos, otros factores ambientales del interior del vehículo (ruido, temperatura, limpieza, etc.), la facilidad de uso del sistema de transporte, la facilidad o comodidad de subida y bajada del vehículo mediante acceso a nivel en las paradas o estaciones, etc.

en el vehículo, y que ha de ser dividida entre 60 para obtener su equivalente en horas generalizadas) multiplicado por el coste unitario medio del tiempo de viaje a bordo del vehículo de transporte público en condiciones base o estándar ( $VTTpb^*_{rijk}$  o  $VTTpb_{ryijk}$ , en unidades monetarias por hora).

- Finalmente, para cualquiera de los tres modos de transporte público considerados, debe señalarse que el coste generalizado de completar cada viaje incluiría adicionalmente otros costes como los incurridos en las etapas de acceso a la línea objeto de estudio (origen del viaje – parada de subida) y en la etapa de dispersión hacia el destino (parada de bajada – destino del viaje), ya sean dichas etapas efectuadas en modos no motorizados, en medios de transporte motorizado privado o mediante el uso de otras líneas de transporte público distintas de la analizada (en cuyo caso se podría incluir además una penalización por realización de transbordos). No obstante, atendiendo al objetivo fundamental del modelo desarrollado y a sus propias limitaciones, se asume que estos costes complementarios o adicionales sean iguales entre sí para los tres escenarios (al considerarse independientes del modo de transporte público implantado en la línea objeto de estudio<sup>233</sup>) e invariables a lo largo de los años (en valor real o unidades monetarias constantes). Así pues, dichos costes complementarios quedan englobados, por lo que respecta a las ecuaciones 8.45.a, 8.45.b y 8.45.c, en la constante  $CONSpb$ , que, a efectos prácticos de la metodología, puede recibir cualquier valor arbitrario (incluso darle un valor 0 y prescindir de ella). Esto es así debido a que el conjunto de la formulación planteada opera de forma incremental (en diferencias), de tal forma que dicha constante no interviene, al cancelarse, ni en las diferencias entre escenarios, ni en las variaciones existentes entre un determinado año y los anteriores en el coste generalizado asociado al modo de transporte público existente en cada escenario. Este hecho permite, por tanto, evitar la valoración explícita de estos costes de acceso en origen y de dispersión en destino.

En conclusión, el cálculo del coste o precio generalizado medio de viaje para el usuario del transporte público se lleva a cabo mediante las ecuaciones 8.45.a (para el año base), 8.45.b (para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0) y 8.45.c (para los módulos M-R1, M-R2, M-R3, M-B1, M-B2 y M-B3).

#### Para el año base

$$\begin{aligned}
 GC^*_{rijk} &= FARav^0_{ijk} + \frac{tv^*_{rijk}}{60} \cdot VTTpb^*_{rijk} + (Mcav^*_{rijk} - 1) \cdot \frac{tv^*_{rijk}}{60} \cdot VTTpb^*_{rijk} + \\
 &+ \frac{tw^*_{rijk}}{60} \cdot WR_r^0 \cdot VTTpb^*_{rijk} + \frac{mlt^*_{rijk}}{60} \cdot LR_{rijk} \cdot VTTpb^*_{rijk} + CONSpb = \\
 &= FARav^0_{ijk} + \left( Mcav^*_{rijk} \cdot tv^*_{rijk} + WR_r^0 \cdot tw^*_{rijk} + LR_{rijk} \cdot mlt^*_{rijk} \right) \cdot \frac{VTTpb^*_{rijk}}{60} + \\
 &+ CONSpb
 \end{aligned} \tag{8.45.a}$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

<sup>233</sup> Recuérdese que una de las hipótesis generales de partida consiste en considerar que se mantiene la misma posición de las paradas en los tres escenarios.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0 y M-B0**

$$\begin{aligned}
 GC_{ryijk}^{0s} &= FARav_{ijk}^0 + \frac{tv_{ryijk}^{0s}}{60} \cdot VTTpb_{ryijk} + (M cav_{ryijk}^{0s} - 1) \cdot \frac{tv_{ryijk}^{0s}}{60} \cdot VTTpb_{ryijk} + \\
 &+ \frac{tw_{ryijk}^{0s}}{60} \cdot WR_r^0 \cdot VTTpb_{ryijk} + \frac{mlt_{ryijk}^{0s}}{60} \cdot LR_{rijk} \cdot VTTpb_{ryijk} + CONSpb = \\
 &= FARav_{ijk}^0 + \left( M cav_{ryijk}^{0s} \cdot tv_{ryijk}^{0s} + WR_r^0 \cdot tw_{ryijk}^{0s} + LR_{rijk} \cdot mlt_{ryijk}^{0s} \right) \cdot \frac{VTTpb_{ryijk}}{60} + \\
 &+ CONSpb
 \end{aligned} \tag{8.45.b}$$

con:

$$\begin{aligned}
 r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0} & \text{si } s = B \end{cases} ; \\
 i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}
 \end{aligned}$$

**Para los módulos de cálculo M-R1, M-R2, M-R3, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$\begin{aligned}
 GC_{ryijk}^{ms} &= FARav_{ijk}^m + \frac{tv_{ryijk}^{ms}}{60} \cdot VTTpb_{ryijk} + (M cav_{ryijk}^{ms} - 1) \cdot \frac{tv_{ryijk}^{ms}}{60} \cdot VTTpb_{ryijk} + \\
 &+ \frac{tw_{ryijk}^{ms}}{60} \cdot WR_r^m \cdot VTTpb_{ryijk} + \frac{mlt_{ryijk}^{ms}}{60} \cdot LR_{rijk} \cdot VTTpb_{ryijk} - \frac{Bns_r^m}{60} \cdot VTTpb_{ryijk} + CONSpb = \\
 &= FARav_{ijk}^m + \left( M cav_{ryijk}^{ms} \cdot tv_{ryijk}^{ms} + WR_r^m \cdot tw_{ryijk}^{ms} + LR_{rijk} \cdot mlt_{ryijk}^{ms} - Bns_r^m \right) \cdot \frac{VTTpb_{ryijk}}{60} + \\
 &+ CONSpb
 \end{aligned} \tag{8.45.c}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 r = 1, 2, \dots, Nrs ; m \in \{R, B\} \wedge s = m ; \\
 y = \begin{cases} = \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ; \\
 i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}
 \end{aligned}$$

**8.3.7. Atributos y variaciones de costes en las opciones de vehículo motorizado privado**

**8.3.7.1. Velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado**

La variable  $Vm_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la velocidad media de trayecto a bordo del vehículo correspondiente al modo  $m$  de transporte motorizado privado (por tanto, con  $m=C$  o  $m=M$ ) a lo largo del vial o viales de circulación que sirven de base al corredor, eje o itinerario coincidente con la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido de viaje  $k$ , todo ello bajo las condiciones de circulación previstas para esa situación en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación. En el caso del año base, se define su variable equivalente  $Vm_{ryijk}^{*m}$ , donde se omiten los índices innecesarios correspondientes a escenario ( $s$ ) y año ( $y$ ).



Las unidades utilizadas en el modelo para las variables  $Vm_{ryijk}^{ms}$  y  $Vm_{rijk}^{*m}$  son kilómetros por hora [km/h].

Dado un vial o viales de circulación (esquemáticamente un arco en una red) con unas determinadas características físicas y operacionales, la velocidad media de trayecto a lo largo del mismo se verá afectada fundamentalmente por la razón entre el volumen (o demanda) de tráfico mixto y la capacidad representativa del vial (es decir, por el ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto, representado por las variables  $VCR_{rijk}^*$  o  $VCR_{ryijk}^s$ ). Para definir la forma funcional de esta relación, recuérsede que se ha optado en esta tesis por basarse en la ampliamente difundida fórmula del BPR o *Bureau of Public Roads* de EE.UU. (véase epígrafe 5.9). Así pues, para dar lugar a las ecuaciones 8.46.a.i, 8.46.a.ii, 8.46.b.i y 8.46.b.ii se parte de la expresión general de dicha fórmula planteada en términos de velocidades medias (véase ecuación 5.8.b). A partir de esta base se particularizan las velocidades promedio de trayecto de automóviles particulares y de motos o ciclomotores bajo condiciones de ausencia de tráfico para el vial objeto de análisis recorrido en un determinado sentido (variables  $VFc_{rik}$  y  $VFm_{rik}$ , respectivamente), al mismo tiempo que se singularizan los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la fórmula BPR para vehículos de cuatro o más ruedas (variables  $\alpha f_{rik}$  y  $\beta f_{rik}$ ) y para vehículos motorizados de dos ruedas (variables  $\alpha t_{rik}$  y  $\beta t_{rik}$ ), también para ese mismo vial y sentido. Finalmente, solo resta por incorporar el ratio Volumen/Capacidad en tráfico mixto que corresponda a cada período horario para el escenario y año analizados ( $VCR_{ryijk}^s$ , o  $VCR_{rijk}^*$  en el caso del año base).

Por tanto, el cálculo de las variables  $Vm_{rijk}^{*m}$  y  $Vm_{ryijk}^{ms}$  queda definido por el conjunto de expresiones indicadas a continuación, en las que se tratan por separado los casos de automóvil particular y de moto o ciclomotor.

#### Para el año base

En el caso del automóvil particular:

$$Vm_{rijk}^{*C} = \frac{VFc_{rik}}{1 + \alpha f_{rik} \cdot (VCR_{rijk}^*)^{\beta f_{rik}}} \quad (8.46.a.i)$$

En el caso de moto o ciclomotor:

$$Vm_{rijk}^{*M} = \frac{VFm_{rik}}{1 + \alpha t_{rik} \cdot (VCR_{rijk}^*)^{\beta t_{rik}}} \quad (8.46.a.ii)$$

donde los subíndices  $(r, i, j, k)$  de las ecuaciones 8.46.a.i y 8.46.a.ii adoptan los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

#### Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

En el caso del automóvil particular:

$$Vm_{ryijk}^{Cs} = \frac{VFc_{rik}}{1 + \alpha f_{rik} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^{\beta f_{rik}}} \quad (8.46.b.i)$$

En el caso de moto o ciclomotor:

$$Vm_{ryijk}^{Ms} = \frac{VFm_{rik}}{1 + \alpha t_{rik} \cdot (VCR_{ryijk}^s)^{\beta t_{rik}}} \quad (8.46.b.ii)$$

donde los índices  $(r, s, y, i, j, k)$  de estas dos expresiones (8.46.b.i y 8.46.b.ii) toman los valores señalados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.3.7.2. Variación (a lo largo del tiempo) del coste medio generado al viajero por el tiempo de viaje consumido a bordo del vehículo motorizado privado

En los siguientes pasos del modelo se procede al cálculo de los cambios o variaciones medias en el coste de viaje vinculado al tiempo que transcurre a bordo de alguna de las opciones de vehículo motorizado privado, ya sea éste automóvil particular o bien moto o ciclomotor. Los cambios o variaciones que se determinan en este punto corresponden a la evolución temporal de dicho coste, generalmente calculada entre dos años consecutivos (con la excepción de que para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1 es necesario obtener la variación acumulada o totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público). En cualquier caso, estas variaciones temporales en el coste pueden venir dadas por modificaciones en el tiempo consumido en cada viaje en vehículo motorizado privado, o por cambios en su coste unitario (coste por hora o minuto), el cual a su vez puede variar por factores exógenos al modelo (véase epígrafe 5.11.4) o por causas endógenas (modificaciones en el nivel de congestión del vial o viales utilizados, tal como se verá a continuación en el epígrafe 8.3.7.2.a).

Así pues, en los siguientes epígrafes se evalúa en primer lugar el posible incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa del nivel de congestión viaria previsto para cada año. Con posterioridad se determinan las variaciones medias en la parte del coste de viaje generada por el tiempo consumido durante la etapa que transcurre a bordo del vehículo motorizado privado, ya sean dichas variaciones entre años consecutivos o totalizadas a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público. Es en estos cálculos en los que se introducen conjuntamente la modificación en el coste unitario del tiempo y la variación en el tiempo de viaje empleado (el cual, para una determinada distancia, está condicionado por la velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado).

#### 8.3.7.2.a. Factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria

La variable  $ACTR_{ryjk}^s$  representa un factor de proporcionalidad entre el incremento del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado generado por un elevado nivel de congestión viaria y dicho coste unitario (básico o estándar) en condiciones de ausencia de congestión, donde los valores de dicho factor en la simulación aleatoria  $r$  se particularizan para los viajes efectuados sobre el vial o viales de circulación que sirven de base al corredor, eje o itinerario coincidente con la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dadas las condiciones de circulación previstas en el escenario  $s$  para el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el año base se designa como  $ACTR_{rijk}^*$ , omitiéndose en la misma los índices innecesarios relativos al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

De acuerdo a su definición, tanto la variable  $ACTR_{ryjk}^s$  como su homóloga  $ACTR_{rijk}^*$  son de tipo adimensional.

Más detalladamente, este factor de proporcionalidad  $ACTR$  se define de forma que el término  $1+ACTR$  equivale al cociente entre el coste de una cierta unidad de tiempo tal como este es percibido por el viajero en un desplazamiento a bordo de un vehículo motorizado privado cuando dicho desplazamiento

se efectúa experimentando un alto nivel de congestión viaria y el coste de esa misma unidad temporal si el desplazamiento en vehículo motorizado privado se realizase en ausencia de tráfico (o con un volumen de tráfico —en relación a la capacidad de la vía— por debajo de un determinado umbral). Explicando este concepto de forma sencilla mediante un ejemplo, puede decirse que el coste por tiempo de viaje (percibido por el conductor y posibles acompañantes) en un desplazamiento en automóvil de 20 minutos de duración realizado en un viario cercano a la saturación (con tráfico denso, retenciones, etc.) es mayor que el coste del tiempo transcurrido en otro desplazamiento de la misma duración (20 minutos) pero efectuado en un vial que presente un buen nivel de servicio (o en el mismo vial pero en un período horario que esté libre de congestión)<sup>234</sup>. La diferencia entre los costes de tiempo en ambas situaciones, dividida entre el coste en las condiciones de congestión nula o suficientemente baja (segunda situación del ejemplo), daría lugar al valor del factor  $ACTR$  en el caso del ejemplo mostrado.

Debido a la naturaleza del fenómeno que está reflejando este factor de proporcionalidad, sus valores en cada situación deben ser dependientes de la relación o proporción entre el volumen de tráfico mixto existente en el vial o viales utilizados por los viajes objeto de estudio y la capacidad de aquellos, es decir, deben ser función del ratio Volumen/Capacidad (variables  $VCR_{ryjk}^s$  y  $VCR_{rijk}^*$  en el modelo desarrollado). Así, con carácter general, el valor de la variable  $ACTR_{ryjk}^s$  (o  $ACTR_{rijk}^*$ ) aumentará a medida que el ratio Volumen/Capacidad se eleve por encima de un determinado umbral mínimo. Por el contrario, para ratios Volumen/Capacidad inferiores a dicho umbral mínimo se puede asumir que el valor de estas variables es cero (es decir, no se considera ningún incremento en el coste unitario del tiempo de viaje cuando las condiciones de circulación del vehículo motorizado privado en tráfico mixto son suficientemente satisfactorias).

La inclusión de este incremento en el coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado ante un elevado nivel de congestión viaria está inspirada, a grandes rasgos, por los principios seguidos al respecto por el '*Economic Evaluation Manual*' de la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda o NZTA, concretamente en los Apartados A4.4 y A4.3 de su Apéndice A4 (NZTA, 2016: pp. 5.203-5.206). No obstante, sobre dichos principios se realizarán algunas adaptaciones y modificaciones en consonancia con los criterios y líneas de trabajo seguidas a lo largo de la modelización desarrollada.

Así, los valores de la variable  $ACTR_{ryjk}^s$  (o  $ACTR_{rijk}^*$  en el año base) se van a obtener en las simulaciones del modelo de acuerdo a una distribución triangular de probabilidad, utilizando para ello la componente aleatoria  $UACTR_r$ , cuyos valores fueron extraídos a su vez de una distribución uniforme estándar  $U(0,1)$  (epígrafe 6.4.5.1).

Al objeto de modelizar los parámetros representativos de la moda, mínimo y máximo en las distribuciones triangulares de las variables  $ACTR_{ryjk}^s$  y  $ACTR_{rijk}^*$ , se plantean funciones polinómicas de segundo grado (en las que la variable independiente es respectivamente  $VCR_{ryjk}^s$  o  $VCR_{rijk}^*$ , tal como se había expuesto con anterioridad). El tipo de función empleado constituye una primera diferencia con la formulación empleada por NZTA (2016: p. 5.204), donde, para el caso de vías urbanas (así como para carreteras rurales multicarril y autopistas o autovías), se propone el uso de una función de tipo lineal para el cálculo del incremento de coste unitario del tiempo de viaje a causa de la congestión del tráfico. La adopción de una función lineal implicaría que el incremento marginal de dicho coste causado por un aumento unitario en el volumen de tráfico sea, una vez superado un umbral mínimo, constante e independiente del nivel de tráfico o congestión (en otras palabras,  $ACTR_{ryjk}^s$  y  $ACTR_{rijk}^*$  vendrían dadas por funciones con pendiente constante). Además, con este tipo de función, para un valor del ratio Volumen/Capacidad infinitesimalmente inferior al umbral mínimo o punto límite el incremento o disminución marginal del coste sería nulo, mientras que para un ratio Volumen/Capacidad infinitesimalmente superior a dicho umbral la variación marginal tendría ya un valor sensiblemente distinto de cero (es decir, no existiría continuidad de la derivada en el valor del ratio Volumen/Capacidad que

<sup>234</sup> Obviamente en este ejemplo se trataría de desplazamientos con distinta distancia de viaje recorrida, pero, en lo que concierne a la definición y cálculo de este factor de proporcionalidad  $ACTR$ , se deben dejar al margen cualesquiera otros costes diferentes de los costes de tiempo (tales como combustible consumido, etc.).

marque el límite o frontera entre ambos subdominios). Así pues, para superar estas limitaciones se han adoptado en su lugar funciones polinómicas de segundo grado, imponiendo además la continuidad de la primera derivada (de valor nulo) en el punto límite o frontera entre los dos subdominios.

En cuanto al establecimiento del ratio Volumen/Capacidad para el cual comience a aplicarse el incremento en el coste unitario del tiempo de viaje, NZTA (2016: p. 5.204) señala un valor de 0.70 (70%) para el citado caso de vías urbanas, carreteras rurales multicarril y autopistas o autovías. No obstante, en base al diferente tipo de función empleado, se ha optado en este caso por rebajar ligeramente dicho umbral o límite hasta un ratio Volumen/Capacidad igual a dos tercios (2/3). Por tanto, para cualquier valor del ratio Volumen/Capacidad inferior a esta cifra se establece que el valor de las variables  $ACTR_{ryijk}^s$  o  $ACTR_{rijk}^*$  sea igual a 0.

Para determinar la cuantía que este incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje puede tomar cuando el ratio Volumen/Capacidad alcanza un valor igual a 1, se consideran como referencia de partida los valores básicos del tiempo de viaje y de máximo incremento por congestión dados por NZTA (2016: p. 5.203, Tabla A4.3)<sup>235</sup> para una composición estándar del tráfico mixto en la que se combinan varios tipos de viajeros (por motivo de viaje) y de vehículos motorizados (incluyendo automóviles, motocicletas e incluso vehículos comerciales). El análisis se centrará esencialmente en los valores dados para vías urbanas, ya sean arterias o de otros tipos (la tabla citada ofrece también valores para carreteras rurales, pero estos últimos resultan de mucho menor interés para el tipo de ámbito territorial objeto de estudio en esta tesis). Dicha tabla permite además diferenciar valores para distintos tipos de períodos horarios, pero, en cualquier caso, la característica común para todos ellos es que los incrementos por congestión se sitúan en el rango del 20% al 30% sobre el respectivo valor básico del tiempo de viaje. Particularmente, para el período horario mixto o agregado, resultante de la ponderación de los anteriores, los incrementos proporcionales por congestión resultan del 24.3% para arterias urbanas y del 24.5% para otros tipos de vías urbanas. Por tanto, se acepta un valor de 0.25 o 25% (redondeando ligeramente los anteriores) como moda de la distribución triangular de las variables  $ACTR_{ryijk}^s$  o  $ACTR_{rijk}^*$  cuando el ratio Volumen/Capacidad (variables  $VCR_{ryijk}^s$  o  $VCR_{rijk}^*$ ) alcanza un valor igual a 1. Por su parte, para establecer el máximo y el mínimo de las distribuciones se adopta el criterio de que sean un 20% superiores e inferiores con respecto al valor de la moda, con lo que, en el caso de un ratio Volumen/Capacidad igual a la unidad, resultan valores de 0.30 y 0.20 respectivamente. Obsérvese que estas cifras coinciden con los mayores y menores incrementos proporcionales del coste del tiempo de viaje obtenidos del análisis por separado de los diferentes tipos de períodos horarios incluidos en la tabla de referencia (NZTA, 2016: p. 5.203, Tabla A4.3) para vías urbanas.

Una vez establecidos los valores de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo para la abscisa  $VCR_{ryijk}^s=1$  (o bien  $VCR_{rijk}^*=1$ ), los coeficientes de los respectivos polinomios de segundo grado quedarán determinados al fijar, por una parte, que dichas funciones tomen valor cero para la abscisa  $VCR_{ryijk}^s=2/3$  o  $VCR_{rijk}^*=2/3$  (por continuidad de las funciones en el punto que marca el umbral o límite entre subdominios) e imponer, además, la continuidad de la primera derivada de tales funciones en dicho punto (lo que se traduce en que estas presenten derivada nula para  $VCR_{ryijk}^s=2/3$  o  $VCR_{rijk}^*=2/3$ ).

En conclusión, el procedimiento de obtención de los valores de las variables  $ACTR_{rijk}^*$  (para el año base) y  $ACTR_{ryijk}^s$  (para cualquiera de los restantes módulos de cálculo) queda definido por el conjunto de expresiones que se incluyen a continuación, en cuya aplicación interviene la función de transformación triang<sup>1</sup> (recuérdese su definición matemática en el epígrafe 6.2.2.2.b). Esta serie de ecuaciones se presenta, en primer lugar, con coeficientes genéricos para los polinomios de cálculo de la moda, el mínimo y el máximo de las distribuciones triangulares. Complementariamente, los valores numéricos propuestos en esta tesis para dichos coeficientes (resultantes del conjunto de indicaciones anteriormen-

<sup>235</sup> En la tabla de la fuente citada, el término 'máximo' hace referencia a que el incremento por congestión señalado es el correspondiente a un ratio Volumen/Capacidad igual a 1 (o a un porcentaje de tiempo con circulación demorada del 90% en el caso particular de carreteras rurales de dos carriles, fuera del objeto de estudio de esta tesis).

te expuestas) se compendian en la Tabla 8.14 a efectos de aplicación práctica del modelo presentado. Por último, la Figura 8.20 muestra gráficamente las funciones que resultan de aplicar estos coeficientes al cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares del factor de proporcionalidad  $ACTR$ .

**Para el año base**

Si  $VCR^*_{rijk} \leq \frac{2}{3}$ :

$$ACTR^*_{rijk} = 0.0 \tag{8.47.a.i}$$

Si  $VCR^*_{rijk} > \frac{2}{3}$ :

$$ACTR^*_{rijk} = \text{triang}^1(UACTR_r \mid ACTRmin^*_{rijk}, ACTRmax^*_{rijk}, ACTRmod^*_{rijk}) \tag{8.47.a.ii}$$

donde:

$$ACTRmod^*_{rijk} = Kmd2_{ACTR} \cdot (VCR^*_{rijk})^2 + Kmd1_{ACTR} \cdot VCR^*_{rijk} + Kmd0_{ACTR} \tag{8.47.a.iii}$$

$$ACTRmin^*_{rijk} = Kmn2_{ACTR} \cdot (VCR^*_{rijk})^2 + Kmn1_{ACTR} \cdot VCR^*_{rijk} + Kmn0_{ACTR} \tag{8.47.a.iv}$$

$$ACTRmax^*_{rijk} = Kmx2_{ACTR} \cdot (VCR^*_{rijk})^2 + Kmx1_{ACTR} \cdot VCR^*_{rijk} + Kmx0_{ACTR} \tag{8.47.a.v}$$

Para los subíndices  $(r, i, j, k)$  de las ecuaciones 8.47.a.i a 8.47.a.v se toman los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Si  $VCR^s_{ryijk} \leq \frac{2}{3}$ :

$$ACTR^s_{ryijk} = 0.0 \tag{8.47.b.i}$$

Si  $VCR^s_{ryijk} > \frac{2}{3}$ :

$$ACTR^s_{ryijk} = \text{triang}^1(UACTR_r \mid ACTRmin^s_{ryijk}, ACTRmax^s_{ryijk}, ACTRmod^s_{ryijk}) \tag{8.47.b.ii}$$

donde:

$$ACTRmod^s_{ryijk} = Kmd2_{ACTR} \cdot (VCR^s_{ryijk})^2 + Kmd1_{ACTR} \cdot VCR^s_{ryijk} + Kmd0_{ACTR} \tag{8.47.b.iii}$$

$$ACTRmin^s_{ryijk} = Kmn2_{ACTR} \cdot (VCR^s_{ryijk})^2 + Kmn1_{ACTR} \cdot VCR^s_{ryijk} + Kmn0_{ACTR} \tag{8.47.b.iv}$$

$$ACTRmax^s_{ryijk} = Kmx2_{ACTR} \cdot (VCR^s_{ryijk})^2 + Kmx1_{ACTR} \cdot VCR^s_{ryijk} + Kmx0_{ACTR} \tag{8.47.b.v}$$

En este conjunto de ecuaciones (8.47.b.i a 8.47.b.v), los índices  $(r, s, y, i, j, k)$  han de adoptar los valores indicados a continuación:

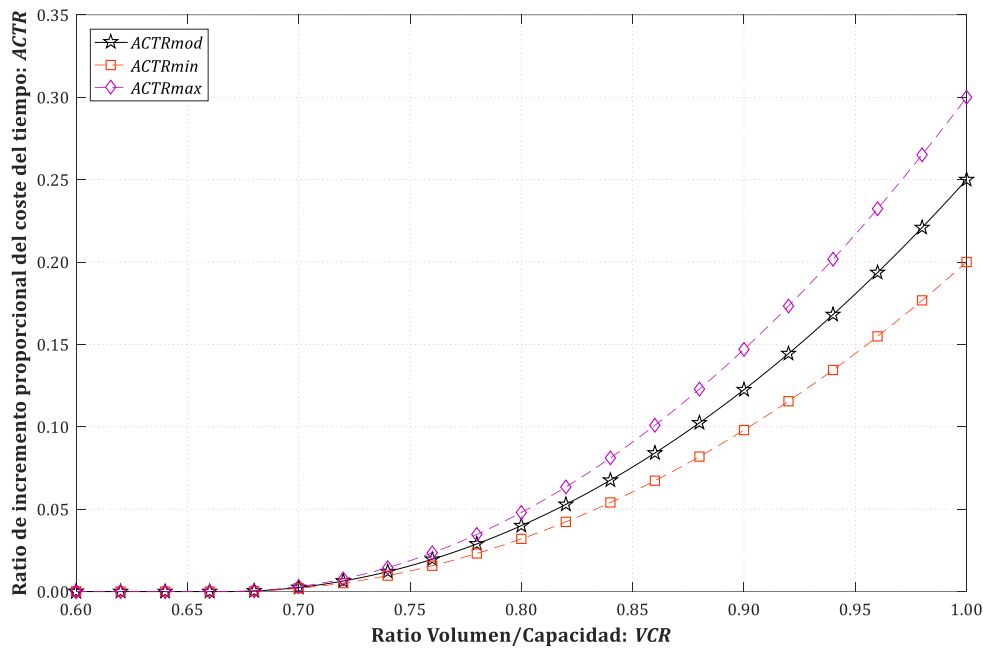
$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$

$$y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Tabla 8.14.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria (*ACTR* o *ACTR\**).

	Coef. grado 2	Coef. grado 1	Coef. grado 0
<b>Moda</b>	$Kmd2_{ACTR} = 2.250000$	$Kmd1_{ACTR} = -3.000000$	$Kmd0_{ACTR} = 1.000000$
<b>Mínimo</b>	$Kmn2_{ACTR} = 1.800000$	$Kmn1_{ACTR} = -2.400000$	$Kmn0_{ACTR} = 8.000000 \cdot 10^{-1}$
<b>Máximo</b>	$Kmx2_{ACTR} = 2.700000$	$Kmx1_{ACTR} = -3.600000$	$Kmx0_{ACTR} = 1.200000$



**Figura 8.20.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del factor de proporcionalidad del incremento del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado a causa de la posible congestión viaria, en función del ratio Volumen/Capacidad del vial de circulación.

**8.3.7.2.b. Variación entre años consecutivos (*y-1* e *y*) del coste medio de viaje generado por el tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado**

La variable  $\Delta Ctm_{r,yjk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria *r*, la variación, entre dos años consecutivos (años *y-1* e *y*) en el escenario *s*, del coste medio de viaje atribuible al tiempo consumido a bordo del vehículo correspondiente al modo *m* de transporte motorizado privado (por tanto, con *m=C* o *m=M*), para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea *i*, durante el período horario *j* y en el sentido *k*. Para el primer año del período u horizonte de evaluación (*y=1*), esta variación corresponde a la diferencia entre dicho primer año y el año base, por ser este último el inmediatamente anterior al inicio del período de evaluación.

La variable  $\Delta Ctm_{r,yjk}^{ms}$  se cuantifica en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

El coste de viaje debido al tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado (en la etapa o tramo de viaje coincidente con el corredor o itinerario transitado por la línea de transporte público) viene dado, para un año determinado, por el producto de los siguientes factores:

- El tiempo efectivamente consumido, el cual se calcula, a su vez, como el cociente entre la distancia media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario por parte de los viajes en vehículo motorizado privado con un recorrido sensiblemente coincidente con el del transporte público (variable  $Ltpr_{rijk}$ ), y la velocidad promedio de trayecto (en la clase de vehículo motorizado privado que corresponda) sobre el vial o viales que sirven de base al corredor o itinerario en cuestión (variable  $Vm_{r1ijk}^{ms}$  o  $Vm_{rijk}^{*m}$ ).
- El coste promedio del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado (por unidad de tiempo), en condiciones base o estándar (es decir, sin incremento por congestión viaria), el cual viene dado en el modelo por las variables  $VTTpr_{ryijk}$  o  $VTTpr_{rijk}^*$ .
- Por último, el factor  $1+ACTR_{ryijk}^s$  (o  $1+ACTR_{rijk}^*$  si se trata del año base), que incorpora el posible incremento proporcional del coste unitario del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado, si el nivel de congestión viaria es suficientemente alto como para conllevar condiciones de circulación sensiblemente molestas para los viajeros de este tipo de modos. Recuérdese en este sentido que las variables  $ACTR_{ryijk}^s$  y  $ACTR_{rijk}^*$  solo toman valores distintos de 0 cuando el ratio Volumen/Capacidad es mayor que 2/3.

Así pues, el cálculo de la variable  $\Delta Ctm_{r1ijk}^{ms}$  se basa simplemente en evaluar el producto de los tres factores anteriores para el año  $y$  y para el año inmediatamente anterior, tomándose finalmente la diferencia o resta entre ambos. Este procedimiento se sistematiza mediante las ecuaciones 8.48.a y 8.48.b, aplicables según las indicaciones que se detallan a continuación.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2, M-B3 y los años  $Yma_r^R$  e  $Yma_r^B$**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$\Delta Ctm_{r1ijk}^{ms} = \left[ \left(1 + ACTR_{r1ijk}^s\right) \cdot VTTpr_{r1ijk} \cdot \frac{1}{Vm_{r1ijk}^{ms}} - \left(1 + ACTR_{rijk}^*\right) \cdot VTTpr_{rijk}^* \cdot \frac{1}{Vm_{rijk}^{*m}} \right] \cdot Ltpr_{rijk} \quad (8.48.a)$$

Si  $y \neq 1$ :

$$\Delta Ctm_{ryijk}^{ms} = \left[ \left(1 + ACTR_{ryijk}^s\right) \cdot VTTpr_{ryijk} \cdot \frac{1}{Vm_{ryijk}^{ms}} - \left(1 + ACTR_{r,y-1,ijk}^s\right) \cdot VTTpr_{r,y-1,ijk} \cdot \frac{1}{Vm_{r,y-1,ijk}^{ms}} \right] \cdot Ltpr_{rijk} \quad (8.48.b)$$

En cuanto a los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.48.a y 8.48.b, han de adoptarse las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, Yma_r^R, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, Yma_r^B, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$m \in \{C, M\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Nótese que en el caso de esta variación anual, el cómputo para el año  $Yma_r^s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ) no se incluye en ninguno de los procesos iterativos de cálculo, sino que la obtención del valor de la variación correspondiente a dicho año puede efectuarse de forma directa una vez que se hayan determinado las soluciones definitivas para el conjunto de variables en los años  $Yma_r^s$  (en los módulos de cálculo M-R1 o

M-B1) e  $Yma_r^s - 1$  (en los módulos M-R2 o M-B2). Esta particularidad es debida al orden en el que se procesan los módulos iterativos de cálculo, ya que el análisis del año  $Yma_r^s$  (módulos M-R1 o M-B1) precede a la ejecución de los módulos M-R2 o M-B2, respectivamente. Para hacer factible esta alteración del orden natural de los años es necesario que, para este tipo de variables incrementales, se preevalúen dentro de los módulos de cálculo M-R1 y M-B1 las variaciones totalizadas o acumuladas a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público, tal como se expone, en este caso, a continuación.

**8.3.7.2.c. Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje generado por el tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado**

La variable  $\Omega Ctm_{rijk}^{ms}$  representa, dada la simulación aleatoria  $r$ , la variación –totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en el escenario  $s$  (con  $s \neq 0$ )– experimentada en el coste medio de viaje atribuible al tiempo consumido a bordo del vehículo correspondiente al modo  $m$  de transporte motorizado privado (por tanto, con  $m=C$  o  $m=M$ ), para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Para una determinada simulación aleatoria y un cierto escenario  $s=R$  o  $s=B$ , la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en plataforma reservada comprende desde el año  $Yimp_r^s + 1$  (primer año perteneciente a esta fase) hasta el año  $Yma_r^s - 1$  (último año perteneciente a dicha fase).

Al igual que en el caso de la variable  $\Delta Ctm_{ryijk}^{ms}$ , el modelo utiliza unidades monetarias constantes [CU] (por viaje) para cuantificar el valor de  $\Omega Ctm_{rijk}^{ms}$ .

La forma de cálculo de la variable  $\Omega Ctm_{rijk}^{ms}$  es, en cuanto a su estructura, análoga a la utilizada previamente para  $\Delta Ctm_{ryijk}^{ms}$ , pues el coste de viaje debido al tiempo transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado se determina mediante el producto de los tres factores explicados en el epígrafe 8.3.7.2.b. Sin embargo, la evaluación de dicho coste ha de realizarse en este caso para el primer año de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público (año  $Yma_r^s$ ), confrontándolo –por diferencia o resta– con el coste homólogo previsto para el último año previo a la entrada en servicio del nuevo modo de transporte público (que es el año  $Yimp_r^s$ ). Los años intermedios transcurridos entre estos dos puntos son precisamente los años pertenecientes a la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio.

De esta forma, se configura la ecuación 8.49 para la obtención de la variable  $\Omega Ctm_{rijk}^{ms}$  en los módulos de cálculo M-R1 y M-B1, que son los únicos para los que dicha variable resulta aplicable.

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

$$\Omega Ctm_{rijk}^{ms} = \left[ \left( 1 + ACTR_{r,Yma_r^s,ijk}^s \right) \cdot VTTpr_{r,Yma_r^s,ijk} \cdot \frac{1}{Vm_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms}} - \left( 1 + ACTR_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \right) \cdot VTTpr_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \frac{1}{Vm_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ms}} \right] \cdot Ltpr_{rijk} \tag{8.49}$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; m \in \{C, M\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$



### 8.3.7.3. Variación (a lo largo del tiempo) del coste medio generado al viajero por irregularidad o incertidumbre del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado

Los aspectos generales en torno a la valoración de la fiabilidad de los tiempos de viaje fueron inicialmente abordados como parte del epígrafe 8.3.5.4.a (*‘Consideraciones preliminares sobre la fiabilidad de horarios en transporte público’*), si bien en aquella ocasión el enfoque adoptado estuvo más centrado, lógicamente, en el caso del transporte público. De todos modos, en dicho epígrafe ya se ponía de manifiesto que, con carácter general, la fiabilidad de los tiempos de viaje consituye un concepto contrapuesto a la variabilidad o dispersión de los mismos. Sabido es que los tiempos de viaje entre dos puntos de la red de transportes responden a una naturaleza aleatoria, de tal forma que ese comportamiento aleatorio puede ser teóricamente descrito o definido mediante una determinada distribución estadística. En este sentido, la mayor o menor dispersión de esa distribución estadística representa una medida inversa de la fiabilidad de los tiempos de viaje (de tal modo que mayor dispersión supone menor fiabilidad y menor dispersión implica mayor fiabilidad).

A la luz del análisis desarrollado en el epígrafe anteriormente citado, se había concluido que, mientras que para los viajes en transporte público se juzgan como más oportunos los enfoques basados en el tiempo medio de retraso (*mean lateness*), para el caso de los desplazamientos efectuados en vehículo privado resultan apropiados aquellos otros enfoques basados en la dispersión con respecto a un valor central (*centrality-dispersion* o *mean-variance*). Esta dualidad entre transporte público y privado tiene su origen, en cierto modo, en que en el transporte en vehículo particular el momento elegido para la salida es una variable continua (cualquier instante a conveniencia del viajero), a diferencia del transporte público, donde los momentos disponibles de salida (horarios) son de naturaleza discreta.

Por tanto, bajo el enfoque seleccionado de dispersión con respecto a un valor central, se adopta —tal como es práctica común— la desviación típica o estándar de los tiempos de trayecto como medida cuantitativa de la variabilidad, irregularidad o falta de fiabilidad de los tiempos de viaje en vehículo motorizado privado. Consecuentemente, para la posterior valoración del coste asociado a este atributo, se ha de recurrir al concepto denominado ratio de fiabilidad (*reliability ratio*), que, en el contexto de la econometría del transporte, representa el cociente entre el valor o coste de una unidad de variabilidad del tiempo de viaje (por ejemplo, un minuto de desviación típica) y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo (medio) de viaje.

Así pues, en los siguientes epígrafes se aborda la obtención de la desviación típica de los tiempos de recorrido en vehículo motorizado privado, como cuantificador de la variabilidad o dispersión del tiempo de trayecto en dichos tipos de opciones modales (automóvil y moto o ciclomotor), para a continuación evaluar las variaciones en el coste medio de viaje asociado a la dispersión o incertidumbre de dichos tiempos de trayecto. Estos cambios o variaciones hacen referencia a la evolución temporal de dicho coste, ya sea entre años consecutivos o totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público.

#### 8.3.7.3.a. Variabilidad del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado

La variable  $\sigma tm_{ryjk}^{ms}$  simboliza, para la simulación aleatoria  $r$ , la desviación típica o estándar del tiempo de trayecto en el modo  $m$  de transporte motorizado privado (es decir, con  $m=C$  o  $m=M$ ) para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones de circulación previstas para esa situación en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Para el caso del año base se define su variable equivalente  $\sigma tm_{rijk}^*{}^m$ , en la que se omiten los índices innecesarios, correspondientes al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

La unidad de tiempo utilizada a lo largo del modelo para expresar numéricamente las variables  $\sigma tm_{ryjk}^{ms}$  y  $\sigma tm_{rijk}^*{}^m$  es el minuto [min].

En línea con el planteamiento general del tipo de modelo desarrollado, los valores de la variable  $\sigma tm_{ryijk}^{ms}$  ( $\sigma tm_{ryijk}^{*m}$  en el año base) se calculan en las simulaciones de acuerdo a distribuciones triangulares de probabilidad y en base a la componente aleatoria  $TR\sigma tm_{rik}$ , cuyos valores particulares proceden a su vez de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) para la que se generaron previamente las respectivas extracciones (epígrafe 6.4.5.2). Por consiguiente, se ha de proceder ahora a determinar los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales que van a ser empleadas para la obtención de valores de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado.

Así pues, para comenzar a perfilar la función de cálculo correspondiente a la moda de la desviación típica del tiempo de trayecto, se recurre como punto de partida al tratamiento que de la fiabilidad de los tiempos de viaje se realiza en la 'Transport Analysis Guidance' (TAG) del Departamento de Transportes del Reino Unido, particularmente en relación con el transporte motorizado privado en vías urbanas (DfT, 2017c: pp. 13-14, 30-31). A su vez, el modelo propuesto en dicho documento para la predicción de cambios en la desviación típica del tiempo de viaje a partir de variaciones en el propio tiempo de viaje, dada una distancia recorrida (DfT, 2017c: pp. 13-14), procede de la particularización de un modelo más general elaborado por Hyder Consulting bajo encargo del Departamento de Transportes del Reino Unido (Black y Chin, 2007; Gilliam *et al.*, 2008; Black *et al.*, 2009). Las relaciones desarrolladas en los citados estudios se basan en una amplia muestra de rutas urbanas repartidas por las 10 mayores áreas metropolitanas de Inglaterra.

La forma funcional para la estimación del coeficiente de variación del tiempo de viaje en el caso de rutas o trayectos que comprenden varios arcos<sup>236</sup> viene dada genéricamente por (Black y Chin, 2007; Gilliam *et al.*, 2008):

$$CV = \alpha \cdot CI^\beta \cdot d^\delta \quad (8.50)$$

donde  $CV$  representa el coeficiente de variación del tiempo de viaje (es decir, el cociente entre la desviación típica y el tiempo medio) para una determinada franja horaria,  $CI$  es el denominado índice de congestión (*congestion index*) y  $d$  representa la distancia recorrida en el trayecto (en kilómetros). Por su parte,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  son los parámetros a ajustar. El índice de congestión (adimensional) se define, para cada franja horaria, como el cociente entre el tiempo medio de trayecto en dicho período horario ( $t$ ) y un tiempo de referencia que corresponde al tiempo obtenido en condiciones de flujo libre o ausencia de tráfico ( $t_F$ ).

Los valores recomendados para los parámetros, obtenidos por ajuste de este modelo a los datos del conjunto de rutas multiarco seleccionadas, fueron (Black y Chin, 2007; Gilliam *et al.*, 2008):  $\alpha=0.16$ ,  $\beta=1.02$ ,  $\delta=-0.39$ .

A partir de la ecuación 8.50 es posible obtener una expresión que relacione la variable de interés, es decir, la desviación típica de los tiempos de viaje ( $\sigma$ , en minutos) durante una determinada franja horaria, con la velocidad promedio de trayecto en dicho período ( $V$ , en km/h), con la velocidad en condiciones de ausencia de tráfico para el vial o viales objeto de análisis ( $V_F$ , en km/h) y con la distancia recorrida en el desplazamiento ( $d$ , en km). Para ello se ha de tener en cuenta simplemente que  $\sigma$  se obtiene como el producto  $CV \cdot t$  (donde, por consistencia de unidades,  $t$  debe expresarse en minutos), que  $t$  (en minutos) puede a su vez calcularse como  $60 \cdot d/V$ , y que el índice de congestión  $CI$  (que se define como  $t/t_F$ ) puede expresarse alternativamente como  $V_F/V$ . Con todo ello resulta una expresión de la forma:

<sup>236</sup> El término arco (*link*) hace referencia en este caso a segmentos de un vial de circulación que comienzan y terminan en intersecciones o nudos susceptibles de causar ralentizaciones o detenciones del tráfico en la ruta bajo análisis (por ejemplo, semáforos, rotondas o glorietas, etc.).

$$\sigma = 60 \cdot \alpha \cdot \frac{(V_F)^\beta}{V^{\beta+1}} \cdot d^{1+\delta} \quad (8.51)$$

Esta expresión sirve de base a las ecuaciones 8.52.a.ii, 8.52.a.v, 8.52.b.ii y 8.52.b.v, en las que — mediante las oportunas adaptaciones a las variables propias del modelo desarrollado en la tesis— se determina la moda de las distribuciones triangulares de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor). Así,  $Ltpr_{rijk}$  reemplaza a  $d$  como distancia media recorrida por los viajes en vehículo motorizado privado sobre el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea de transporte público,  $Vm_{ryijk}^{ms}$  (o  $Vm_{rijk}^{*m}$ ) sustituye a  $V$  como velocidad promedio de trayecto sobre dicho viario (con un determinado volumen de tráfico) para automóvil particular o para moto y ciclomotor, y  $VFc_{rik}$  y  $VFm_{rik}$  desempeñan el papel de  $V_F$  como velocidades medias de trayecto para uno u otro tipo de vehículo en condiciones de ausencia de tráfico (velocidades de referencia).

Por otra parte, obsérvese que la ecuación propuesta en la ‘*Transport Analysis Guidance*’ (TAG) del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT, 2017c: pp. 13-14) para la predicción de cambios en la desviación típica del tiempo de viaje no deja de ser, a pesar de su diferente apariencia, una forma más de las ecuaciones 8.50 y 8.51, obtenida al fijar la velocidad en flujo libre o ausencia de tráfico ( $V_F$ ) a un valor de 44.5 km/h<sup>237</sup>, expresar los tiempos de trayecto y su desviación típica en segundos, y aplicar los valores recomendados para los parámetros ( $\alpha=0.16$ ,  $\beta=1.02$ ,  $\delta=-0.39$ ).

Para establecer las funciones de cálculo de los valores mínimo y máximo de la desviación típica del tiempo de trayecto, una indicación fundamental es que, de acuerdo al estudio original (Black y Chin, 2007: pp. 47-48, 62), la desviación relativa en la predicción del coeficiente de variación entre el conjunto de rutas alcanza límites (para un nivel de confianza del 95%) de  $\pm 27\%$  para un índice de congestión igual a 1 (congestión nula o sin efecto) y de  $\pm 31\%$  para un índice de congestión igual a 2 (congestión alta)<sup>238</sup>. Se señala que este intervalo de confianza representa el rango de error esperable en una ruta al usar la relación promedio en lugar de la relación específica de la ruta individual. Por otra parte, en la propia ‘*Transport Analysis Guidance*’ (DfT, 2017c: pp. 14, 31) se expresan ciertas cautelas con respecto a la utilización directa del modelo general con los parámetros calibrados globalmente por Black y Chin (2007), poniendo de manifiesto la preferencia por modelos calibrados a nivel local.

Así pues, en consideración principalmente de los intervalos de confianza señalados por Black y Chin (2007: pp. 47-48, 62), se adopta como criterio que los valores mínimo y máximo de las distribuciones triangulares signifiquen una reducción o aumento (respectivamente) del 33.3% con respecto al valor calculado para la moda. Este criterio se traduce en las ecuaciones 8.52.a.iii, 8.52.a.iv, 8.52.a.vi, 8.52.a.vii, 8.52.b.iii, 8.52.b.iv, 8.52.b.vi y 8.52.b.vii, con los factores  $Kmn_\sigma$  y  $Kmx_\sigma$  tomando los valores señalados en la Tabla 8.15.

En resumen, la obtención de las variables  $\sigma tm_{rijk}^{*m}$  (para el año base) y  $\sigma tm_{ryijk}^{ms}$  (para cualquiera de los restantes módulos de cálculo) queda determinada por los conjuntos de ecuaciones comprendidos entre la 8.52.a.i y 8.52.a.vii, y 8.52.b.i a 8.52.b.vii, respectivamente. De forma complementaria, los valores numéricos que se proponen para los parámetros o coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, el mínimo y el máximo de las correspondientes distribuciones triangulares se recogen en la Tabla 8.15. Por último, en la Figura 8.21 se muestra gráficamente un ejemplo en el que, en función de la velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado, se evalúan dichas funciones con los parámetros y coeficientes propuestos, dado un hipotético caso ilustrativo en el que se fija la distancia recorrida en 6 km y la velocidad media en condiciones de ausencia de tráfico en 40 km/h.

<sup>237</sup> DfT (2017c: p. 31) fija esta velocidad en 44.5 km/h por considerarla representativa del rango de velocidades en flujo libre en las rutas que componen la muestra en la que se basan los trabajos originales, que van de 37 a 47 km/h.

<sup>238</sup> Este conjunto de resultados está obtenido para una distancia  $d$  igual a 5 km.

Para el año base

$$\sigma tm_{rijk}^{*m} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TR\sigma tm_{rik} \mid \sigma tmmin_{rijk}^{*m}, \sigma tmmax_{rijk}^{*m}, \sigma tmmod_{rijk}^{*m} \right) \quad (8.52.a.i)$$

donde:

Para automóvil particular ( $m=C$ ):

$$\sigma tmmod_{rijk}^{*C} = 60 \cdot Kmd\alpha_{\sigma} \cdot \frac{(VFC_{rik})^{Kmd\beta_{\sigma}}}{(Vm_{rijk}^{*C})^{Kmd\beta_{\sigma}+1}} \cdot (Ltpr_{rijk})^{1+Kmd\delta_{\sigma}} \quad (8.52.a.ii)$$

$$\sigma tmmin_{rijk}^{*C} = Kmn_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{rijk}^{*C} \quad (8.52.a.iii)$$

$$\sigma tmmax_{rijk}^{*C} = Kmx_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{rijk}^{*C} \quad (8.52.a.iv)$$

Para moto y ciclomotor ( $m=M$ ):

$$\sigma tmmod_{rijk}^{*M} = 60 \cdot Kmd\alpha_{\sigma} \cdot \frac{(VFM_{rik})^{Kmd\beta_{\sigma}}}{(Vm_{rijk}^{*M})^{Kmd\beta_{\sigma}+1}} \cdot (Ltpr_{rijk})^{1+Kmd\delta_{\sigma}} \quad (8.52.a.v)$$

$$\sigma tmmin_{rijk}^{*M} = Kmn_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{rijk}^{*M} \quad (8.52.a.vi)$$

$$\sigma tmmax_{rijk}^{*M} = Kmx_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{rijk}^{*M} \quad (8.52.a.vii)$$

Por su parte, los índices  $(r,m,i,j,k)$  involucrados en el conjunto de ecuaciones comprendido entre 8.52.a.i y 8.52.a.vii han de adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; m \in \{C, M\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$\sigma tm_{ryijk}^{ms} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TR\sigma tm_{rik} \mid \sigma tmmin_{ryijk}^{ms}, \sigma tmmax_{ryijk}^{ms}, \sigma tmmod_{ryijk}^{ms} \right) \quad (8.52.b.i)$$

donde:

Para automóvil particular ( $m=C$ ):

$$\sigma tmmod_{ryijk}^{Cs} = 60 \cdot Kmd\alpha_{\sigma} \cdot \frac{(VFC_{rik})^{Kmd\beta_{\sigma}}}{(Vm_{ryijk}^{Cs})^{Kmd\beta_{\sigma}+1}} \cdot (Ltpr_{rijk})^{1+Kmd\delta_{\sigma}} \quad (8.52.b.ii)$$

$$\sigma tmmin_{ryijk}^{Cs} = Kmn_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{ryijk}^{Cs} \quad (8.52.b.iii)$$

$$\sigma tmmax_{ryijk}^{Cs} = Kmx_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{ryijk}^{Cs} \quad (8.52.b.iv)$$

Para moto y ciclomotor ( $m=M$ ):

$$\sigma tmmod_{ryijk}^{Ms} = 60 \cdot Kmd\alpha_{\sigma} \cdot \frac{(VFM_{rik})^{Kmd\beta_{\sigma}}}{(Vm_{ryijk}^{Ms})^{Kmd\beta_{\sigma}+1}} \cdot (Ltpr_{rijk})^{1+Kmd\delta_{\sigma}} \quad (8.52.b.v)$$

$$\sigma tmmin_{ryijk}^{Ms} = Kmn_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{ryijk}^{Ms} \quad (8.52.b.vi)$$

$$\sigma tmmax_{ryijk}^{Ms} = Kmx_{\sigma} \cdot \sigma tmmod_{ryijk}^{Ms} \quad (8.52.b.vii)$$

En la serie de ecuaciones comprendida entre 8.52.b.i y 8.52.b.vii, los índices intervinientes  $(r,s,y,m,i,j,k)$  deben tomar los valores señalados a continuación:

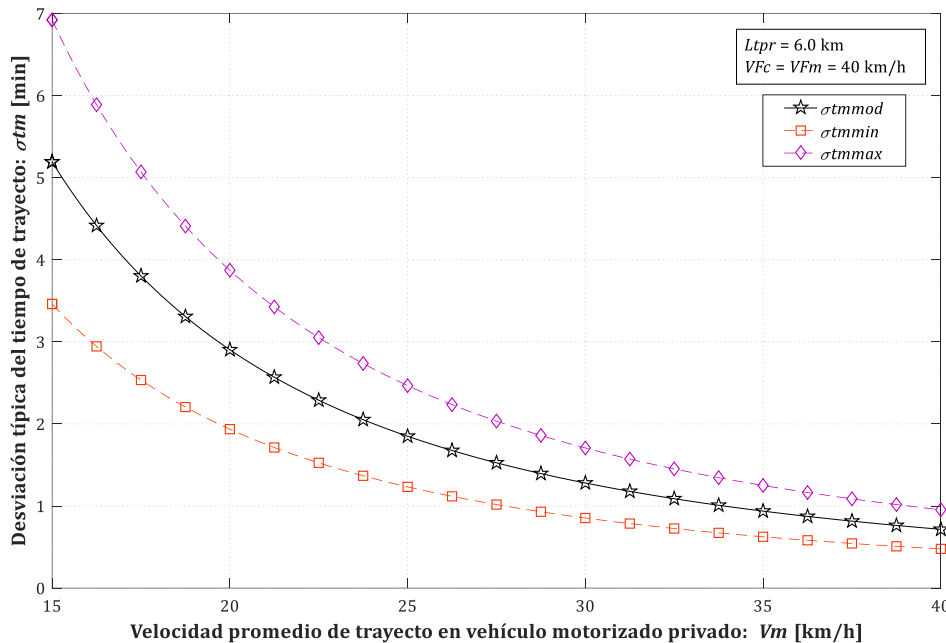
$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$m \in \{C, M\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Tabla 8.15.** Valores numéricos propuestos para los parámetros de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado ( $\sigma_{tm}$  o  $\sigma_{tm}^*$ ).

	Parámetros		
<b>Moda</b>	$Kmd\alpha_\sigma = 1.60 \cdot 10^{-1}$	$Kmd\beta_\sigma = 1.02$	$Kmd\delta_\sigma = -3.90 \cdot 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$Kmn_\sigma = 0.666667$		
<b>Máximo</b>	$Kmx_\sigma = 1.333333$		



**Figura 8.21.** Ejemplo de evaluación de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo de la desviación típica del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado, en función de la velocidad promedio de trayecto (con una distancia recorrida de 6 km y una velocidad media en ausencia de tráfico de 40 km/h).

**8.3.7.3.b. Variación entre años consecutivos (y-1 e y) del coste medio de viaje por irregularidad o incertidumbre del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado**

La variable  $\Delta C\sigma_{L_{ryijk}}^{ms}$  indica para la simulación aleatoria  $r$  la variación, entre dos años consecutivos (años  $y-1$  e  $y$ ) en el escenario  $s$ , del coste medio de viaje asociado a la irregularidad, variabilidad o incertidumbre (falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de trayecto en el modo  $m$  de transporte motorizado privado (es decir, con  $m=C$  o  $m=M$ ), para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de

circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Para el caso singular del primer año del período u horizonte de evaluación ( $y=1$ ), esta variación se establece entre el susodicho primer año y el año base, al entenderse este último como el inmediatamente anterior.

La variable  $\Delta C\sigma t_{ryijk}^{ms}$  se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

El coste medio de viaje atribuible a la irregularidad, variabilidad o incertidumbre del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado (en la etapa o tramo de viaje coincidente con el corredor o itinerario transitado por la línea de transporte público) se calcula, dado un cierto año, por el producto de los siguientes factores:

- La desviación típica o estándar del tiempo de trayecto en el modo de transporte motorizado privado que corresponda (automóvil o moto y ciclomotor), que en el modelo viene dada (en minutos) por la variable  $\sigma tm_{ryijk}^{ms}$  (o bien  $\sigma tm_{ryijk}^{*m}$  en el caso particular del año base).
- El coste atribuido a cada unidad (minuto en este caso) de desviación típica del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado, que a su vez se calcula en base a dos factores. Por un lado, se tiene el coste promedio del tiempo de viaje en vehículo motorizado privado por unidad de tiempo (variables  $VTTpr_{ryijk}$  o  $VTTpr_{ryijk}^*$ ), con el valor correspondiente al año analizado. Dado que estas variables vienen dadas inicialmente en unidades monetarias por hora, deben ser divididas entre 60 para obtener el correspondiente coste por minuto. A su vez, este debe ser multiplicado por el ratio de valor de la fiabilidad (*reliability ratio*) en transporte motorizado privado (variable del modelo  $RRpr_{ryijk}$ ) ya que, por definición, este índice representa la razón entre el valor o coste de una unidad de variabilidad del tiempo de viaje (desviación típica en este caso) y el valor o coste de una unidad del propio tiempo medio de viaje (DfT, 2017c: p. 14).

En conclusión, el cálculo de la variable  $\Delta C\sigma t_{ryijk}^{ms}$  consiste tan solo en evaluar el producto de los factores anteriormente mencionados en el año  $y$  y en su año precedente, tomándose la diferencia o resta entre ambos. Este procedimiento da origen a las ecuaciones 8.53.a y 8.53.b, las cuales se aplican de la forma señalada a continuación.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2, M-B3 y los años  $Yma_r^R$  e  $Yma_r^B$**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$\Delta C\sigma t_{r1ijk}^{ms} = \frac{1}{60} \cdot RRpr_{ryijk} \cdot \left( VTTpr_{r1ijk} \cdot \sigma tm_{r1ijk}^{ms} - VTTpr_{ryijk}^* \cdot \sigma tm_{ryijk}^{*m} \right) \quad (8.53.a)$$

Si  $y \neq 1$ :

$$\Delta C\sigma t_{ryijk}^{ms} = \frac{1}{60} \cdot RRpr_{ryijk} \cdot \left( VTTpr_{ryijk} \cdot \sigma tm_{ryijk}^{ms} - VTTpr_{r,y-1,ijk} \cdot \sigma tm_{r,y-1,ijk}^{ms} \right) \quad (8.53.b)$$

Para los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  de las ecuaciones 8.53.a y 8.53.b son de aplicación los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, Yma_r^R, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, Yma_r^B, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m \in \{C, M\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Nótese además que la evaluación de la ecuación 8.53.b para el año  $Yma_r^s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ) no se encuadra en ninguno de los módulos iterativos de cálculo, ya que la obtención del valor de  $\Delta C\sigma_{ryijk}^{ms}$  correspondiente a dicho año se puede efectuar mediante cálculo directo tras la finalización de los módulos M-R1 y M-R2 o M-B1 y M-B2.

### 8.3.7.3.c. Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje por irregularidad o incertidumbre del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado

La variable  $\Omega C\sigma_{rijk}^{ms}$  representa, dada la simulación aleatoria  $r$ , la variación —totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en el escenario  $s$  (con  $s \neq 0$ )— experimentada en el coste medio de viaje ligado a la irregularidad, variabilidad o incertidumbre (falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de trayecto en el modo  $m$  de transporte motorizado privado (con  $m=C$  o  $m=M$ ), para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Recuérdese que, para una determinada simulación aleatoria y un cierto escenario  $s=R$  o  $s=B$ , la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en plataforma reservada incluye los años comprendidos entre  $Yimp_r^s+1$  (primer año perteneciente a esta fase) y  $Yma_r^s-1$  (último año de dicha etapa).

Al igual que con la variable  $\Delta C\sigma_{ryijk}^{ms}$ , para cuantificar el valor de  $\Omega C\sigma_{rijk}^{ms}$  el modelo utiliza unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

La forma general de cálculo de la variable  $\Omega C\sigma_{rijk}^{ms}$  es equivalente, en su estructura, a la utilizada anteriormente para  $\Delta C\sigma_{ryijk}^{ms}$ , puesto que para el coste por irregularidad o incertidumbre del tiempo de trayecto evaluado en cualquier año se han de tener en cuenta los mismos factores que se expusieron en el epígrafe 8.3.7.3.b. Sin embargo, en el cálculo de la variable  $\Omega C\sigma_{rijk}^{ms}$ , la evaluación de dicho coste ha de efectuarse para el primer año de la etapa de madurez del nuevo servicio de transporte público (año  $Yma_r^s$ ), y para el último año previo a la entrada en servicio del nuevo modo de transporte público (año  $Yimp_r^s$ ), debiendo calcularse finalmente la diferencia entre los costes en ambos momentos.

De este modo, se llega a la ecuación 8.54 para la obtención de la variable  $\Omega C\sigma_{rijk}^{ms}$  en los módulos M-R1 y M-B1, siendo estos los únicos para los que resulta aplicable el cálculo de dicha variable.

#### Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1

$$\Omega C\sigma_{rijk}^{ms} = \frac{1}{60} \cdot RRpr_{rijk} \cdot \left( VTTpr_{r,Yma_r^s,ijk} \cdot \sigma tm_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} - VTTpr_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \sigma tm_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ms} \right) \quad (8.54)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; m \in \{C, M\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.7.4. Consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado

La siguiente sección del modelo está encaminada a prever cuantitativamente los cambios o variaciones producidas en el coste privado medio (por cada viajero) generado por el consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) asociado a los viajes de interés realizados en transporte motorizado privado, ya sea en automóvil particular o bien en moto o ciclomotor. Estos cambios o variaciones se refieren a la evolución temporal de dicho coste, calculada entre años consecutivos (con la excepción de los módulos de cálculo M-R1 y M-B1). Dada una determinada distancia de viaje recorrida en vehículo motorizado

privado, dichas variaciones temporales en el coste podrían venir producidas por la evolución del precio unitario de las fuentes energéticas consumidas (combustibles y energía eléctrica), por variaciones en el consumo energético por unidad de distancia recorrida, por la evolución en la composición del parque móvil en cuanto a proporciones de vehículos-km que son realizados mediante los distintos tipos de fuentes de energía, o por variaciones en la tasa de ocupación por vehículo. De esta serie de factores, se puede asumir que la mayoría de ellos experimentan una evolución de carácter exógeno desde el punto de vista del modelo (es decir, una evolución basada directamente en datos externos), pero en el caso del consumo energético por unidad de distancia se debe tener en cuenta que dicho consumo está generalmente vinculado a la velocidad de circulación, que a su vez depende considerablemente del ratio Volumen/Capacidad en el vial o viales utilizados, por lo que se trata en definitiva de un factor endógeno que debe ser incorporado por el modelo.

A la hora de analizar dicho consumo se debe distinguir, en un primer nivel, entre las dos opciones modales de transporte motorizado privado que se han incluido en el modelo: automóvil particular y moto o ciclomotor. Como formas secundarias de energía se han considerado el gasóleo (combustible diésel), la gasolina y la energía eléctrica, excluyéndose el gasóleo para el caso de motos y ciclomotores al no utilizar este tipo de vehículos dicha clase de combustible. En el caso de los vehículos movidos mediante motores de combustión interna (diésel y gasolina), existe suficiente evidencia científico-técnica sobre las funciones matemáticas que relacionan el consumo energético con la velocidad de circulación. Sin embargo, en el caso de vehículos eléctricos recargables (enchufables), de acuerdo a la 'EMEP/EEA<sup>239</sup> Air Pollutant Emission Inventory Guidebook' (EMEP/EEA, 2016: p. 71), todavía no se han desarrollado este tipo de relaciones. De todos modos, la dependencia del consumo con la velocidad en esta clase de vehículos sería previsiblemente menos acusada que en el caso de motores de combustión interna, sobre todo dentro de un rango de velocidades relativamente bajas —como las habituales en tráfico urbano— donde la resistencia aerodinámica juega un papel menor. Es por ello que los siguientes epígrafes (8.3.7.4.a, 8.3.7.4.b y 8.3.7.4.c) se centran en aquellos casos (automóvil diésel, automóvil de gasolina y motos/ciclomotores de gasolina) en los que sí es posible establecer claramente esa dependencia entre consumo y velocidad, mientras que el consumo en vehículos movidos mediante el uso de energía eléctrica se incorpora al modelo como una constante en la que se desprecia su hipotética dependencia de la velocidad<sup>240</sup>.

#### 8.3.7.4.a. Consumo promedio en automóviles diésel

La variable  $FCd_{ryijk}^s$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida por automóviles diésel en la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones de circulación previstas para esa situación en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el año base se designa como  $FCd_{ryijk}^*$ , donde se omiten por innecesarios los índices relativos al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

Las unidades utilizadas para las variables  $FCd_{ryijk}^s$  y  $FCd_{ryijk}^*$  en la formulación del modelo son litros por kilómetro [l/km].

El planteamiento adoptado para las simulaciones del modelo es que los valores de la variable  $FCd_{ryijk}^s$  (o  $FCd_{ryijk}^*$  en el año base) se obtengan en base a distribuciones triangulares de probabilidad a partir de la componente aleatoria  $TRFCd_{rik}$ , que procede a su vez de la correspondiente distribución triangular de

<sup>239</sup> EMEP: *European Monitoring and Evaluation Programme* (Programa Europeo de Monitorización y Evaluación) / EEA: *European Environment Agency* (Agencia Europea de Medioambiente).

<sup>240</sup> Un factor adicional para justificar la aproximación del consumo por unidad de distancia en vehículos eléctricos a una constante independiente de la velocidad es su bajísima incidencia sobre el coste privado asumido por el usuario, al ser en este tipo de vehículos el coste por consumo energético muy inferior a los costes vinculados al tiempo de viaje.



partida (con mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ). Sobre esta última distribución se generaron en su momento (epígrafe 6.4.5.3.a) los respectivos valores numéricos aleatorios de  $TRFCd_{rik}$ .

Por consiguiente, procede establecer ahora los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales que deban ser utilizadas para la obtención del consumo promedio de combustible en automóviles diésel. En este sentido, las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo deben reflejar la dependencia del consumo de combustible por unidad de distancia con respecto a la velocidad de circulación.

En relación con esta dependencia, se selecciona como principal documento de referencia la sección de Transporte por Carretera de la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' de EMEP/EEA, en su edición más reciente en el momento de elaboración del modelo (EMEP/EEA, 2016)<sup>241</sup>, ya que dicha guía proporciona, además de métodos conducentes al cálculo de emisiones atmosféricas derivadas del transporte por carretera, formulaciones intermedias que permiten estimar el consumo de combustible en diferentes tipos de vehículos en función de la velocidad de circulación. Estas formulaciones forman parte del método "Tier 3", que es el implementado en la herramienta COPERT 4 (Gkatzoflias *et al.*, 2012) de cálculo de emisiones de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero procedentes del transporte por carretera.

Así pues, para definir la función de cálculo correspondiente a la moda en el caso de automóviles ligeros de pasajeros con motorización diésel, se toman como base de referencia coches diésel que se ajusten a los estándares de emisiones Euro 3 y Euro 4, y con una cilindrada comprendida entre 1400 y 2000 cm<sup>3</sup>. En la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' (EMEP/EEA, 2016: pp. 65-66) se proporciona la fórmula genérica de cálculo<sup>242</sup> y los coeficientes<sup>243</sup> a aplicar para estas clases de automóviles. Estos datos sirven de base, respectivamente, para la construcción del primer factor en las ecuaciones 8.55.a.ii y 8.55.b.ii (donde se toma como variable de entrada la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, es decir,  $Vm_{rijk}^*C$  o  $Vm_{ryijk}^{Cs}$ ), así como para el establecimiento de los coeficientes reseñados posteriormente en la Tabla 8.16. Nótese al respecto que los coeficientes para el cálculo del consumo de combustible son iguales tanto para estándares de emisiones Euro 3 como para Euro 4 en el caso de motores diésel con una capacidad entre 1400 y 2000 cm<sup>3</sup>.

Las formulaciones a las que se refiere el párrafo anterior proporcionan el consumo de combustible en unidades de masa por cada unidad de distancia recorrida (g/km). De cara a obtener posteriormente el coste privado para el viajero, conviene transformar dichas unidades de masa a su volumen equivalente (concretamente a litros), ya que el precio unitario del combustible se expresa en el modelo en unidades monetarias por litro. Por consiguiente, los resultados obtenidos de aplicar directamente la formulación contenida en la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' deben ser divididos entre la densidad del combustible correspondiente. En el caso del gasóleo de automoción, su densidad a 15°C se sitúa entre 820 y 845 g/l<sup>244</sup>. En particular, se establece de acuerdo a EMEP/EEA (2016: pp. 52-53) una densidad de referencia de 835 g/l para el combustible diésel de especificaciones obligatorias desde 2005.

Los pasos descritos hasta el momento permiten definir una función de cálculo de la moda que se puede considerar aplicable al caso del año base (ecuación 8.55.a.ii). Sin embargo, de cara a la proyección futura de esta función de cálculo de consumo de combustible, este deberá ser objeto de una corrección a la baja debido a la progresiva mejora en la eficiencia energética de los motores y a la mayor penetración de las clases más eficientes de automóviles en el parque móvil (MFOM, 2014: p. 20). Esta corrección se

<sup>241</sup> Nótese como observación que en octubre de 2019 (con posterioridad a la finalización del modelo) fue publicada una nueva edición de la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' de EMEP/EEA.

<sup>242</sup>  $FC = (a+c \cdot V + e \cdot V^2) / (1+b \cdot V + d \cdot V^2) + f/V$ , donde  $FC$  es el consumo de combustible en g/km,  $V$  es la velocidad de circulación en km/h y  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  son coeficientes que dependen de los estándares de emisiones para los que esté homologado el vehículo y de la cilindrada del motor.

<sup>243</sup>  $a = 1.62 \cdot 10^2$ ;  $b = 1.23 \cdot 10^{-1}$ ;  $c = 2.18$ ;  $d = -7.76 \cdot 10^{-4}$ ;  $e = -1.28 \cdot 10^{-2}$ ;  $f = 0$  (el intervalo de velocidades en el que fórmula y coeficientes son válidos comprende desde 10 hasta 130 km/h).

<sup>244</sup> <https://www.clh.es/file/EspecificacionesProducto/GASOLEO%20A.pdf> [Último acceso: 11/03/2020]

manifiesta mediante la introducción del factor  $1-(y/Yap) \cdot (fcrd_r/100)$  en la ecuación 8.55.b.ii, donde  $Yap$  es el número total de años del período u horizonte de evaluación,  $y$  es el cardinal correspondiente al orden del año en cuestión dentro del período u horizonte de evaluación (de forma que  $y$  toma todos los valores enteros entre 1 y  $Yap$ ), y  $fcrd_r$  (en %) representa el porcentaje de reducción del consumo medio de combustible por unidad de distancia esperable en el año final del período u horizonte de evaluación –con respecto al consumo en el año base– en el caso del parque vehicular de automóviles diésel. Obsérvese que, a falta de otras indicaciones más específicas, se ha propuesto por simplicidad una función lineal de reducción de consumo entre el año base y el final del horizonte de evaluación.

Una vez completada la definición de la función de cálculo correspondiente a la moda, es necesario proponer adicionalmente las funciones que definan los valores mínimo y máximo del consumo medio de combustible de los automóviles diésel en función de la velocidad de circulación. Para ello se asume simplemente que los valores mínimo y máximo sean, en cada caso, un 20% inferiores/superiores a la moda. Nótese que, de acuerdo al planteamiento general del modelo, estos valores se refieren al mínimo y máximo del consumo medio del parque (agregado) de automóviles diésel existente en cada situación <sup>245</sup>, no a los valores mínimo y máximo del conjunto de observaciones individuales (es decir, posibles automóviles específicos), puesto que en este último caso la variabilidad esperable sería bastante mayor (con distribuciones previsiblemente asimétricas).

En conclusión, el procedimiento de obtención de valores para las variables  $FCd^*_{rijk}$  y  $FCd^s_{ryijk}$  queda definido por el conjunto de ecuaciones que se presenta a continuación. Al respecto, los coeficientes propuestos para las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales se glosan en la Tabla 8.16. Por su parte, la representación gráfica de dichas funciones (para el caso particular del año base) se incluye posteriormente en la Figura 8.22 (epígrafe 8.3.7.4.c), conjuntamente con las funciones homólogas aplicables a automóviles de gasolina y a motos y ciclomotores al objeto de facilitar la comparación entre todas ellas.

**Para el año base**

$$FCd^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}}(TRFCd_{rik} \mid FCdmin^*_{rijk}, FCdmax^*_{rijk}, FCdmod^*_{rijk}) \tag{8.55.a.i}$$

donde:

$$FCdmod^*_{rijk} = \frac{Kda_{FCD} + Kdc_{FCD} \cdot Vm^*_{rijk} + Kde_{FCD} \cdot (Vm^*_{rijk})^2}{1 + Kdb_{FCD} \cdot Vm^*_{rijk} + Kdd_{FCD} \cdot (Vm^*_{rijk})^2} \cdot \frac{1}{835} \tag{8.55.a.ii}$$

$$FCdmin^*_{rijk} = Kdmn_{FCD} \cdot FCdmod^*_{rijk} \tag{8.55.a.iii}$$

$$FCdmax^*_{rijk} = Kdmx_{FCD} \cdot FCdmod^*_{rijk} \tag{8.55.a.iv}$$

Los subíndices  $(r,i,j,k)$  incluidos en las ecuaciones 8.55.a.i a 8.55.a.iv han de adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$FCd^s_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}}(TRFCd_{rik} \mid FCdmin^s_{ryijk}, FCdmax^s_{ryijk}, FCdmod^s_{ryijk}) \tag{8.55.b.i}$$

donde:

<sup>245</sup> Estas diferencias del mínimo y del máximo con la moda se deberían principalmente a que la composición del parque de automóviles diésel no coincidirá necesariamente con los estándares de emisiones y cilindrada que se han tomado como referencia para calcular el consumo promedio asignado a la moda.

$$FCdmod_{ryijk}^s = \frac{Kda_{FCD} + Kdc_{FCD} \cdot Vm_{ryijk}^{Cs} + Kde_{FCD} \cdot (Vm_{ryijk}^{Cs})^2}{1 + Kdb_{FCD} \cdot Vm_{ryijk}^{Cs} + Kdd_{FCD} \cdot (Vm_{ryijk}^{Cs})^2} \cdot \frac{1}{835} \cdot \left(1 - \frac{y}{Yap} \cdot \frac{fcrd_r}{100}\right) \quad (8.55.b.ii)$$

$$FCdmin_{ryijk}^s = Kdmn_{FCD} \cdot FCdmod_{ryijk}^s \quad (8.55.b.iii)$$

$$FCdmax_{ryijk}^s = Kdmx_{FCD} \cdot FCdmod_{ryijk}^s \quad (8.55.b.iv)$$

Además, los índices  $(r,s,y,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.55.b.i a 8.55.b.iv toman los valores que se indican a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

**Tabla 8.16.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en automóviles diésel ( $FCd$  o  $FCd^*$ ).

	Coeficientes				
<b>Moda</b>	$Kda_{FCD} = 1.62 \cdot 10^2$	$Kdb_{FCD} = 1.23 \cdot 10^{-1}$	$Kdc_{FCD} = 2.18$	$Kdd_{FCD} = -7.76 \cdot 10^{-4}$	$Kde_{FCD} = -1.28 \cdot 10^{-2}$
<b>Mínimo</b>	$Kdmn_{FCD} = 0.80$				
<b>Máximo</b>	$Kdmx_{FCD} = 1.20$				

### 8.3.7.4.b. Consumo promedio en automóviles de gasolina

La variable  $FCg_{ryijk}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida por automóviles de gasolina en la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones de circulación previstas para esa situación en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Para el caso del año base se define su variable equivalente  $FCg^*_{ryijk}$ , en la que se omiten los índices innecesarios, correspondientes al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

En el modelo desarrollado, las variables  $FCg_{ryijk}^s$  y  $FCg^*_{ryijk}$  se expresan en litros por kilómetro [l/km].

Los valores de la variable  $FCg_{ryijk}^s$  ( $FCg^*_{ryijk}$  en el año base) se obtienen para las simulaciones del modelo según distribuciones triangulares de probabilidad, utilizando a tal objeto la componente aleatoria  $TRFCg_{rik}$ . Esta procede a su vez de su respectiva distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ), para la cual se generaron previamente (epígrafe 6.4.5.3.b) las sucesivas extracciones aleatorias. En este sentido, se requiere ahora establecer los parámetros de moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales correspondientes al consumo promedio de combustible en automóviles de gasolina. Tales parámetros han de ser determinados de acuerdo a funciones que recojan la dependencia del consumo con respecto a la velocidad de circulación.

Así pues, a la hora de desarrollar las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del consumo de combustible en automóviles de gasolina el planteamiento general es análogo al ya utilizado en el caso de los automóviles diésel, pero incorporando las adaptaciones numéricas pertinentes. El documento básico

de referencia para esta labor es, por tanto, la sección de Transporte por Carretera de la 'Air Pollutant Emission Inventory Guidebook' (EMEP/EEA, 2016).

En primer lugar, para establecer la función de cálculo de la moda se adoptan como referencia de base automóviles ligeros de pasajeros con motorización de gasolina que satisfaga los estándares de emisiones Euro 4, con una cilindrada comprendida entre 1400 y 2000 cm<sup>3</sup>. La 'Air Pollutant Emission Inventory Guidebook' (EMEP/EEA, 2016: pp. 60-61) especifica la fórmula genérica de cálculo<sup>246</sup> y los coeficientes<sup>247</sup> que se deben aplicar a esta clase de automóviles. Con estos datos se construye el primer factor de las ecuaciones 8.56.a.ii y 8.56.b.ii (adoptando como variable de entrada la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular,  $Vm_{rijk}^{*C}$  o  $Vm_{ryijk}^{Cs}$ ), con los coeficientes correspondientes a la moda que se indican en la Tabla 8.17.

El siguiente paso consiste en convertir el consumo de combustible en unidades de masa, resultante de aplicar directamente la formulación contenida en la 'Air Pollutant Emission Inventory Guidebook' (g/km), a unidades volumétricas (l/km). Para ello es necesario dividir el consumo en unidades de masa entre la densidad de la gasolina. Esta última presenta una densidad a 15°C comprendida entre 720 y 775 g/l, tanto para gasolina 95<sup>248</sup> como para gasolina 98<sup>249</sup>, por lo que, redondeando ligeramente, se puede tomar un valor intermedio de 750 g/l.

Los pasos anteriores serían suficientes para definir la función de cálculo de la moda a aplicar en el caso del año base (ecuación 8.56.a.ii). Sin embargo, para la proyección futura de las funciones de cálculo del consumo de combustible se debe incorporar un factor de corrección a la baja en consideración de las previsibles mejoras en la eficiencia energética de los motores y de la expansión de las clases más eficientes de automóviles dentro del parque móvil (MFOM, 2014: p. 20). Esta corrección se introduce mediante el factor  $1-(y/Yap) \cdot (fcrg_r/100)$  en la ecuación 8.56.b.ii, donde  $fcrg_r$  (en %) representa el porcentaje de reducción de consumo de combustible por unidad de distancia previsto para el año final del período u horizonte de evaluación —en proporción al consumo en el año base— en el caso del parque vehicular de automóviles de gasolina (por su parte,  $Yap$  e  $y$  presentan los mismos significados que ya se indicaron para el caso de automóviles diésel). Con el factor propuesto, la función de reducción de consumo entre el año base y el final del horizonte de evaluación presenta simplemente una forma lineal.

Por su parte, para establecer los valores mínimo y máximo del consumo promedio de combustible en automóviles de gasolina en función de la velocidad de circulación se asume el mismo criterio que en el caso de los automóviles diésel. Por tanto, las funciones de mínimo y máximo son, respectivamente, un 20% inferiores o superiores a la moda. Se tiene en cuenta de esta forma la posible variabilidad en la composición del parque de automóviles de gasolina, ya que en general dicha composición puede no coincidir —al menos no exactamente— con los estándares de emisiones y cilindrada que se adoptaron como referencia en el cálculo del consumo promedio asignado a la moda.

En síntesis, el procedimiento de obtención de valores para las variables  $FCg_{rijk}^{*}$  y  $FCg_{ryijk}^s$  queda regido por la serie de ecuaciones comprendida entre 8.56.a.i y 8.56.b.iv. En relación con dichas ecuaciones, se presentan en la Tabla 8.17 los valores propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo. Por otra parte, la representación gráfica de estas funciones (para el caso del año base) se incorpora posteriormente en la Figura 8.22 (epígrafe 8.3.7.4.c) de manera conjunta con las funciones concernientes a automóviles diésel y a motos y ciclomotores.

<sup>246</sup>  $FC = (a+c \cdot V+e \cdot V^2)/(1+b \cdot V+d \cdot V^2)$ , donde  $FC$  es el consumo de combustible en g/km,  $V$  es la velocidad de circulación en km/h y  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , y  $e$  son coeficientes dependientes de los estándares de emisiones que satisfaga el vehículo y de la cilindrada del motor.

<sup>247</sup>  $a = 1.74 \cdot 10^2$ ;  $b = 6.85 \cdot 10^{-2}$ ;  $c = 3.64 \cdot 10^{-1}$ ;  $d = -2.47 \cdot 10^{-4}$ ;  $e = 8.74 \cdot 10^{-3}$  (el rango de velocidades en el que son válidos fórmula y coeficientes va desde 10 hasta 130 km/h).

<sup>248</sup> <https://www.clh.es/file/EspecificacionesProducto/GASOLINA%2095.pdf> [Último acceso: 11/03/2020]

<sup>249</sup> <https://www.clh.es/file/EspecificacionesProducto/GASOLINA%2098.pdf> [Último acceso: 11/03/2020]

Para el año base

$$FCg^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRFCg_{rik} \mid FCgmin^*_{rijk}, FCgmax^*_{rijk}, FCgmod^*_{rijk} \right) \quad (8.56.a.i)$$

donde:

$$FCgmod^*_{rijk} = \frac{Kga_{FCG} + Kgc_{FCG} \cdot Vm^*_{rijk} + Kge_{FCG} \cdot (Vm^*_{rijk})^2}{1 + Kgb_{FCG} \cdot Vm^*_{rijk} + Kgd_{FCG} \cdot (Vm^*_{rijk})^2} \cdot \frac{1}{750} \quad (8.56.a.ii)$$

$$FCgmin^*_{rijk} = Kgm_{FCG} \cdot FCgmod^*_{rijk} \quad (8.56.a.iii)$$

$$FCgmax^*_{rijk} = Kgm_{FCG} \cdot FCgmod^*_{rijk} \quad (8.56.a.iv)$$

En las ecuaciones 8.56.a.i a 8.56.a.iv, los subíndices  $(r,i,j,k)$  adoptan los mismos valores que fueron indicados previamente para el caso de las ecuaciones 8.55.a.i a 8.55.a.iv (cálculo de  $FCd^*_{rijk}$ ).

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$FCg^s_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRFCg_{rik} \mid FCgmin^s_{ryijk}, FCgmax^s_{ryijk}, FCgmod^s_{ryijk} \right) \quad (8.56.b.i)$$

donde:

$$FCgmod^s_{ryijk} = \frac{Kga_{FCG} + Kgc_{FCG} \cdot Vm^{Cs}_{ryijk} + Kge_{FCG} \cdot (Vm^{Cs}_{ryijk})^2}{1 + Kgb_{FCG} \cdot Vm^{Cs}_{ryijk} + Kgd_{FCG} \cdot (Vm^{Cs}_{ryijk})^2} \cdot \frac{1}{750} \cdot \left( 1 - \frac{y}{Yap} \cdot \frac{fcrgr}{100} \right) \quad (8.56.b.ii)$$

$$FCgmin^s_{ryijk} = Kgm_{FCG} \cdot FCgmod^s_{ryijk} \quad (8.56.b.iii)$$

$$FCgmax^s_{ryijk} = Kgm_{FCG} \cdot FCgmod^s_{ryijk} \quad (8.56.b.iv)$$

Además, los índices  $(r,s,y,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.56.b.i a 8.56.b.iv han de recibir los mismos valores que se señalaron anteriormente en las ecuaciones 8.55.b.i a 8.55.b.iv para el cálculo de la variable  $FCd^s_{ryijk}$ .

**Tabla 8.17.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en automóviles de gasolina ( $FCd$  o  $FCd^*$ ).

	Coeficientes				
<b>Moda</b>	$Kga_{FCG} = 1.74 \cdot 10^2$	$Kgb_{FCG} = 6.85 \cdot 10^{-2}$	$Kgc_{FCG} = 3.64 \cdot 10^{-1}$	$Kgd_{FCG} = -2.47 \cdot 10^{-4}$	$Kge_{FCG} = 8.74 \cdot 10^{-3}$
<b>Mínimo</b>	$Kgm_{FCG} = 0.80$				
<b>Máximo</b>	$Kgm_{FCG} = 1.20$				

### 8.3.7.4.c. Consumo promedio en motos y ciclomotores de gasolina

La variable  $FCm^s_{ryijk}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida por motos y ciclomotores de gasolina en la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , todo ello bajo las condiciones de circulación previstas para esa situación en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación. Su variable equivalente para el caso particular del año base se designa como  $FCm^*_{rijk}$ , donde se omiten, por innecesarios, los índices correspondientes al escenario ( $s$ ) y al año ( $y$ ).

Las unidades de medida empleadas en la formulación del modelo para las variables  $FCm_{ryijk}^s$  y  $FCm_{rijk}^*$  son litros por kilómetro [l/km].

En las simulaciones del modelo los valores de la variable  $FCm_{ryijk}^s$  (o  $FCm_{rijk}^*$  en el año base) se calculan de acuerdo a distribuciones triangulares de probabilidad y en base a la componente aleatoria  $TRFCm_{rik}$ , cuyos valores proceden a su vez de una distribución triangular de partida (mínimo 0, máximo 1 y moda  $\frac{1}{2}$ ) para la cual se generaron en su momento (epígrafe 6.4.5.3.c) las respectivas extracciones. Para poder completar la obtención de valores de  $FCm_{rijk}^*$  y  $FCm_{ryijk}^s$  se requiere ahora establecer la moda, mínimo y máximo de las distribuciones triangulares finales del consumo promedio de combustible en motos y ciclomotores. Además, en la medida de lo posible, las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo han de incorporar la dependencia del consumo de combustible en motos y ciclomotores con respecto a la velocidad de circulación<sup>250</sup>.

Como documento básico de referencia para desarrollar las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo del consumo de combustible en motos y ciclomotores se toma de nuevo la sección de Transporte por Carretera de la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' (EMEP/EEA, 2016). En este sentido, al objeto de representar el consumo promedio atribuido a la alternativa modal formada por vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores conjuntamente), se adopta como base de cálculo una composición formada por un 50% de ciclomotores y otro 50% de motocicletas, en ambos casos con las características específicas que se indicarán a continuación.

En el caso particular de los ciclomotores, el modelo de emisiones de EMEP/EAA (2016: pp. 77-78) no considera una dependencia directa del consumo de combustible —ni del resto de factores de emisiones— con la velocidad de circulación, sino que propone un valor fijo de consumo, para condiciones de circulación propias del tráfico urbano, de 20 g/km (valor común para ciclomotores de hasta 50 cm<sup>3</sup>, con motores de dos o de cuatro tiempos, y estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 o Euro 3). Para poder estimar una dependencia del consumo con la velocidad, se recurre a la comparación con motocicletas de dos tiempos con cilindrada superior a 50 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 o Euro 3. Para las diversas categorías de motocicletas, la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' establece que el consumo de combustible viene dado por un polinomio de quinto grado<sup>251</sup> en función de la velocidad de circulación (EMEP/EEA, 2016: p. 78), con unos coeficientes específicos<sup>252</sup> para cada una de dichas categorías. Por otra parte, se tiene que, en la aplicación del método "Tier 2", el consumo medio de las motocicletas de dos tiempos de cilindrada superior a 50 cm<sup>3</sup> es de 25, 23 y 17 g/km según satisfagan respectivamente los estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 y Euro 3 (EMEP/EEA, 2016: pp. 38-39). Tomando un valor medio de 21.67 g/km, se puede inferir que el consumo de los ciclomotores de las características anteriormente señaladas se situaría en el 92.3% (20/21.67·100%) del correspondiente a motocicletas de dos tiempos con cilindrada superior a 50 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 o Euro 3 (nótese que, para la trasposición de la función velocidad-consumo, se ha seleccionado esta clase de motocicletas por presentar un consumo medio bastante similar al de los ciclomotores). Así pues, en una hipotética curva de consumo —en función de la velocidad— aplicable a ciclomotores, los coeficientes del polinomio de quinto grado serían iguales a los de motocicletas de dos tiempos con cilindrada superior a 50 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 o Euro 3 multiplicados por 0.923.

Por su parte, a efectos de representar el consumo promedio del grupo de motocicletas, se han tomado como referencia motos de cuatro tiempos con cilindrada comprendida entre 250 y 750 cm<sup>3</sup> y cumpli-

<sup>250</sup> Como se verá a continuación, para el caso particular de los ciclomotores (*mopeds*) el modelo de emisiones contenido en la '*Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*' (EMEP/EEA, 2016: pp. 77-78) no establece directamente una dependencia entre consumo y velocidad.

<sup>251</sup>  $FC = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + a_4 \cdot V^4 + a_5 \cdot V^5$ , donde  $FC$  es el consumo de combustible en g/km,  $V$  es la velocidad de circulación en km/h, y  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  y  $a_5$  son coeficientes que dependen del tipo de motor (dos o cuatro tiempos), de la cilindrada y de los estándares de emisiones.

<sup>252</sup> Para el caso mencionado (motocicletas de dos tiempos con cilindrada superior a 50 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 1, Euro 2 o Euro 3) se tienen los siguientes valores:  $a_0 = 8.114 \cdot 10^1$ ;  $a_1 = -3.764$ ;  $a_2 = 1.009 \cdot 10^{-1}$ ;  $a_3 = -1.423 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_4 = 1.062 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_5 = -3.173 \cdot 10^{-8}$  (el rango de validez de estos coeficientes comprende desde 0 a 100 km/h).

miento de los estándares de emisiones Euro 2 o Euro 3 (el consumo de combustible es el mismo para ambos estándares). En este caso el procedimiento es mucho más simple, pues se dispone directamente de una función que liga velocidad y consumo (polinomio de quinto grado) y de los valores específicos de sus coeficientes<sup>253</sup> (EMEP/EEA, 2016: pp. 79-80).

Así pues, la función de cálculo correspondiente a la moda en el caso de vehículos motorizados de dos ruedas adopta genéricamente la forma de un polinomio de quinto grado, el cual constituye el primer factor de las ecuaciones 8.57.a.ii y 8.57.b.ii (donde se toma como variable de entrada la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor, es decir,  $Vm_{rijk}^M$  o  $Vm_{ryijk}^{Ms}$ ). En cuanto a los coeficientes adoptados para el conjunto de estos vehículos, se combinan finalmente (ponderados al 50%, según la composición anteriormente propuesta) los coeficientes particulares de las motocicletas (cuatro tiempos con cilindrada entre 250 y 750 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 2 o Euro 3) y los obtenidos por extrapolación para el caso de ciclomotores. Esta combinación produce como resultado los valores de coeficientes ( $Km0_{FCM}$  a  $Km5_{FCM}$ ) que se presentan en la Tabla 8.18.

El paso siguiente es la conversión del consumo de combustible (gasolina) de unidades de masa (g/km) a unidades de volumen (l/km). Para ello basta con dividir el consumo obtenido inicialmente en unidades de masa entre la densidad de la gasolina, que —tal como se indicó anteriormente— es de 750 g/l.

Los pasos descritos hasta el momento permiten definir la función de cálculo de la moda a aplicar en el caso del año base (ecuación 8.57.a.ii). Adicionalmente, la proyección futura de las funciones de cálculo de consumo de combustible debe incluir un cierto factor de corrección a la baja que tenga en cuenta las mejoras previsibles en la eficiencia energética de estos vehículos. Esta corrección se traduce en la incorporación del factor  $1-(y/Yap) \cdot (fcr_{m_r}/100)$  a la ecuación 8.57.b.ii, donde  $fcr_{m_r}$  (en %) indica el porcentaje de reducción de consumo de combustible por unidad de distancia previsto para el año final del período u horizonte de evaluación —en relación con el consumo del año base— en el caso de motocicletas y ciclomotores (por su parte,  $Yap$  e  $y$  toman los mismos significados que ya fueron señalados con anterioridad para el caso de automóviles diésel). Al igual que con los automóviles (tanto diésel como de gasolina), se ha asumido que la función de reducción de consumo entre el año base y el final del horizonte de evaluación sigue una forma lineal.

Por otra parte, es necesario proponer adicionalmente las expresiones que, en función de la velocidad de circulación, establezcan los valores mínimo y máximo del consumo promedio de combustible de motos y ciclomotores. En este caso se asume que los valores mínimo y máximo sean, respectivamente, un 30% inferiores o superiores a la moda. El rango de variación adoptado para el consumo promedio de motos y ciclomotores es mayor (en términos relativos) que en el caso de automóviles, ya que en el procedimiento de obtención de los coeficientes asignados a la moda ha sido necesario plantear hipótesis adicionales y, además, las diferencias de consumo entre las distintas categorías de vehículos de dos ruedas que puedan incluirse en la composición del parque móvil son mayores —de nuevo en términos relativos— que en el caso de los automóviles ligeros de pasajeros.

De este modo, la obtención de valores para las variables  $FCm_{rijk}^*$  y  $FCm_{ryijk}^s$  queda definida por el conjunto de ecuaciones comprendido entre 8.57.a.i y 8.57.b.iv, donde los valores concretos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo de la moda, mínimo y máximo se incluyen en la Tabla 8.18. Asimismo, estas funciones (para el caso particular del año base) se representan gráficamente en la Figura 8.22, en la que también se han incorporado las funciones homólogas correspondientes a automóviles diésel y a automóviles de gasolina para facilitar la comparación de consumos entre los distintos grupos de vehículos motorizados particulares.

<sup>253</sup> Para motocicletas de cuatro tiempos con cilindrada entre 250 y 750 cm<sup>3</sup> y estándares de emisiones Euro 2 o Euro 3 se tiene:  $a_0 = 8.505 \cdot 10^1$ ;  $a_1 = -3.332$ ;  $a_2 = 7.818 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_3 = -9.138 \cdot 10^{-4}$ ;  $a_4 = 5.408 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_5 = -1.225 \cdot 10^{-8}$  (el intervalo de validez de estos coeficientes comprende desde 0 a 140 km/h).

Para el año base

$$FCm^*_{rijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRFCm_{rik} \mid FCmmin^*_{rijk}, FCmmax^*_{rijk}, FCmmod^*_{rijk} \right) \tag{8.57.a.i}$$

donde:

$$FCmmod^*_{rijk} = \left[ Km0_{FCM} + Km1_{FCM} \cdot Vm^*_{rijk} + Km2_{FCM} \cdot (Vm^*_{rijk})^2 + Km3_{FCM} \cdot (Vm^*_{rijk})^3 + Km4_{FCM} \cdot (Vm^*_{rijk})^4 + Km5_{FCM} \cdot (Vm^*_{rijk})^5 \right] \cdot \frac{1}{750} \tag{8.57.a.ii}$$

$$FCmmin^*_{rijk} = Kmmn_{FCM} \cdot FCmmod^*_{rijk} \tag{8.57.a.iii}$$

$$FCmmax^*_{rijk} = Kmmx_{FCM} \cdot FCmmod^*_{rijk} \tag{8.57.a.iv}$$

Los subíndices  $(r, i, j, k)$  presentes en las ecuaciones 8.57.a.i a 8.57.a.iv han de adoptar los mismos valores que se señalaron para el cálculo de la variable  $FCd^*_{rijk}$  en las ecuaciones 8.55.a.i a 8.55.a.iv.

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3

$$FCm^s_{ryijk} = \text{triang}^{\text{II}} \left( TRFCm_{rik} \mid FCmmin^s_{ryijk}, FCmmax^s_{ryijk}, FCmmod^s_{ryijk} \right) \tag{8.57.b.i}$$

donde:

$$FCmmod^s_{ryijk} = \left[ Km0_{FCM} + Km1_{FCM} \cdot Vm^{Ms}_{ryijk} + Km2_{FCM} \cdot (Vm^{Ms}_{ryijk})^2 + Km3_{FCM} \cdot (Vm^{Ms}_{ryijk})^3 + Km4_{FCM} \cdot (Vm^{Ms}_{ryijk})^4 + Km5_{FCM} \cdot (Vm^{Ms}_{ryijk})^5 \right] \cdot \frac{1}{750} \cdot \left( 1 - \frac{y}{Yap} \cdot \frac{fcr_m_r}{100} \right) \tag{8.57.b.ii}$$

$$FCmmin^s_{ryijk} = Kmmn_{FCM} \cdot FCmmod^s_{ryijk} \tag{8.57.b.iii}$$

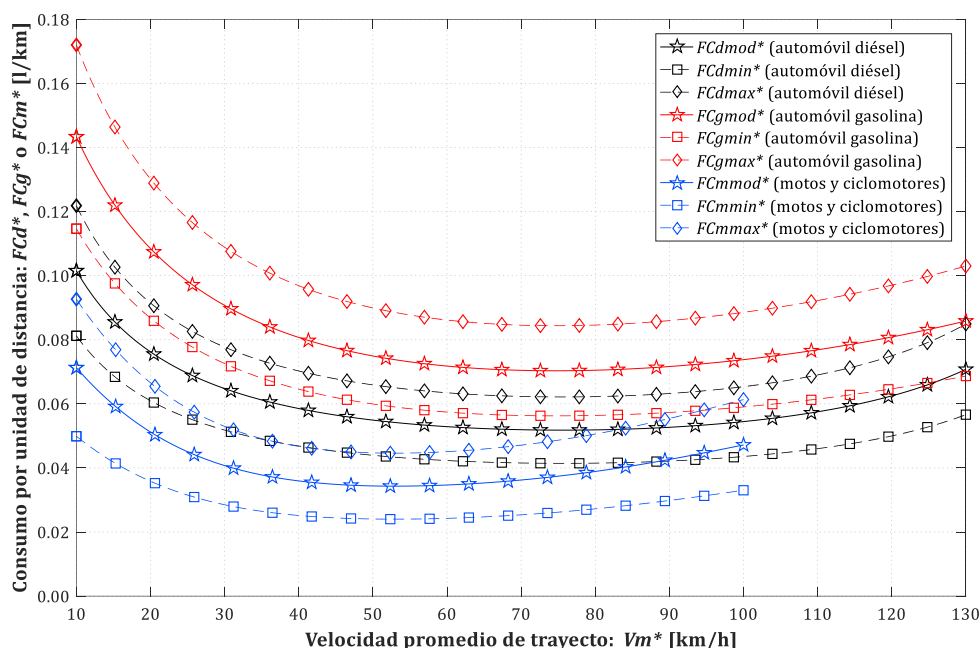
$$FCmmax^s_{ryijk} = Kmmx_{FCM} \cdot FCmmod^s_{ryijk} \tag{8.57.b.iv}$$

Los índices  $(r, s, y, i, j, k)$  contenidos en las ecuaciones 8.57.b.i a 8.57.b.iv deben adoptar los mismos valores que fueron indicados previamente en las ecuaciones 8.55.b.i a 8.55.b.iv para el cálculo de la variable  $FCd^s_{ryijk}$ .

**Tabla 8.18.** Valores numéricos propuestos para los coeficientes de las funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible en motos y ciclomotores ( $FCm$  o  $FCm^*$ ).

	Coeficientes					
<b>Moda</b>	$Km0_{FCM} = 7.9974 \cdot 10^1$	$Km1_{FCM} = -3.4032$	$Km2_{FCM} = 8.5659 \cdot 10^{-2}$	$Km3_{FCM} = -1.1137 \cdot 10^{-3}$	$Km4_{FCM} = 7.6055 \cdot 10^{-6}$	$Km5_{FCM} = -2.0770 \cdot 10^{-8}$
<b>Mínimo</b>	$Kmmn_{FCM} = 0.70$					
<b>Máximo</b>	$Kmmx_{FCM} = 1.30$					





**Figura 8.22.** Funciones de cálculo del mínimo, moda y máximo del consumo medio de combustible (en el año base) para automóviles diésel, para automóviles de gasolina y para motos y ciclomotores, en función de la velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado.

### 8.3.7.5. Variación (a lo largo del tiempo) del coste privado medio generado al viajero por consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) en vehículo motorizado particular

A continuación se ha de proceder a calcular los cambios o variaciones esperadas en la componente del coste privado medio (por viajero) correspondiente al consumo energético —en forma de combustible y/o energía eléctrica— incurrido en los viajes efectuados en transporte motorizado privado, tanto en automóvil particular como en moto o ciclomotor. Se recuerda que dichos cambios o variaciones representan la evolución temporal de dicho coste, calculada entre años consecutivos (módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2 y M-B3) o bien acumulada o totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (caso de los módulos de cálculo M-R1 y M-B1).

#### 8.3.7.5.a. Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste medio de viaje por consumo energético en vehículo motorizado particular

La variable  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$  indica para la simulación aleatoria  $r$  la variación, entre dos años consecutivos (años  $y-1$  e  $y$ ) en el escenario  $s$ , del coste medio de viaje (privado y por persona) ocasionado por el consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) del modo  $m$  de transporte motorizado privado (por tanto, con  $m=C$  o  $m=M$ ), en la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . En el caso particular del primer año del período u horizonte de evaluación ( $y=1$ ), esta variación corresponde a la diferencia entre dicho primer año y el año base, al entenderse este último como el inmediatamente anterior.

La variable  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$  es cuantificada en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

El coste privado medio por viajero debido al consumo de combustible o energía eléctrica en una determinada clase de automóvil privado (diésel, de gasolina o eléctrico) viene dado, para el tramo de

viaje coincidente con el corredor o itinerario transitado por la línea de transporte público y en el marco temporal de un determinado año, por el producto de los siguientes factores:

- El consumo promedio de combustible o energía eléctrica por unidad de distancia recorrida en automóvil particular, el cual viene dado por las variables  $FCD_{rijk}^*$  o  $FCD_{ryijk}^s$  (litros de gasóleo por kilómetro) en el caso de automóviles diésel, por las variables  $FCg_{rijk}^*$  o  $FCg_{ryijk}^s$  (litros de gasolina por kilómetro) para los automóviles de gasolina, o por la variable  $ECC_r$  (kW·h por kilómetro) en el caso de automóviles que utilicen electricidad de la red como fuente externa de alimentación.
- El precio medio de venta al consumidor de la fuente energética que corresponda a cada caso, el cual se representa por las variables  $PRd^*$  o  $PRd_{ry}$  (unidades monetarias por litro de gasóleo) para los vehículos diésel, por las variables  $PRg^*$  o  $PRg_{ry}$  (unidades monetarias por litro de gasolina) en el caso de vehículos de gasolina, o por las variables  $PRE_r^*$  o  $PRE_{ry}$  (unidades monetarias por kW·h) para los vehículos movidos mediante alimentación eléctrica.
- La distancia media recorrida sobre el corredor, eje o itinerario en los viajes en vehículo motorizado privado con un trayecto sensiblemente coincidente con el del transporte público (variable  $Ltpr_{rijk}$ ).
- El inverso de la tasa de ocupación (personas por vehículo) correspondiente a automóvil particular (variables  $OCc_{rijk}^*$  u  $OCc_{ryijk}$ ), para transformar el coste por vehículo a coste por viajero u ocupante.

Finalmente, al objeto de obtener un valor representativo del coste medio por consumo energético atribuible conjuntamente a la opción modal de automóvil particular, se ha de ponderar el coste en cada clase de automóvil por la fracción o proporción del total de vehículos-kilómetro que son recorridos mediante la utilización de cada uno de los tipos básicos de fuentes externas de energía. Estas fracciones están representadas por las variables  $Pcd_r^*$  o  $Pcd_{ry}$  en el caso del combustible diésel, por  $Pcg_r^*$  o  $Pcg_{ry}$  para el uso de gasolina, y por  $Pce_r^*$  o  $Pce_{ry}$  en el caso de alimentación eléctrica externa.

En el caso de los vehículos motorizados de dos ruedas, el procedimiento de obtención del coste privado medio por viajero debido al consumo energético se compone de los mismos tipos de factores que se han indicado para el caso de los automóviles, pero cabe señalar algunas pequeñas particularidades. Por una parte, se omiten todas las variables relativas al combustible diésel, al no ser utilizado este tipo de combustible por las motocicletas y ciclomotores. Por otra parte, se realizan todas las particularizaciones de variables necesarias para esta clase de vehículos. Así, el consumo promedio de combustible o energía eléctrica por unidad de distancia viene dado por las variables  $FCm_{rijk}^*$  o  $FCm_{ryijk}^s$  para motos o ciclomotores de gasolina y por  $ECm_r$  en el caso de motos o ciclomotores eléctricos, mientras que la tasa de ocupación por vehículo en el caso de motos y ciclomotores corresponde a la variable  $OCm_r$  (para la cual, a diferencia del caso de los automóviles, no se ha considerado una posible evolución temporal a lo largo de los años). Por último, la fracción de vehículos-km recorridos en motos y ciclomotores mediante alimentación eléctrica se representa por las variables  $Pme_r^*$  o  $Pme_{ry}$ , mientras que la fracción de vehículos-km en motos y ciclomotores que corresponde a uso de gasolina viene dada por  $Pmg_r^*$  o  $Pmg_{ry}$ .

Por tanto, el cálculo de la variable  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$  consiste finalmente en evaluar el producto de los factores explicados anteriormente, ya sea para automóviles o para motos y ciclomotores, en el año  $y$  y en el año precedente, tomándose la resta o diferencia entre ambos. Este procedimiento da lugar a las ecuaciones 8.58.a a 8.58.d, aplicables de la forma que se indica a continuación.

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2, M-B3 y los años  $Yma_r^R$  e  $Yma_r^B$

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

Para automóvil particular:

$$\Delta Cec_{r1ijk}^{Cs} = \left[ \left( Pcd_{r1} \cdot Fcd_{r1ijk}^s \cdot PRd_{r1} + Pcg_{r1} \cdot FCg_{r1ijk}^s \cdot PRg_{r1} + Pce_{r1} \cdot ECC_r \cdot PRE_{r1} \right) \cdot \frac{1}{OCC_{r1ijk}} - \left( Pcd_r^* \cdot Fcd_{rijk}^* \cdot PRd_r^* + Pcg_r^* \cdot FCg_{rijk}^* \cdot PRg_r^* + Pce_r^* \cdot ECC_r \cdot PRE_r^* \right) \cdot \frac{1}{OCC_{rijk}^*} \right] \cdot Ltpr_{rijk} \quad (8.58.a)$$

Para moto o ciclomotor:

$$\Delta Cec_{r1ijk}^{Ms} = \left[ \left( Pmg_{r1} \cdot Fcm_{r1ijk}^s \cdot PRg_{r1} + Pme_{r1} \cdot ECM_r \cdot PRE_{r1} \right) - \left( Pmg_r^* \cdot Fcm_{rijk}^* \cdot PRg_r^* + Pme_r^* \cdot ECM_r \cdot PRE_r^* \right) \right] \cdot Ltpr_{rijk} \cdot \frac{1}{OCm_r} \quad (8.58.b)$$

Si  $y \neq 1$ :

Para automóvil particular:

$$\Delta Cec_{ryijk}^{Cs} = \left[ \left( Pcd_{ry} \cdot Fcd_{ryijk}^s \cdot PRd_{ry} + Pcg_{ry} \cdot FCg_{ryijk}^s \cdot PRg_{ry} + Pce_{ry} \cdot ECC_r \cdot PRE_{ry} \right) \cdot \frac{1}{OCC_{ryijk}} - \left( Pcd_{r,y-1} \cdot Fcd_{r,y-1,ijk}^s \cdot PRd_{r,y-1} + Pcg_{r,y-1} \cdot FCg_{r,y-1,ijk}^s \cdot PRg_{r,y-1} + Pce_{r,y-1} \cdot ECC_r \cdot PRE_{r,y-1} \right) \cdot \frac{1}{OCC_{r,y-1,ijk}} \right] \cdot Ltpr_{rijk} \quad (8.58.c)$$

Para moto o ciclomotor:

$$\Delta Cec_{ryijk}^{Ms} = \left[ \left( Pmg_{ry} \cdot Fcm_{ryijk}^s \cdot PRg_{ry} + Pme_{ry} \cdot ECM_r \cdot PRE_{ry} \right) - \left( Pmg_{r,y-1} \cdot Fcm_{r,y-1,ijk}^s \cdot PRg_{r,y-1} + Pme_{r,y-1} \cdot ECM_r \cdot PRE_{r,y-1} \right) \right] \cdot Ltpr_{rijk} \cdot \frac{1}{OCm_r} \quad (8.58.d)$$

Respecto a los índices genéricos  $(r,s,y,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.58.a a 8.58.d, procede aplicar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, Yma_r^R, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, Yma_r^B, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Obsérvese que el cómputo de esta variable para el año  $Yma_r^s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ) puede realizarse mediante cálculo directo (sin procedimientos iterativos) tras haber finalizado la ejecución de los módulos de cálculo M-R1 y M-R2 o M-B1 y M-B2, de tal modo que el valor de índice  $y=Yma_r^s$  no queda incluido en ninguno de los módulos iterativos de cálculo.

**8.3.7.5.b. Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, en el coste medio de viaje por consumo energético en vehículo motorizado particular**

La variable  $\Omega Cec_{rijik}^{ms}$  representa, dada la simulación aleatoria  $r$ , la variación —totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en el escenario  $s$  (con  $s \neq 0$ )— experimentada en el coste medio de viaje ocasionado por el consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) del modo  $m$  de transporte motorizado privado (con  $m=C$  o  $m=M$ ), para la etapa o tramo de viaje que utilice el vial o viales de circulación coincidentes con el corredor, eje o itinerario transitado por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Se recuerda que, en una determinada simulación aleatoria y para un cierto escenario  $s=R$  o  $s=B$ , la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público sobre plataforma reservada abarca desde el año  $Yimp_r^s + 1$  (primer año perteneciente a esta fase) hasta el año  $Yma_r^s - 1$  (último año incluido en dicha etapa).

Análogamente a la variable  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$ , para expresar en el modelo el valor de  $\Omega Cec_{rijik}^{ms}$  se utilizan unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

El esquema general de cálculo para la variable  $\Omega Cec_{rijik}^{ms}$  es equivalente al utilizado anteriormente para  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$  (tanto para el caso de automóviles como para motos y ciclomotores), ya que el coste medio por viajero debido al consumo energético se configura a partir de los mismos factores que se detallaron en el epígrafe 8.3.7.5.a. No obstante, la valoración de dicho coste debe efectuarse en este caso para el primer año de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público (año  $Yma_r^s$ ), comparándolo —por resta o diferencia— con el coste calculado para el último año previo a la puesta en servicio del nuevo modo de transporte público (año  $Yimp_r^s$ ). Los años contenidos interiormente entre estos dos extremos constituyen precisamente la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio.

Por tanto, la obtención de la variable  $\Omega Cec_{rijik}^{ms}$  queda determinada por las ecuaciones 8.59.a y 8.59.b para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1, siendo estos los únicos para los que la obtención de dicha variable resulta aplicable.

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

En el caso del automóvil particular:

$$\begin{aligned} \Omega Cec_{rijik}^{Cs} = & \left[ \left( Pcd_{r,Yma_r^s} \cdot Fcd_{r,Yma_r^s,ijk}^s \cdot PRd_{r,Yma_r^s} + Pcg_{r,Yma_r^s} \cdot Fcg_{r,Yma_r^s,ijk}^s \cdot PRg_{r,Yma_r^s} + \right. \right. \\ & \left. \left. + Pce_{r,Yma_r^s} \cdot ECC_r \cdot PRE_{r,Yma_r^s} \right) \cdot \frac{1}{OCc_{r,Yma_r^s,ijk}} - \left( Pcd_{r,Yimp_r^s} \cdot Fcd_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \cdot PRd_{r,Yimp_r^s} + \right. \right. \\ & \left. \left. + Pcg_{r,Yimp_r^s} \cdot Fcg_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \cdot PRg_{r,Yimp_r^s} + Pce_{r,Yimp_r^s} \cdot ECC_r \cdot PRE_{r,Yimp_r^s} \right) \cdot \frac{1}{OCc_{r,Yimp_r^s,ijk}} \right] \cdot \\ & \cdot Ltpr_{rijik} \end{aligned} \tag{8.59.a}$$

En el caso de moto o ciclomotor:

$$\begin{aligned} \Omega Cec_{rijik}^{Ms} = & \left[ \left( Pmg_{r,Yma_r^s} \cdot Fcm_{r,Yma_r^s,ijk}^s \cdot PRg_{r,Yma_r^s} + Pme_{r,Yma_r^s} \cdot ECM_r \cdot PRE_{r,Yma_r^s} \right) - \left( Pmg_{r,Yimp_r^s} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot Fcm_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \cdot PRg_{r,Yimp_r^s} + Pme_{r,Yimp_r^s} \cdot ECM_r \cdot PRE_{r,Yimp_r^s} \right) \right] \cdot Ltpr_{rijik} \cdot \frac{1}{OCm_r} \end{aligned} \tag{8.59.b}$$

Los índices genéricos  $(r,s,i,j,k)$  adoptan en este par de ecuaciones (8.59.a y 8.59.b) los valores indicados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.3.8. Variación (a lo largo del tiempo) del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las opciones modales de transporte

En la presente sección del modelo se cuantifica el total de las variaciones que, a lo largo del tiempo, se producirían en el coste o precio generalizado de viaje medio en cada una de las opciones modales de transporte consideradas en la modelización, determinándose este cambio o variación tanto entre años consecutivos como de forma acumulada o totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (según los requerimientos particulares de cada módulo de cálculo).

#### 8.3.8.1. Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las distintas opciones modales de transporte

La variable  $\Delta GC_{ryijk}^{ms}$  indica para la simulación aleatoria  $r$  la variación, entre dos años consecutivos (años  $y-1$  e  $y$ ) en el escenario  $s$ , del coste o precio generalizado medio afrontado por los usuarios de la opción modal  $m$  de transporte, para los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Para el caso singular del primer año del período u horizonte de evaluación ( $y=1$ ), esta variación corresponde a la diferencia entre dicho primer año y el año base, al ser este último el inmediatamente anterior al inicio del período de evaluación.

Consecuentemente, la cuantificación de la variable  $\Delta GC_{ryijk}^{ms}$  se realiza en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

En el caso de las opciones de transporte público, es posible obtener la variable  $\Delta GC_{ryijk}^{ms}$  simplemente como la diferencia o resta, entre los sucesivos pares de años consecutivos, de las medidas de coste generalizado medio (variables  $GC_{ryijk}^{ms}$  o  $GC_{ryijk}^*$ ) que habían sido previamente calculadas (véase epígrafe 8.3.6). Este procedimiento se plasma en las ecuaciones 8.60.a.i a 8.60.a.iv. De forma singular, debe tenerse en cuenta que en el primer año de puesta en servicio de los nuevos sistemas de transporte público en plataforma reservada ( $y=Yimp_s^s+1$ ) la diferencia se evalúa entre el nuevo modo (metro ligero/tranvía o BHLS/BRT) y el todavía existente en el año inmediatamente anterior (autobús convencional en tráfico mixto).

Por su parte, para los modos de transporte motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor) se obtiene la variación del coste o precio generalizado de viaje medio mediante la adición de los cambios o variaciones parciales experimentadas en las siguientes componentes del coste:

- La variación entre años consecutivos del coste medio generado al viajero por el tiempo de viaje transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado, incluyendo posibles incrementos por congestión viaria (variable  $\Delta Ctm_{ryijk}^{ms}$ ).
- La variación entre años consecutivos del coste medio generado al viajero por irregularidad, variabilidad o incertidumbre (falta de fiabilidad o predictibilidad) del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado (variable  $\Delta C\sigma_{ryijk}^{ms}$ ).
- La variación entre años consecutivos del coste privado medio ocasionado al viajero por el consumo energético (combustible y/o energía eléctrica) en vehículo motorizado particular (variable  $\Delta Cec_{ryijk}^{ms}$ ).
- La variación entre años consecutivos de otros costes modales de viaje aplicados exógenamente (desde el punto de vista de las capacidades de análisis del modelo) a la utilización de cada uno de estos modos de transporte motorizado privado (variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  para automóviles particulares y motos o ciclomotores). Entre este tipo de costes se podrían destacar los precios de aparcamiento,

posible peajes, restricciones adicionales al uso del automóvil, etc. Por tanto se trata fundamentalmente de costes asociados a las futuras políticas de transporte urbano y movilidad.

La suma de todas estas variaciones parciales da lugar, en el caso de los modos de transporte motorizado privado, a la ecuación 8.60.b.

Finalmente, para los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’ (bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal, y modo peatonal) se consideran únicamente las variaciones previstas en los costes de la alternativa producidas por acciones externas al propio modelo (variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  para viajes peatonales y en bicicleta o vehículo de movilidad personal). Por ejemplo, la creación en un año determinado del período u horizonte de evaluación de carriles-bici en el entorno de los corredores o itinerarios analizados daría lugar, previsiblemente, a una disminución relativa del coste generalizado de la opción de bicicleta o vehículo de movilidad personal. Análogamente, la implantación de recorridos de preferencia peatonal redundaría en una reducción relativa del coste generalizado asociado a los desplazamientos peatonales. De la misma forma, la posible puesta en práctica de medidas de calmado del tráfico contribuiría a reducir el coste generalizado percibido por los usuarios de estas dos alternativas modales. Por tanto, se trata nuevamente de efectos vinculados en su mayor parte a las políticas de movilidad desarrolladas por las administraciones públicas o autoridades competentes. Además, la cuantificación de estos efectos en términos de costes resulta en general notablemente compleja (fuera del objeto de estudio de esta tesis).

En conclusión, los procedimientos de cálculo de la variable  $\Delta GC_{ryijk}^{ms}$  quedan compendiados en el conjunto de ecuaciones incluido a continuación.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2, M-B3 y los años  $Yma_r^R$  e  $Yma_r^B$**

Para cualquiera de los modos de transporte público (si  $m=0 \vee m=R \vee m=B$ ):

si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$\Delta GC_{r1ijk}^{ms} = GC_{r1ijk}^{ms} - GC_{rijk}^* \quad (8.60.a.i)$$

si  $s=R \wedge y=Yimp_r^R+1$  (solo afecta al módulo M-R2):

$$\Delta GC_{r,Yimp_r^R+1,ijk}^{RR} = GC_{r,Yimp_r^R+1,ijk}^{RR} - GC_{r,Yimp_r^R,ijk}^{OR} \quad (8.60.a.ii)$$

si  $s=B \wedge y=Yimp_r^B+1$  (solo afecta al módulo M-B2):

$$\Delta GC_{r,Yimp_r^B+1,ijk}^{BB} = GC_{r,Yimp_r^B+1,ijk}^{BB} - GC_{r,Yimp_r^B,ijk}^{OB} \quad (8.60.a.iii)$$

en todos los demás casos se aplica la siguiente fórmula general:

si  $(s=0 \wedge y \neq 1) \vee (s=R \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^R+1) \vee (s=B \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^B+1)$ :

$$\Delta GC_{ryijk}^{ms} = GC_{ryijk}^{ms} - GC_{r,y-1,ijk}^{ms} \quad (8.60.a.iv)$$

Para los modos de transporte motorizado privado (si  $m=C \vee m=M$ ):

$$\Delta GC_{ryijk}^{ms} = \Delta Ctm_{ryijk}^{ms} + \Delta C\sigma t_{ryijk}^{ms} + \Delta Cec_{ryijk}^{ms} + \Delta Cex_{ryijk}^m \quad (8.60.b)$$

Para los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’ (si  $m=V \vee m=P$ ):

$$\Delta GC_{ryijk}^{ms} = \Delta Cex_{ryijk}^m \quad (8.60.c)$$

Para el conjunto de ecuaciones comprendido entre 8.60.a.i y 8.60.c, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en las mismas adoptan las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, Yma_r^R, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, Yma_r^B, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Para esta variable, el cómputo perteneciente al año  $Yma_r^s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ) no se encuadra en ninguno de los módulos iterativos de cálculo, ya que la obtención del valor de  $\Delta GC_{ryjk}^{ms}$  correspondiente a dicho año puede ser efectuada de forma directa (sin procedimientos iterativos) una vez se haya finalizado la ejecución de los módulos M-R1 y M-R2 o M-B1 y M-B2.

### 8.3.8.2. Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste (o precio) generalizado de viaje medio en las distintas opciones modales de transporte

La variable  $\Omega GC_{rijk}^{ms}$  representa, dada la simulación aleatoria  $r$ , la variación —totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en el escenario  $s$  (con  $s \neq 0$ )— experimentada en el coste o precio generalizado medio afrontado por los usuarios de la opción modal  $m$  de transporte, para los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Recuérdese que, en una determinada simulación aleatoria y para un cierto escenario  $s=R$  o  $s=B$ , la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público sobre plataforma reservada comprende desde el año  $Yimp_r^s + 1$  (primer año incluido en esta fase) hasta el año  $Yma_r^s - 1$  (último año perteneciente a dicha etapa).

Al igual que en el caso de la variable  $\Delta GC_{ryjk}^{ms}$ , el valor de  $\Omega GC_{rijk}^{ms}$  se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

La estructura general de cálculo para la determinación de la variable  $\Omega GC_{rijk}^{ms}$  es similar a la empleada previamente para la obtención de  $\Delta GC_{ryjk}^{ms}$ , ya sea para el caso de los modos de transporte público, para los modos de transporte motorizado privado o para los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’.

Para las opciones de transporte público, la única diferencia consiste en que la evaluación de la variación en el coste generalizado medio (variable  $GC_{ryjk}^{ms}$ ) ha de efectuarse por diferencia o resta entre los valores obtenidos para el primer año de la etapa de madurez del nuevo servicio de transporte público (año  $Yma_r^s$ ) y el último año previo a su entrada en servicio (año  $Yimp_r^s$ ), en lugar de entre dos años consecutivos. Esto implica, por tanto, que dicha diferencia se evalúe siempre entre el nuevo modo de transporte público (metro ligero o tranvía, o BHLS/BRT) y el preexistente (autobús convencional en tráfico mixto).

En el caso de los modos de transporte motorizado privado, se obtiene la variable  $\Omega GC_{rijk}^{ms}$  sumando las diferencias totalizadas o acumuladas a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público para las componentes del coste generalizado correspondientes a tiempo de viaje a bordo del vehículo motorizado privado ( $\Omega Ctm_{rijk}^{ms}$ ), a las carencias de fiabilidad o predictibili-

dad del tiempo de trayecto ( $\Omega C\sigma t_{rijk}^{ms}$ ) y al consumo energético ( $\Omega Cec_{rijk}^{ms}$ ). A todo ello se debe añadir la suma (entre  $Yimp_r^s+1$  e  $Yma_r^s$ ) de las variaciones interanuales pronosticadas para otros costes de viaje aplicados exógenamente sobre el uso de cada uno de los modos de transporte motorizado privado (variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  para automóviles particulares y motos o ciclomotores).

Por último, para los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’ (peatonal y bicicleta o vehículo de movilidad personal) se ha de efectuar únicamente la suma entre  $Yimp_r^s+1$  e  $Yma_r^s$  de las variaciones interanuales previstas en los costes de viaje de dichas alternativas generadas a consecuencia de acciones externas al propio modelo (variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$  para viajes peatonales y en bicicleta o vehículo de movilidad personal).

Por tanto, la obtención de la variable  $\Omega GC_{rijk}^{ms}$  en los módulos de cálculo M-R1 y M-B1 (únicos para los que el cómputo de dicha variable resulta aplicable) queda especificada mediante el siguiente grupo de ecuaciones.

### Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1

Para los modos de transporte público (si  $m=R \vee m=B$ ):

$$\Omega GC_{rijk}^{ms} = GC_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} - GC_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \quad (8.61.a)$$

Para los modos de transporte motorizado privado (si  $m=C \vee m=M$ ):

$$\Omega GC_{rijk}^{ms} = \Omega Ctm_{rijk}^{ms} + \Omega C\sigma t_{rijk}^{ms} + \Omega Cec_{rijk}^{ms} + \sum_{y=Yimp_r^s+1}^{Yma_r^s} \Delta Cex_{ryijk}^m \quad (8.61.b)$$

Para los modos no motorizados y de ‘micromovilidad’ (si  $m=V \vee m=P$ ):

$$\Omega GC_{rijk}^{ms} = \sum_{y=Yimp_r^s+1}^{Yma_r^s} \Delta Cex_{ryijk}^m \quad (8.61.c)$$

Los índices  $(r,s,m,i,j,k)$  contenidos en las ecuaciones 8.61.a a 8.61.c han de tomar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; m \in \begin{cases} \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

## 8.3.9. Reparto modal

### 8.3.9.1. Cuota de reparto modal no cautivo para cada alternativa de transporte

La variable  $MP_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la cuota de reparto modal no cautivo (es decir, referida únicamente al subconjunto de viajes realizados por viajeros con capacidad efectiva para elegir cualquiera de las opciones modales) que correspondería al modo  $m$  de transporte en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación dado el escenario  $s$ , para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

De acuerdo a su definición y significado, se trata de una variable de tipo adimensional.

El cálculo de las cuotas de reparto modal en un determinado año del horizonte o período de evaluación se establece —con la excepción, como se verá posteriormente, de los modos de transporte público



durante los módulos de cálculo M-R2 y M-B2— en base a aplicar formulaciones incrementales que dan lugar a métodos de pivoteo (*pivot-point*), tal como se había descrito en el epígrafe 4.3.1.

Dentro de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R3, M-B0 y M-B3, la variable  $MP_{ryjk}^{ms}$  en un año  $y$  se calcula simplemente por aplicación de la forma incremental de la formulación tipo logit utilizada para la modelización del reparto modal no cautivo (véase ecuación 4.9.c), la cual ha de ser convenientemente particularizada para las variables empleadas en la construcción del modelo. El estado inicial u original del sistema, en torno al cual se pivota, se define, para cada año  $y$ , por las cuotas de reparto modal no cautivo en el año precedente ( $y-1$  en general; el año base si  $y=1$ ), las cuales se ven modificadas en función de las respectivas variaciones (entre  $y-1$  e  $y$ , o entre el año base e  $y=1$ ) en el coste generalizado de las alternativas modales (variable  $\Delta GC_{ryjk}^{ms}$ ). Se configuran de este modo las ecuaciones 8.62.a.i y 8.62.a.ii.

En el caso de los módulos de cálculo M-R1 y M-B1 (ecuaciones 8.62.b.i y 8.62.b.ii), los fundamentos teóricos básicos puestos en práctica para el cálculo de las cuotas de reparto modal no cautivo correspondientes al primer año de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público (año  $Yma_r^s$ ) son análogos a los de los módulos arriba descritos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en este caso se toma como estado original del sistema el obtenido para el último año previo a la puesta en servicio del nuevo modo de transporte público (año  $Yimp_r^s$ ). Por ello, para el cálculo de las cuotas de reparto modal no cautivo de los nuevos modos de transporte público (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) en el año  $Yma_r^s$  se adopta como referencia de partida la cuota de reparto modal (no cautivo) de la opción de transporte público que estaba disponible hasta el año  $Yimp_r^s$ , materializada en forma de autobús convencional en tráfico mixto. Paralelamente, las variaciones en el coste generalizado de las alternativas modales que se han de aplicar en este caso deben ser las totalizadas o acumuladas a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público (variable  $\Omega GC_{ryjk}^{ms}$ ).

Por su parte, en los módulos de cálculo M-R2 y M-B2 (fase de introducción y consolidación de los nuevos modos de transporte público) se distinguen dos casos diferenciados:

- Para las opciones de transporte público, sus cuotas de reparto modal no cautivo se asignan de tal forma que la variación total de las mismas existente entre los años  $Yimp_r^s$  e  $Yma_r^s$  (calculada previamente gracias a los módulos M-R1 o M-B1) se distribuye progresivamente a lo largo del tiempo (entre los años comprendidos dentro de la fase de introducción y consolidación) según una curva de enlace que une gradualmente los puntos situados en los extremos de dicha fase. La forma general de esta función de enlace se ha definido de tal modo que el valor absoluto de su pendiente (celeridad del cambio modal) disminuye con el transcurso de los años, mientras que la forma particular de esta evolución —de carácter aleatorio— viene dada por los sucesivos valores (crecientes, con pendiente decreciente, y comprendidos siempre entre 0 y 1) que la variable  $psp_{ry}^s$  toma a lo largo de los años que transcurren entre  $Yimp_r^s+1$  e  $Yma_r^s-1$ . Se da así lugar a la ecuación 8.62.c.i, donde se recuerda que los valores de la variable auxiliar  $psp_{ry}^s$  han sido obtenidos antes de iniciar los módulos iterativos de cálculo (véase epígrafe 7.11.1), al no depender de los resultados de estos sino solamente de valores aleatorios extraídos previamente de una distribución uniforme estándar.
- La expresión matemática que se indica para las restantes opciones modales de transporte (ecuación 8.62.c.ii) proviene de aplicarles de manera parcial (es decir, excluyendo el modo de transporte público) la forma incremental de la formulación de reparto modal no cautivo, en función de las variaciones en los costes generalizados de las alternativas. A las cuotas de reparto modal no cautivo que se obtendrían restringidamente sobre el subconjunto de modos de transporte privado o individual ( $A'=\{C,M,V,P\}$ ), que vendrían dadas por el segundo factor en la ecuación 8.62.c.ii, ha de aplicárseles el factor correspondiente a la fracción que este subconjunto de modos representan sobre el total, la cual es simplemente igual a 1 menos la cuota de reparto modal no cautivo asignada al transporte público (obtenida previamente según el párrafo anterior).

Por consiguiente, la obtención de las cuotas de reparto modal no cautivo  $MP_{ryjk}^{ms}$  se rige, para los distintos módulos de cálculo, por los grupos de ecuaciones que se presentan a continuación.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R3, M-B0 y M-B3**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$MP_{r1ijk}^{ms} = \frac{MP_{ijk}^{*m} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{r1ijk}^{ms})}{\sum_{n \in A} MP_{ijk}^{*n} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{r1ijk}^{ns})} \quad (8.62.a.i)$$

En todos los demás casos ( $y \neq 1$ ):

$$MP_{ryijk}^{ms} = \frac{MP_{r,y-1,ijk}^{ms} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{ryijk}^{ms})}{\sum_{n \in A} MP_{r,y-1,ijk}^{ns} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{ryijk}^{ns})} \quad (8.62.a.ii)$$

Los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  contenidos en las ecuaciones 8.62.a.i y 8.62.a.ii, así como los elementos  $n$  del conjunto  $A$  de alternativas modales, adoptan los valores que se indican a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yma_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yma_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ; A = \left\{ \begin{array}{l} = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yma_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yma_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

Para los modos de transporte público (si  $m=R \vee m=B$ ):

$$MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} = \frac{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ms})}{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ms}) + \sum_{n \in A'} MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ns})} \quad (8.62.b.i)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} = \frac{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ms} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ms})}{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ss}) + \sum_{n \in A'} MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Omega GC_{rijk}^{ns})} \quad (8.62.b.ii)$$

siendo en ambas ecuaciones  $A' = \{C, M, V, P\}$ .

Por su parte, los índices  $(r,s,m,i,j,k)$  de las ecuaciones 8.62.b.i y 8.62.b.ii deben tomar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; m \in \begin{cases} \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-R2 y M-B2**

Para los modos de transporte público (si  $m=R \vee m=B$ ) se impone:

$$MP_{ryjk}^{ms} = MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} + psp_{ry}^s \cdot (MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} - MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s}) \quad (8.62.c.i)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ) se calcula:

$$MP_{ryjk}^{ms} = (1 - MP_{ryjk}^{ss}) \cdot \frac{MP_{r,y-1,ijk}^{ms} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{ryijk}^{ms})}{\sum_{n \in A'} MP_{r,y-1,ijk}^{ns} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta GC_{ryijk}^{ns})} \quad (8.62.c.ii)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$ .

Por su parte, los índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$  incluidos en las ecuaciones 8.62.c.i y 8.62.c.ii han de adoptar los valores siguientes:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; y = \begin{cases} = \{Yimp_r^R + 1, Yimp_r^R + 2, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2} & \text{si } s = R \\ = \{Yimp_r^B + 1, Yimp_r^B + 2, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m \in \begin{cases} \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \end{cases} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**8.3.9.2. Cuota de reparto modal general para cada alternativa de transporte**

La variable  $MS_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , la cuota de reparto modal general (es decir, relativa al volumen total de viajes efectuados tanto por viajeros cautivos de alguna opción modal como por no cautivos) que correspondería al modo  $m$  de transporte en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación dado el escenario  $s$ , para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

La variable  $MS_{ryijk}^{ms}$ , al igual que  $MP_{ryijk}^{ms}$ , es de tipo adimensional.

Las cuotas de reparto modal general se definen como las fracciones o proporciones de viajes efectuados en cada modo de transporte, contabilizadas sobre el volumen total de viajes realizados en las modalidades contempladas (transporte público mediante el tipo de sistema que corresponda a cada caso, automóvil particular, moto o ciclomotor, bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viajes a pie), independientemente de que el sujeto del viaje pueda ser considerado como un viajero cautivo de alguna opción modal o como un individuo con capacidad efectiva de elección entre cualquiera de las alternativas (no cautivo).

De acuerdo al planteamiento básico sintetizado en la ecuación 4.5 (o paralelamente en la 4.10 de forma incremental), la cuota de reparto modal general para un determinado modo de transporte vendrá dada, en el modelo, por la suma de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de dicho modo (variables  $Pcp_{ryijk}$  o  $Pco_{ryijk}^m$ ), más la fracción o proporción resultante de aplicar la cuota de reparto modal no cautivo de la opción modal en cuestión (variable  $MP_{ryijk}^{ms}$ ) sobre la parte del total de viajes que son realizados por viajeros con capacidad de elección entre cualquiera de las alternativas. Esta última corresponde en el modelo a 1 menos la suma de todas las fracciones o proporciones del volumen total de viajes que son atribuibles a desplazamientos realizados por usuarios cautivos de alguno de los modos de transporte.

Así pues, el cálculo de la variable  $MS_{ryijk}^{ms}$  está reglado por las ecuaciones 8.63.a y 8.63.b, presentadas a continuación.

**Para cualquiera de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Para cualquiera de los modos de transporte público (si  $m=0 \vee m=R \vee m=B$ ):

$$MS_{ryijk}^{ms} = Pcp_{ryijk} + \left( 1 - Pcp_{ryijk} - \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n \right) \cdot MP_{ryijk}^{ms} \quad (8.63.a)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MS_{ryijk}^{ms} = Pco_{ryijk}^m + \left( 1 - Pcp_{ryijk} - \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n \right) \cdot MP_{ryijk}^{ms} \quad (8.63.b)$$

siendo en ambas ecuaciones  $A' = \{C, M, V, P\}$ .

Además, en esta pareja de ecuaciones (8.63.a y 8.63.b) los índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$  presentes en las mismas deben adoptar las combinaciones de valores indicadas a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

**8.3.9.3. Proporción de viajes correspondientes a usuarios cautivos del transporte público sobre el total de viajes efectuados en dicha modalidad de transporte**

La variable  $CTR_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la fracción o proporción de viajes efectuados en transporte público por parte de usuarios cautivos del mismo con respecto al volumen general de desplazamientos realizados en el modo  $m$  de transporte público existente en el escenario  $s$  en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación, para el caso de los viajes llevados a cabo en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

Se trata nuevamente de una variable de tipo adimensional.

El cálculo de la variable  $CTR_{ryijk}^{ms}$  puede efectuarse simplemente dividiendo la fracción o proporción que, sobre el volumen total de viajes llevados a cabo en cualquiera de las opciones modales, correspondería a viajes realizados en transporte público por usuarios cautivos del mismo (variable  $Pcp_{ryijk}$  en el modelo) entre la cuota de reparto modal general obtenida por el respectivo modo de transporte público (variable

$MS_{ryijk}^{ms}$  para autobús convencional, tranvía o metro ligero, o BHLS/BRT). Se da así lugar a la ecuación 8.64, la cual es aplicable en cualquiera de los módulos de cálculo <sup>254</sup>.

**Para cualquiera de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

$$CTR_{ryijk}^{ms} = \frac{Pcp_{ryijk}}{MS_{ryijk}^{ms}} = \frac{Pcp_{ryijk}}{Pcp_{ryijk} + \left(1 - Pcp_{ryijk} - \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n\right) \cdot MP_{ryijk}^{ms}} \quad (8.64)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  y con las siguientes combinaciones de índices  $(r, s, y, m, i, j, k)$ :

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.3.10. Variación (a lo largo del tiempo) del coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) en cada escenario

La presente sección del modelo está destinada a calcular las variaciones que, a lo largo del período u horizonte de evaluación, tendrían lugar en el coste compuesto de viaje (*composite cost*) asociado al conjunto de opciones modales de transporte existentes en cada escenario y en cada año, dada una determinada evolución de la segmentación del conjunto total de viajeros en cuanto a su disponibilidad de alternativas factibles.

Supuesta una cierta relación origen-destino y un determinado segmento o categoría de viajeros, el coste compuesto de viaje se puede interpretar, en general, como un indicador de la dificultad de acceso a la zona de destino desde la zona de origen (sería por tanto una medida de accesibilidad, pero en sentido negativo). Más concretamente, el coste compuesto constituye una medida de la desutilidad (cuantificada en este caso en términos monetarios) asociada a todo un determinado conjunto de opciones o alternativas modales disponibles (cada una de ellas, a su vez, con su propia desutilidad o coste generalizado). Por tanto, representa también una medida opuesta a la 'deseabilidad' o atractivo integral de un conjunto de elección y, en este sentido, permite comparar lo favorable o desfavorable que resulta para el potencial viajero un conjunto de alternativas modales de elección con respecto a otros. Similarmente, proporciona además una forma de evaluar un mismo conjunto de alternativas nominales bajo condiciones o circunstancias distintas, que por tanto llevan aparajadas desutilidades o costes generalizados de cada alternativa diferentes en una u otra situación. Por otra parte, la expresión de

<sup>254</sup> Estrictamente, el cálculo de esta variable puede ser extraído fuera de los correspondientes bucles iterativos (puesto que no influye en ningún otro cálculo realizado dentro de dichos bucles), ejecutándose en ese caso con posterioridad a la finalización de los respectivos ciclos iterativos (empleando por tanto los resultados finales del reparto modal). No obstante, se ha incorporado en esta parte del capítulo en favor de la continuidad expositiva.

cálculo del coste compuesto (véase ecuación 4.2) equivale a la esperanza matemática del mínimo coste generalizado de viaje percibido por los individuos de un determinado segmento o categoría ante su respectivo conjunto de alternativas disponibles, dada la dispersión existente entre las elecciones de dichos individuos. Esta esperanza matemática o coste compuesto es siempre menor o igual que el mínimo de los costes generalizados de las distintas opciones o alternativas que se incluyen en el conjunto de elección, puesto que la dispersión o variabilidad existente dentro de una determinada categoría o segmento permite que ciertos viajeros puedan elegir opciones que desde la perspectiva del analista no minimizarían la parte observada o aparente de la función de coste generalizado, pero que sin embargo resultan más ventajosas para el individuo y el viaje en cuestión, percibiendo de ellas menor desutilidad.

En relación con las características particulares del modelo desarrollado en la presente tesis, se ha de tener en cuenta que se emplea para todo el conjunto de viajes de una misma tipología (itinerario, período horario, sentido, etc.) un único valor medio o agregado del coste compuesto, aunque el conjunto total de viajes deba haber sido segmentado, en cuanto a la disponibilidad de alternativas modales, entre aquellos efectuados por usuarios cautivos de algún modo de transporte en concreto y aquellos otros que se realizan por viajeros con posibilidad de elección entre el conjunto completo de opciones modales (viajeros no cautivos de ninguna alternativa). Este valor medio, al que se ha denominado coste compuesto promediado o ponderado, condensa —de forma ponderada— los distintos costes compuestos que serían percibidos por los individuos pertenecientes a cada uno de los grupos o categorías en los que han sido segmentados los viajeros en función de su conjunto de opciones modales realmente disponibles, tal como quedó reflejado en las ecuaciones 4.7.a y 4.7.b.

Así pues, a continuación se procederá a calcular la evolución prevista a lo largo del tiempo de dicho coste compuesto promediado o ponderado en cada uno de los escenarios, computando las variaciones existentes tanto entre años consecutivos como de forma acumulada o totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público, según los requerimientos particulares de cada módulo de cálculo.

### 8.3.10.1. Variación entre años consecutivos ( $y-1$ e $y$ ) del coste compuesto promediado o ponderado

La variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$  indica para la simulación aleatoria  $r$  la variación, entre dos años consecutivos (años  $y-1$  e  $y$ ), del coste compuesto de viaje (promediado o ponderado según las fracciones del volumen total de viajes atribuibles a usuarios cautivos de cada modo de transporte y a viajeros no cautivos de ninguna opción) en el escenario  $s$ , para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Singularmente, en el primer año del período de evaluación ( $y=1$ ), esta variación corresponde a la diferencia entre dicho primer año y el año base, al entenderse este último como el inmediatamente anterior.

La variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$  se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

En general, el cálculo de las variaciones en el coste compuesto ponderado se guía en el tipo de modelo desarrollado por la formulación reflejada en la ecuación 4.27.a, tomándose en lo sucesivo como opción modal de referencia (designada con el subíndice  $a$  en la citada ecuación) la correspondiente al modo de transporte público que esté en servicio en cada escenario y año (nótese que esta elección es en realidad arbitraria, ya que habría sido válida la adopción de cualquier otra alternativa). En base por tanto a la ecuación 4.27.a se desarrollan para el cálculo en el modelo de la variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$  las ecuaciones 8.65.a a 8.65.c, considerando para ello cada año sucesivamente analizado ( $y$ ) como estado modificado o alterado del sistema, con el año precedente ( $y-1$  en general; el año base si  $y=1$ ) como estado inicial u original, así como adaptando convenientemente la notación simplificada de la ecuación 4.27.a a las variables utilizadas para el desarrollo efectivo del modelo. Además, debe tenerse en cuenta, como caso singular, que para el primer año de puesta en servicio de los nuevos sistemas de transporte público en plataforma

reservada (es decir,  $y=Yimp_r^s+1$  en los escenarios 'R' y 'B') se produce un cambio en el modo en el que se hace efectiva la opción genérica de transporte público (metro ligero o tranvía, o BHLS/BRT, frente a autobús convencional en tráfico mixto en el año precedente). Esta particularidad da lugar a la ecuación 8.65.b.

En resumen, el cálculo de la variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$  se rige en el modelo por el conjunto de ecuaciones que se indican a continuación.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2, M-B3 y los años  $Yma_r^R$  e  $Yma_r^B$**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$\Delta Kw_{r1ijk}^s = \Delta GC_{r1ijk}^{ms} - \frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r1ijk} \cdot \ln MP_{r1ijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r1ijk}^n \cdot \ln MP_{r1ijk}^{ns} - Pcp_{ijk}^* \cdot \ln MP_{ijk}^{*0} - \sum_{n \in A'} Pco_{ijk}^{*n} \cdot \ln MP_{ijk}^{*n} - \ln \frac{MP_{r1ijk}^{ms}}{MP_{ijk}^{*0}} \right) \quad (8.65.a)$$

Si  $(s=R \vee s=B) \wedge y=Yimp_r^s+1$  (solo afecta a los módulos M-R2 y M-B2, respectivamente):

$$\Delta Kw_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^s = \Delta GC_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ms} - \frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r,Yimp_r^s+1,ijk} \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^n \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ns} - Pcp_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} - \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s,ijk}^n \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} - \ln \frac{MP_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ms}}{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s}} \right) \quad (8.65.b)$$

En todos los demás casos se aplica la siguiente fórmula general:

si  $(s=0 \wedge y \neq 1) \vee (s=R \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^R+1) \vee (s=B \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^B+1)$ :

$$\Delta Kw_{ryijk}^s = \Delta GC_{ryijk}^{ms} - \frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{ryijk} \cdot \ln MP_{ryijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n \cdot \ln MP_{ryijk}^{ns} - Pcp_{r,y-1,ijk} \cdot \ln MP_{r,y-1,ijk}^{ms} - \sum_{n \in A'} Pco_{r,y-1,ijk}^n \cdot \ln MP_{r,y-1,ijk}^{ns} - \ln \frac{MP_{ryijk}^{ms}}{MP_{r,y-1,ijk}^{ms}} \right) \quad (8.65.c)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  en cualquiera de estas tres ecuaciones.

Por su parte, los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  presentes en las ecuaciones 8.65.a a 8.65.c han de tomar los siguientes valores:

$r = 1, 2, \dots, Nrs$  ;  $s \in \{0, R, B\}$  ;

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s=0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R+1, \dots, Yma_r^R-1\}_{M-R2}, Yma_r^R, \{Yma_r^R+1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s=R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B+1, \dots, Yma_r^B-1\}_{M-B2}, Yma_r^B, \{Yma_r^B+1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s=B \end{array} \right\} ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\};$$

$$i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Nótese además que la evaluación de la ecuación 8.65.c para el año  $Yma_r^s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ) no se enmarca en ninguno de los módulos iterativos de cálculo, puesto que el cómputo de la variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$  correspondiente a dicho año puede ser efectuado mediante cálculo directo tras haber finalizado la ejecución de los módulos M-R1 y M-R2 o M-B1 y M-B2.

### 8.3.10.2. Variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste compuesto promediado o ponderado

La variable  $\Omega Kw_{rijk}^s$  representa, dada la simulación aleatoria  $r$ , la variación —totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público en el escenario  $s$  (con  $s \neq 0$ )— experimentada en el coste compuesto de viaje (promediado o ponderado según las fracciones del volumen de viajes atribuibles a viajeros cautivos y a no cautivos) en el escenario  $s$ , para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Cabe recordar que, en una determinada simulación aleatoria y dado un cierto escenario  $s=R$  o  $s=B$ , la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público engloba desde el año  $Yimp_r^s + 1$  (primer año incluido en esta fase) hasta el año  $Yma_r^s - 1$  (último año contenido en dicha etapa).

Paralelamente al caso de la variable  $\Delta Kw_{ryijk}^s$ , a la cuantificación de  $\Omega Kw_{rijk}^s$  en el modelo le corresponden unidades monetarias constantes [CU] (por viaje).

El cálculo en el modelo de la variable  $\Omega Kw_{rijk}^s$  se basa de nuevo —al igual que para  $\Delta Kw_{ryijk}^s$ — en la aplicación de la ecuación 4.27.a, pero en este caso, al pretenderse obtener la variación totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público, se ha de adoptar como estado inicial u original del sistema de transportes el calculado para el último año previo a la puesta en funcionamiento del nuevo modo de transporte público (año  $Yimp_r^s$ ), y como estado modificado o alterado el previsto para el primer año de la fase de madurez del nuevo modo (año  $Yma_r^s$ ). De esta forma —junto con la trasposición de la notación genérica empleada en la ecuación 4.27.a a las correspondientes variables del modelo— se da lugar a la ecuación 8.66.

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

$$\Omega Kw_{rijk}^s = \Omega GC_{rijk}^{ms} - \frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r,Yma_r^s,ijk} \cdot \ln MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yma_r^s,ijk}^n \cdot \ln MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ns} \right. \\ \left. - Pcp_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} - \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s,ijk}^n \cdot \ln MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} - \ln \frac{MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms}}{MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s}} \right) \quad (8.66)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  y con las siguientes combinaciones de índices  $(r, s, m, i, j, k)$ :

$$r = 1, 2, \dots, Nrs; s \in \{R, B\} \wedge m = s; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$



### 8.3.11. Volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales

La variable  $Q_{ryijk}^s$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el volumen o número total de viajes (por hora) que, sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , se efectuarían mediante el conjunto de opciones modales de transporte contempladas en el modelo, todo ello en el escenario  $s$  y en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación.

Las unidades de medida utilizadas para la variable  $Q_{ryijk}^s$  en la formulación del modelo son personas (viajes) por hora [prs/h], para cada uno de los posibles sentidos de viaje.

El cálculo en el modelo del volumen total de desplazamientos en el conjunto de opciones modales, dada una determinada tipología de viajes (itinerario, período horario, sentido, etc.), se basa en la formulación incremental representada en la ecuación 4.14. A partir de dicha formulación genérica se desarrollan las ecuaciones 8.67.a.i, 8.67.a.ii y 8.67.b para el cómputo de los valores de la variable  $Q_{ryijk}^s$ . En particular, las ecuaciones 8.67.a.i y 8.67.a.ii se obtienen al tomar cada año sucesivamente analizado ( $y$ ) como estado modificado o alterado del sistema, y el año inmediatamente anterior ( $y-1$  en general; el año base si  $y=1$ ) como estado inicial u original. Paralelamente, es necesario adecuar la notación simplificada empleada en la ecuación 4.14 a las variables expresamente confeccionadas para el desarrollo del modelo. Por ejemplo, el papel del factor de crecimiento exógeno designado como  $J_{Q,ex}$  en la ecuación 4.14 pasa a ser desempeñado en las ecuaciones 8.67.a.i y 8.67.a.ii por la variable  $IQex_{rijk}$  como tasa anual media de dicho factor a lo largo del período u horizonte de evaluación. Por su parte, en la ecuación 8.67.b, que es de aplicación a los módulos de cálculo M-R1 y M-B1, para el cálculo del volumen total de viajes previsto para el primer año del período de madurez del nuevo servicio de transporte público de posible implantación (año  $Yma_r^s$ ), se debe fijar como estado inicial del sistema —debido a la propia estructura del modelo particular durante la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio— el correspondiente al último año previo a la puesta en uso del nuevo modo de transporte público (año  $Yimp_r^s$ ). Consecuentemente, la variación en el coste compuesto promediado o ponderado que debe aplicarse en el caso de esta ecuación es la totalizada o acumulada a lo largo de la fase de introducción y consolidación (es decir, la variable  $\Omega Kw_{rijk}^s$ ). Además, el factor exógeno  $1+IQex_{rijk}/100$  se ha de aplicar tantas veces como años transcurran entre los estados inicial y modificado o alterado de la ecuación, de ahí la aparición de la diferencia  $Yma_r^s - Yimp_r^s$  como exponente del susodicho factor.

En conclusión, el cálculo de la variable  $Q_{ryijk}^s$  queda determinado en el modelo por las ecuaciones que a continuación se presentan.

#### Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2 y M-B3

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$Q_{r1ijk}^s = Q_{ijk}^* \cdot \left( 1 + \frac{IQex_{rijk}}{100} \right) \cdot \exp(-\theta_{rijk} \cdot \Delta Kw_{r1ijk}^s) \quad (8.67.a.i)$$

En todos los demás casos ( $y \neq 1$ ):

$$Q_{ryijk}^s = Q_{r,y-1,ijk}^s \cdot \left( 1 + \frac{IQex_{rijk}}{100} \right) \cdot \exp(-\theta_{rijk} \cdot \Delta Kw_{ryijk}^s) \quad (8.67.a.ii)$$

Los índices ( $r,s,y,i,j,k$ ) contenidos en esta pareja de ecuaciones (8.67.a.i y 8.67.a.ii) deben adoptar los valores que se indican a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\};$$

$$i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1

$$Q_{r,Yma_r^s,ijk}^s = Q_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \cdot \left( 1 + \frac{IQex_{rijk}}{100} \right)^{(Yma_r^s - Yimp_r^s)} \cdot \exp(-\theta_{rijk} \cdot \Omega Kw_{rijk}^s) \quad (8.67.b)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs; s \in \{R, B\}; i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

#### 8.4. MÓDULOS DE CÁLCULO: CRITERIOS PARA LA FINALIZACIÓN O CONTINUACIÓN DE CADA BUCLE ITERATIVO

Como se ha visto, la resolución de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3 se realiza a través de procedimientos de tipo iterativo. Por ello, una vez finalizado el cálculo de todas las variables que componen una iteración completa, se ha de comprobar si los valores obtenidos pueden ser aceptados como válidos, para lo cual se debe haber alcanzado una solución suficientemente estable que garantice el equilibrio entre el volumen de viajes por hora en cada modo de transporte y las variaciones de coste generalizado acontecidas en cada una de dichas opciones modales, las cuales dependen —entre otros factores— del propio número de viajes efectuados en cada modo. Así pues, se debe comprobar si las soluciones aproximadas obtenidas en las sucesivas iteraciones satisfacen un determinado criterio de convergencia para que, en ese caso, puedan ser aceptadas como definitivas.

Al respecto, el criterio de convergencia que se describe en el presente epígrafe debe ser examinado sucesivamente para cada iteración ejecutada dentro de los bucles iterativos —ya sean de tipo A o de tipo B— destinados a la resolución del sistema de ecuaciones correspondiente a cada una de las posibles combinaciones de los siguientes índices:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs; s \in \{0, R, B\};$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\};$$

$$i = 1, 2, \dots, NL; j = 1, 2, \dots, Nper_i$$

Al objeto de facilitar la referencia al estado de eventual cumplimiento de la condición de convergencia que se debe satisfacer al final del proceso iterativo, se define la variable auxiliar  $[cnvtest_{ryij}^s]_u^v$ . Esta variable, de tipo binario, señala mediante su valor el cumplimiento o no del criterio de convergencia en la iteración  $u$ -ésima de un bucle iterativo (de tipo  $v$ ) destinado a la obtención, en la simulación aleatoria  $r$ , de los valores de las variables de cálculo relativas al corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$  durante el período horario  $j$ , dado el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación en el escenario  $s$ .

En relación con el requisito adoptado para poder considerar que se ha alcanzado una solución estable o de equilibrio, el respectivo criterio de convergencia se establece simultáneamente sobre las variables indicativas de las cuotas de reparto modal general (para todos y cada uno de los modos que forman parte del conjunto de alternativas en un cierto escenario y en un año determinado) y sobre el volumen total de viajes por hora en el conjunto de dichas opciones modales. Esta forma de proceder garantiza que se haya obtenido una solución estable también para el volumen de viajes por hora en cada uno de los modos de transporte, al ser este simplemente el producto de las dos variables antedichas.

Por otra parte, al menos para bucles iterativos de tipo A en el caso de corredores, ejes o itinerarios servidos por líneas convencionales (longitudinales de doble sentido), el criterio de convergencia debe comprobarse simultáneamente sobre los resultados correspondientes a ambos sentidos, ya que el modelo desarrollado contempla una posible interacción entre ellos. Esta interacción proviene de la forma en que se determina el intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte público en este tipo de líneas (recuérdese el epígrafe 8.3.2.3), dado que dicho intervalo ha de ser necesariamente el mismo en ambos sentidos. Este hecho provoca que el intervalo de operación en el sentido con un menor volumen de diseño venga impuesto por el intervalo que resulte necesario en el sentido contrario, a fin de mantener una capacidad suficiente que satisfaga su más elevada demanda. De este modo, el volumen de pasajeros en uno de los sentidos (el que requiera mayor capacidad) influye en los atributos de la oferta de transporte del sentido opuesto (por ejemplo, el efecto más evidente se produce sobre el tiempo de espera en parada para los usuarios del transporte público, que depende directamente del intervalo de operación). Esta influencia se propagaría a su vez, en mayor o menor medida, al coste generalizado de la opción de transporte público, a las cuotas de reparto modal de las distintas alternativas, etc. Se trata por tanto de un problema que no puede ser abordado de manera totalmente aislada para cada sentido de viaje, por lo que resulta conveniente asegurar que se llegue a soluciones simultáneamente válidas para cada uno de ellos.

El criterio de convergencia propiamente dicho se formula en base a la magnitud del acercamiento (en valor absoluto) entre el resultado (*output*) de una variable en una determinada iteración y el valor de entrada (*input*) de esa misma variable en dicha iteración (el cual es función a su vez del resultado de la iteración anterior). Finalmente, para aceptar como solución válida el resultado obtenido, se ha de verificar que dicho acercamiento sea inferior a una cota de avance suficientemente pequeña, en función de la mayor o menor precisión deseada. Estas cotas de avance, previamente fijadas, se designan como  $\varepsilon_S$  para el caso de las cuotas de reparto modal general (variable  $MS_{ryijk}^{ms}$ ) y como  $\varepsilon_Q$  para el volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales (variable  $Q_{ryijk}^s$ ). Nótese que estas dos cotas de avance corresponden a distintos tipos de magnitudes y se definen por tanto con diferentes unidades: adimensionalmente en el caso de  $\varepsilon_S$  y mediante número de viajes (personas) por hora [prs/h] en el caso de  $\varepsilon_Q$ .

Por tanto, la variable  $[cnvtest_{ryij}^s]_u^v$  queda especificada del siguiente modo:

$$[cnvtest_{ryij}^s]_u^v = \text{logical} \left[ \left( \left( [MS_{ryijk}^{ms}]_{u,0}^v - [MS_{ryijk}^{ms}]_{u,1}^v \right) < \varepsilon_S \quad \forall k \wedge \forall m \in A \right) \wedge \left( [Q_{ryijk}^s]_{u,0}^v - [Q_{ryijk}^s]_{u,1}^v < \varepsilon_Q \quad \forall k \right) \right] \quad (8.68)$$

donde  $k$  (índice de sentido) y  $A$  (conjunto de opciones modales) incluyen, según el tipo de línea y la combinación entre escenario y año, los valores indicados a continuación:

$$k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}; A = \left\{ \begin{array}{l} = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\}$$

Además, en relación con la ecuación 8.68, se define  $logical(expr)$  como una función de tipo lógico que devuelve el resultado 1 si la expresión, proposición o condición  $expr$  es verdadera y 0 en caso de ser falsa. Por otra parte, se recuerda que los ‘inputs’ y ‘outputs’ de la iteración se han designado de la siguiente forma:

- $[MS_{ryijk}^{ms}]_{u,0}^v$  y  $[Q_{ryijk}^s]_{u,0}^v$  simbolizan, en un bucle iterativo de tipo  $v$ , los ‘outputs’ resultantes de la iteración  $u$ -ésima para las correspondientes variables (es decir, los resultados de las ecuaciones 8.63.a o 8.63.b en el primer caso, y de las ecuaciones 8.67.a.i, 8.67.a.ii o 8.67.b en el segundo).
- $[MS_{ryijk}^{ms}]_{u,1}^v$  y  $[Q_{ryijk}^s]_{u,1}^v$  representan, en un bucle iterativo de tipo  $v$ , los ‘inputs’ tomados o recibidos por la iteración  $u$ -ésima para las respectivas variables (es decir, los valores entrantes a la ecuación 8.4.b).

En el siguiente paso, en función del valor obtenido para la variable  $[cnvtest_{ryij}^s]_u^v$ , se han de realizar las acciones indicadas a continuación:

- Si  $[cnvtest_{ryij}^s]_u^v = 1$  se da por finalizado este bucle iterativo y se aceptan como valores definitivos de las variables de cálculo los obtenidos en la última iteración ejecutada (la cual queda designada como iteración  $U$ ). Finalmente, con los ‘outputs’  $[MS_{ryijk}^{ms}]_{U,0}^v$  y  $[Q_{ryijk}^s]_{U,0}^v$  se puede recalculer el volumen definitivo de viajes por hora en cada modo de transporte aplicando la ecuación 8.4.b.
- Si  $[cnvtest_{ryij}^s]_u^v = 0$  se calculan según lo indicado en las siguientes ecuaciones (8.69.a y 8.69.b)<sup>255</sup> los valores de las variables  $Q_{ryijk}^s$  y  $MS_{ryijk}^{ms}$  que servirán de ‘inputs’ o entradas para la siguiente iteración ( $u+1$ ), y se continúa con la ejecución del bucle iterativo retornando a la ecuación 8.4.b.

$$Q_{ryijk}^s \cong [Q_{ryijk}^s]_{u+1,1}^v = \psi \cdot [Q_{ryijk}^s]_{u,0}^v + (1-\psi) \cdot [Q_{ryijk}^s]_{u,1}^v \quad (8.69.a)$$

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{u+1,1}^v = \psi \cdot [MS_{ryijk}^{ms}]_{u,0}^v + (1-\psi) \cdot [MS_{ryijk}^{ms}]_{u,1}^v \quad (8.69.b)$$

En las ecuaciones 8.69.a y 8.69.b,  $\psi$  es un peso de ponderación o coeficiente de progreso relativo entre iteraciones que por definición debe cumplir  $0 < \psi \leq 1$ .

## 8.5. MÓDULOS DE CÁLCULO: DESARROLLO DE APROXIMACIONES INICIALES PARA LA ITERACIÓN DE PARTIDA EN EL ARRANQUE DE CADA BUCLE ITERATIVO DE TIPO A

En este punto se retoma el análisis de las formulaciones propuestas para el cálculo de las aproximaciones iniciales que se utilizan como ‘inputs’ en la primera iteración ( $u=1$ ) de los bucles iterativos de tipo A ( $v=A$ ), complementando así las indicaciones que se habían apuntado previamente en el epígrafe 8.2.1.1.

Las variables sobre las que se han de establecer estas estimaciones iniciales de la posible solución son, como se ha visto con anterioridad, las cuotas de reparto modal general (variable  $MS_{ryijk}^{ms}$ ) y el volumen

<sup>255</sup> Estas expresiones representan realmente el mismo algoritmo que las ecuaciones 8.3.a y 8.3.b, pero desplazado en una iteración ( $u+1$  en lugar de  $u$ ).

total de viajes en el conjunto de opciones modales (variable  $Q_{ryijk}^s$ ) para el año objeto de análisis. En la modelización llevada a cabo, las aproximaciones iniciales propuestas se han desarrollado combinando las pautas generales que se esbozan brevemente a continuación:

- Por un lado, en consonancia con el enfoque incremental del modelo, las aproximaciones iniciales para las antedichas variables se asientan sobre la base de resultados obtenidos previamente para años anteriores en el tiempo a aquel para el cual se esté procediendo a ejecutar los cálculos (en general, el año inmediatamente anterior)<sup>256</sup>. No obstante, resulta necesario diferenciar diversas particularidades según el tipo de módulo de cálculo en el que se encuadre el año analizado.
- Por otro lado, las aproximaciones iniciales a los valores de las variables  $MS_{ryijk}^{ms}$  y  $Q_{ryijk}^s$  en el año objeto de análisis se fundamentan en la hipótesis instrumental —utilizada únicamente a efectos de elaborar dichas aproximaciones iniciales— de tener en cuenta para ello tan solo aquellos cambios en el coste generalizado de las opciones modales (con respecto al año precedente que se deba adoptar como referencia en cada caso) que se produzcan en las componentes de coste o desutilidad que en el modelo son independientes del volumen de viajes efectuados en cada modo, y cuya potencial cuantía (del cambio o variación) no sea en la práctica irrelevante. Esta independencia con respecto a los volúmenes de viajes permite que los valores de los cambios en dichas componentes puedan ser conocidos —o fácilmente calculables— de antemano (es decir, con anterioridad al comienzo del bucle iterativo en cuestión).
- De acuerdo al punto anterior, para las alternativas modales distintas del transporte público (automóvil particular, moto o ciclomotor, bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viajes peatonales) se consideran únicamente las variaciones anuales en los costes modales aplicados de forma exógena al modelo, que vienen indicadas por la variable  $\Delta Cex_{ryijk}^m$ . En el caso de la opción modal de transporte público, no se considera en general ninguna variación en el coste generalizado de dicha alternativa con respecto al año anterior de referencia, excepto cuando entre el año tomado como estado inicial u original y el año correspondiente al estado modificado o alterado se haya producido la sustitución del servicio de transporte público preexistente (autobús convencional en tráfico mixto) por el nuevo modo de transporte público en plataforma reservada (lógicamente esta situación solo puede tener lugar en los escenarios 'R' y 'B'). En estos casos cabe aplicar como variación en el coste generalizado del transporte público el valor del *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional. El valor de dicha variación, trasladado a unidades monetarias, viene dado en el modelo por el término  $-Bns_r^m \cdot VTTpb_{ryijk}/60$ .
- Para la construcción de las aproximaciones iniciales a la variable  $MS_{ryijk}^{ms}$  es preciso estimar las hipotéticas cuotas de reparto modal no cautivo que resultarían de aplicar solamente los cambios en los costes generalizados de las opciones modales que se han descrito en el punto anterior, prescindiendo de aquellas variaciones en las componentes de coste o desutilidad que efectivamente dependen del volumen de viajes movilizado en cada modo. Es esperable que estas últimas, además de resultar desconocidas hasta la ejecución del respectivo bucle iterativo, respondan a un comportamiento generalmente más 'suave' que aquellas otras que dependen de factores exógenos directamente relacionados con cambios en las políticas de transporte urbano y movilidad (variaciones potencialmente más bruscas, aunque no necesariamente tenga por qué ser así).
- Para el desarrollo de la aproximación inicial a la variable  $Q_{ryijk}^s$  se calculan las variaciones en el coste compuesto promediado o ponderado que hipotéticamente tendrían lugar si solo se tuviesen en cuenta los cambios en los costes generalizados de las alternativas que han sido indicados en el tercer punto. Estas modificaciones en el coste compuesto promediado o ponderado permiten obtener una

<sup>256</sup> Por conveniencia en la programación del modelo, la opción adoptada al respecto ha sido que las aproximaciones iniciales que sirven de 'inputs' a la primera iteración de los bucles de tipo A se construyan a partir de los 'outputs' almacenados como resultado de bucles iterativos de tipo B. La otra posible opción, que en algunos casos podría tener efectos positivos sobre la rapidez de convergencia, sería conservar y utilizar los 'outputs' del bucle homólogo de tipo A.

primera aproximación a las variaciones endógenas del volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales. Complementariamente se ha de incorporar el factor de crecimiento exógeno de dicho volumen de viajes, el cual depende directamente en el modelo de la variable  $IQex_{rijk}$  (tasa porcentual media de variación anual del volumen de viajes por factores exógenos).

La aplicación de estas líneas generales de actuación sobre algunas de las ecuaciones desarrolladas anteriormente en el modelo permite la elaboración de las expresiones de cálculo utilizadas para obtener las aproximaciones iniciales de las variables  $MS_{ryijk}^{ms}$  y  $Q_{ryijk}^s$ , destinadas a servir de 'inputs' en la primera iteración de los bucles iterativos de tipo A. No obstante, para llegar al cómputo de estas aproximaciones iniciales de  $MS_{ryijk}^{ms}$  y  $Q_{ryijk}^s$  resulta conveniente definir previamente algunas variables auxiliares o instrumentales, cuya función dentro del modelo es exclusivamente servir de apoyo en el desarrollo de dichas aproximaciones iniciales. En consecuencia, a continuación se deben especificar matemáticamente estas variables auxiliares, para así proceder posteriormente al establecimiento definitivo de las aproximaciones iniciales de las variables  $MS_{ryijk}^{ms}$  y  $Q_{ryijk}^s$ .

### 8.5.1. Variables auxiliares o instrumentales

Se establecen tres variables auxiliares o instrumentales en el proceso de desarrollo de las aproximaciones iniciales a utilizar como 'inputs' de la primera iteración en los bucles iterativos de tipo A. Estas tres variables se designan como  $MPht_{ryijk}^{ms}$ ,  $\Delta Kwh_{ryijk}^s$  y  $\Omega Kwh_{rijk}^s$ .

La primera de ellas ( $MPht_{ryijk}^{ms}$ ) representa las hipotéticas cuotas de reparto modal no cautivo que se obtendrían para un año determinado (a partir de la situación calculada para el año precedente tomado como referencia) si solamente se aplicasen en el modelo aquellas variaciones en el coste generalizado de las opciones modales que corresponden a componentes de coste o desutilidad independientes de los volúmenes de viajes y de cuantía del cambio no irrelevante, tal como se señaló anteriormente. Por su parte,  $\Delta Kwh_{ryijk}^s$  representa la hipotética variación, entre años consecutivos, del coste compuesto promediado o ponderado si solo se tuviesen en cuenta las mismas modificaciones en el coste generalizado de las alternativas que en el caso de la variable anterior (es decir, aquellas independientes de los volúmenes de viajes y de magnitud no despreciable). Finalmente,  $\Omega Kwh_{rijk}^s$  indicaría la hipotética variación en el coste compuesto promediado o ponderado totalizada o acumulada a lo largo de toda la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público bajo el mismo supuesto que en los casos anteriores. En línea con el criterio habitual del resto del modelo, en cualquiera de estas tres variables el índice  $r$  hace referencia a la simulación aleatoria en ejecución,  $s$  al escenario bajo análisis,  $y$  a los sucesivos años del período u horizonte de evaluación,  $m$  a la opción modal del conjunto de alternativas,  $i$  al corredor, eje o itinerario coincidente con la respectiva línea de transporte público,  $j$  al período horario y  $k$  al sentido de viaje.

Así pues, a continuación se especifica la forma de cálculo de cada una de estas tres variables auxiliares o instrumentales.

#### 8.5.1.1. Hipotéticas cuotas de reparto modal no cautivo para cada alternativa de transporte (aproximación inicial de partida)

Los valores de la variable auxiliar  $MPht_{ryijk}^{ms}$  (adimensional) se calculan de acuerdo a la serie de ecuaciones que se presentan a continuación. Estas expresiones provienen de la adaptación de las ecuaciones comprendidas entre 8.62.a.i y 8.62.c.ii a las condiciones de la hipótesis instrumental.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R3, M-B0 y M-B3**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

para el modo de transporte público (si  $m=0$ ):

$$MPht_{r1ijk}^{ms} = \frac{MP_{ijk}^{*0}}{MP_{ijk}^{*0} + \sum_{n \in A'} MP_{ijk}^{*n} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{r1ijk}^n)} \quad (8.70.a.i)$$

para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MPht_{r1ijk}^{ms} = \frac{MP_{ijk}^{*m} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{r1ijk}^m)}{MP_{ijk}^{*0} + \sum_{n \in A'} MP_{ijk}^{*n} \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{r1ijk}^n)} \quad (8.70.a.ii)$$

Si  $y \neq 1$ :

para cualquiera de los modos de transporte público (si  $m=0 \vee m=R \vee m=B$ ):

$$MPht_{ryijk}^{ms} = \frac{[MP_{r,y-1,ijk}^{ms}]_{U,0}^B}{[MP_{r,y-1,ijk}^{ms}]_{U,0}^B + \sum_{n \in A'} [MP_{r,y-1,ijk}^{ns}]_{U,0}^B \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{ryijk}^n)} \quad (8.70.a.iii)$$

para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MPht_{ryijk}^{ms} = \frac{[MP_{r,y-1,ijk}^{ms}]_{U,0}^B \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{ryijk}^m)}{[MP_{r,y-1,ijk}^{ns}]_{U,0}^B + \sum_{n \in A'} [MP_{r,y-1,ijk}^{ns}]_{U,0}^B \cdot \exp(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{ryijk}^n)} \quad (8.70.a.iv)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  en cualquiera de las cuatro ecuaciones. Por su parte, los índices de variable ( $r, s, y, m, \tilde{n}, i, j, k$ ) contenidos en las ecuaciones 8.70.a.i a 8.70.a.iv deben tomar las combinaciones de valores indicadas a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = \begin{cases} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} & \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} & \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m \in \begin{cases} \{0, C, M, V, P\} & \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \wedge Yma_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \wedge Yma_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ; \tilde{n} = \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R & \text{si } s = R \wedge Yma_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yma_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

Para los modos de transporte público (si  $m=R \vee m=B$ ):

$$MPht_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} = \frac{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(\lambda_{rijk} \cdot Bns_r^m \cdot \frac{1}{60} \cdot VTTpb_{r,Yma_r^s,ijk}\right)}{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(\lambda_{rijk} \cdot Bns_r^m \cdot \frac{1}{60} \cdot VTTpb_{r,Yma_r^s,ijk}\right) + \sum_{n \in A'} \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(-\lambda_{rijk} \cdot \sum_{y=Yimp_r^s+1}^{Yma_r^s} \Delta Cex_{ryijk}^n\right)} \quad (8.70.b.i)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MPht_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} = \frac{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ms} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(-\lambda_{rijk} \cdot \sum_{y=Yimp_r^s+1}^{Yma_r^s} \Delta Cex_{ryijk}^m\right)}{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(\lambda_{rijk} \cdot Bns_r^m \cdot \frac{1}{60} \cdot VTTpb_{r,Yma_r^s,ijk}\right) + \sum_{n \in A'} \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(-\lambda_{rijk} \cdot \sum_{y=Yimp_r^s+1}^{Yma_r^s} \Delta Cex_{ryijk}^n\right)} \quad (8.70.b.ii)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  en ambas ecuaciones. Además, a los índices genéricos de variable  $(r, s, m, i, j, k)$  de estas dos ecuaciones les corresponden los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; m \in \begin{cases} \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

**Para los módulos de cálculo M-R2 y M-B2**

Para los modos de transporte público (si  $m=R \vee m=B$ )<sup>257</sup>:

$$MPht_{ryijk}^{ms} = MP_{ryijk}^{ms} = \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B + psp_{ry}^s \cdot \left( \left[ MP_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} \right]_{U,0}^B - \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \right) \quad (8.70.c.i)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MPht_{ryijk}^{ms} = (1 - MPht_{ryijk}^{ss}) \cdot \frac{\left[ MP_{r,y-1,ijk}^{ms} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{ryijk}^m\right)}{\sum_{n \in A'} \left[ MP_{r,y-1,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \cdot \exp\left(-\lambda_{rijk} \cdot \Delta Cex_{ryijk}^n\right)} \quad (8.70.c.ii)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  y con los siguientes valores para los índices genéricos de variable  $(r, s, y, m, i, j, k)$  presentes en las ecuaciones 8.70.c.i y 8.70.c.ii:

<sup>257</sup> Una particularidad de la cuota de reparto modal no cautivo asignada al transporte público durante los módulos M-R2 y M-B2 es que no varía entre iteraciones, al depender únicamente de resultados previamente determinados y de variables cuyo valor ha sido establecido con anterioridad al inicio de los módulos iterativos de cálculo. Esta propiedad se hace extensible a la correspondiente cuota de reparto modal general, de forma que la aproximación inicial planteada coincide realmente con el valor final obtenido tras completar el bucle iterativo.



$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; y = \begin{cases} = \{Yimp_r^R + 1, Yimp_r^R + 2, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2} & \text{si } s = R \\ = \{Yimp_r^B + 1, Yimp_r^B + 2, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2} & \text{si } s = B \end{cases} ;$$

$$m \in \begin{cases} \{R, C, M, V, P\} & \text{si } s = R \\ \{B, C, M, V, P\} & \text{si } s = B \end{cases} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} = 1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

### 8.5.1.2. Hipotética variación entre años consecutivos del coste compuesto promediado o ponderado (aproximación inicial de partida)

La variable auxiliar  $\Delta Kwh_{r,yijk}^s$  (expresada en unidades monetarias constantes [CU] por viaje) se computa mediante las ecuaciones que a continuación se detallan. Estas expresiones se configuran en base a las ecuaciones 8.65.a, 8.65.b y 8.65.c, adaptando las mismas a la hipótesis instrumental que guía el desarrollo de estas aproximaciones iniciales.

Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2 y M-B3

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$\Delta Kwh_{r,1ijk}^s = -\frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r,1ijk} \cdot \ln MPht_{r,1ijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r,1ijk}^n \cdot \ln MPht_{r,1ijk}^{ns} - Pcp_{ijk}^* \cdot \ln MP_{ijk}^{*0} - \sum_{n \in A'} Pco_{ijk}^{*n} \cdot \ln MP_{ijk}^{*n} - \ln \frac{MPht_{r,1ijk}^{ms}}{MP_{ijk}^{*0}} \right) \quad (8.71.a)$$

Si  $(s=R \vee s=B) \wedge y=Yimp_r^s+1$  (solo afecta a los módulos M-R2 y M-B2, respectivamente):

$$\Delta Kwh_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^s = -Bns_r^m \cdot \frac{VTTpb_{r,Yimp_r^s+1,ijk}}{60} - \frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r,Yimp_r^s+1,ijk} \cdot \ln MPht_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^n \cdot \ln MPht_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ns} - Pcp_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \right) - \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s,ijk}^n \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \right) - \ln \frac{MPht_{r,Yimp_r^s+1,ijk}^{ms}}{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B} \right) \quad (8.71.b)$$

En todos los demás casos:

si  $(s=0 \wedge y \neq 1) \vee (s=R \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^R + 1) \vee (s=B \wedge y \neq 1 \wedge y \neq Yimp_r^B + 1)$ :

$$\Delta Kwh_{r,yijk}^s = -\frac{1}{\lambda_{rijk}} \cdot \left( Pcp_{r,yijk} \cdot \ln MPht_{r,yijk}^{ms} + \sum_{n \in A'} Pco_{r,yijk}^n \cdot \ln MPht_{r,yijk}^{ns} - Pcp_{r,y-1,ijk} \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,y-1,ijk}^{ms} \right]_{U,0}^B \right) - \sum_{n \in A'} Pco_{r,y-1,ijk}^n \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,y-1,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \right) - \ln \frac{MPht_{r,yijk}^{ms}}{\left[ MP_{r,y-1,ijk}^{ms} \right]_{U,0}^B} \right) \quad (8.71.c)$$

siendo  $A' = \{C, M, V, P\}$  en cualquiera de las ecuaciones 8.71.a, 8.71.b o 8.71.c, mientras que los índices genéricos de variable  $(r, s, y, m, i, j, k)$  contenidos en las mismas deben adoptar los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$m = \left\{ \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.5.1.3. Hipotética variación, totalizada a lo largo de la fase de introducción y consolidación del servicio, del coste compuesto promediado o ponderado (aproximación inicial de partida)

Los valores de la variable auxiliar  $\Omega Kwh_{r,ijk}^s$  (en unidades monetarias constantes [CU] por viaje) se obtienen según la ecuación 8.72, la cual procede a su vez de amoldar la ecuación 8.66 a la consabida hipótesis instrumental adoptada para el desarrollo de estas aproximaciones iniciales.

Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1

$$\begin{aligned} \Omega Kwh_{r,ijk}^s = & -Bns_r^m \cdot \frac{VTTpb_{r,Yma_r^s,ijk}}{60} - \frac{1}{\lambda_{r,ijk}} \cdot \left( Pcp_{r,Yma_r^s,ijk} \cdot \ln MPht_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms} + \right. \\ & + \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yma_r^s,ijk}^n \cdot \ln MPht_{r,Yma_r^s,ijk}^{ns} - Pcp_{r,Yimp_r^s,ijk} \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B \right) \\ & \left. - \sum_{n \in A'} Pco_{r,Yimp_r^s,ijk}^n \cdot \ln \left( \left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{ns} \right]_{U,0}^B \right) - \ln \frac{MPht_{r,Yma_r^s,ijk}^{ms}}{\left[ MP_{r,Yimp_r^s,ijk}^{0s} \right]_{U,0}^B} \right) \end{aligned} \quad (8.72)$$

donde  $A' = \{C, M, V, P\}$  y los índices genéricos de variable  $(r, s, m, i, j, k)$  toman los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} \wedge m = s ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.5.2. Aproximación inicial a las cuotas de reparto modal general

La aproximación inicial de la variable  $MS_{r,ijk}^{ms}$  a utilizar como 'input' en la primera iteración ( $u=1$ ) de los bucles iterativos de tipo A ( $v=A$ ) se calcula de acuerdo a las expresiones matemáticas que se señalan a continuación, las cuales no son más que una readaptación de las ecuaciones 8.63.a y 8.63.b a las variables auxiliares derivadas de la hipótesis instrumental planteada para el desarrollo de estas

aproximaciones iniciales. Recuérdesse, por otra parte, que las ecuaciones aquí indicadas completan y particularizan la expresión genérica originariamente presentada en la ecuación 8.1.b.

**Para cualquiera de los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R1, M-R2, M-R3, M-B0, M-B1, M-B2 y M-B3**

Para cualquiera de los modos de transporte público (si  $m=0 \vee m=R \vee m=B$ ):

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{1,1}^A = Pcp_{ryijk} + \left(1 - Pcp_{ryijk} - \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n\right) \cdot MPht_{ryijk}^{ms} \quad (8.73.a)$$

Para los restantes modos (si  $m=C \vee m=M \vee m=V \vee m=P$ ):

$$MS_{ryijk}^{ms} \cong [MS_{ryijk}^{ms}]_{1,1}^A = Pco_{ryijk}^m + \left(1 - Pcp_{ryijk} - \sum_{n \in A'} Pco_{ryijk}^n\right) \cdot MPht_{ryijk}^{ms} \quad (8.73.b)$$

siendo en ambas ecuaciones  $A' = \{C, M, V, P\}$ . Por su parte, los índices de variable ( $r, s, y, m, i, j, k$ ) contenidos en estas dos expresiones adoptarán los valores indicados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yma_r^R\}_{M-R1}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yma_r^B\}_{M-B1}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right\} ;$$

$$m \in \left\{ \begin{array}{l} \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = 0 \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ \{R, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ \{0, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ \{B, C, M, V, P\} \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

### 8.5.3. Aproximación inicial al volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales

La aproximación inicial utilizada para la variable  $Q_{r1ijk}^s$  como 'input' de la primera iteración ( $u=1$ ) en los bucles iterativos de tipo A ( $v=A$ ) se obtiene según el conjunto de ecuaciones que se especifican a continuación. Estas expresiones matemáticas proceden de reformular las ecuaciones 8.67.a.i, 8.67.a.ii y 8.67.b, adecuando las mismas a las variables auxiliares resultantes de aplicar la hipótesis instrumental empleada para las aproximaciones iniciales. Por otra parte, la serie de ecuaciones aquí incorporada completa y particulariza (según el módulo de cálculo y el año bajo análisis) la expresión genérica que fue presentada inicialmente en la ecuación 8.1.a.

**Para los módulos de cálculo M-00, M-R0, M-R2, M-R3, M-B0, M-B2 y M-B3**

Si  $y=1$  (solo afecta a los módulos M-00, M-R0 y M-B0):

$$Q_{r1ijk}^s \cong [Q_{r1ijk}^s]_{1,1}^A = Q_{ijk}^* \cdot \left(1 + \frac{IQex_{rijk}}{100}\right) \cdot \exp(-\theta_{rijk} \cdot \Delta Kwht_{r1ijk}^s) \quad (8.74.a.i)$$

En todos los demás casos ( $y \neq 1$ ):

$$Q_{ryijk}^s \cong \left[ Q_{ryijk}^s \right]_{1,1}^A = \left[ Q_{r,y-1,ijk}^s \right]_{U,0}^B \cdot \left( 1 + \frac{IQex_{rijk}}{100} \right) \cdot \exp\left(-\theta_{rijk} \cdot \Delta Kwh_{t_{ryijk}}^s\right) \quad (8.74.a.ii)$$

Los índices de variable ( $r,s,y,i,j,k$ ) concernientes a las ecuaciones 8.74.a.i y 8.74.a.ii adoptan los valores que se señalan a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ;$$

$$y = \left\{ \begin{array}{l} = \{1, 2, \dots, Yap\}_{M-00} \quad \text{si } s = 0 \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^R\}_{M-R0}, \{Yimp_r^R + 1, \dots, Yma_r^R - 1\}_{M-R2}, \{Yma_r^R + 1, \dots, Yap\}_{M-R3} \quad \text{si } s = R \\ = \{1, 2, \dots, Yimp_r^B\}_{M-B0}, \{Yimp_r^B + 1, \dots, Yma_r^B - 1\}_{M-B2}, \{Yma_r^B + 1, \dots, Yap\}_{M-B3} \quad \text{si } s = B \end{array} \right. ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

**Para los módulos de cálculo M-R1 y M-B1**

$$Q_{r,Yma_r^s,ijk}^s \cong \left[ Q_{r,Yma_r^s,ijk}^s \right]_{1,1}^A = \left[ Q_{r,Yimp_r^s,ijk}^s \right]_{U,0}^B \cdot \left( 1 + \frac{IQex_{rijk}}{100} \right)^{(Yma_r^s - Yimp_r^s)} \cdot \exp\left(-\theta_{rijk} \cdot \Omega Kwh_{t_{rijk}}^s\right) \quad (8.74.b)$$

donde:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left\{ \begin{array}{l} = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \quad \text{si } TypL_i = RO \end{array} \right\}$$

## 8.6. OTROS RESULTADOS COMPLEMENTARIOS

### 8.6.1. Tiempos de ciclo y número de unidades de transporte necesarias

Tras la finalización de los sucesivos módulos iterativos de cálculo, se aborda en esta sección, en primer lugar, la obtención de ciertas variables relacionadas con el tiempo de ciclo que es preciso adoptar para la operación de cada una de las líneas de transporte público estudiadas. En base a dicho tiempo de ciclo se procede a continuación al cálculo, en último término, del número de unidades de transporte del que es necesario disponer en la flota o parque vehicular para la explotación del subconjunto de la red de transporte público que esté formado por las  $NL$  líneas bajo análisis.

Al respecto, debe tenerse presente que los valores de las variables de cálculo que, procedentes de resultados previos, entren a formar parte de las ecuaciones incluidas a continuación (en particular, los tiempos de operación e intervalos), han de ser aquellos extraídos de la solución final aceptada como válida en los respectivos procesos iterativos de cálculo. Es decir, se han de tomar los valores obtenidos (tiempos de operación) o empleados (intervalos) en la última iteración necesaria ( $u=U$ ) del correspondiente bucle iterativo de tipo B ( $v=B$ ).

#### 8.6.1.1. Tiempo no ajustado de terminales (por cada ciclo completo)

La variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo de terminales (mínimo o no ajustado) en cada ciclo completo de un vehículo o unidad de transporte que actúe en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , supuesta la operación, en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Nótese que para esta variable la distinción entre sentidos solo es realmente aplicable en el caso de líneas circulares de doble

sentido, pero se mantiene igualmente el respectivo índice en la notación de la variable con el fin de preservar la generalidad de la misma. Esto implica que en líneas convencionales (longitudinales) y en líneas circulares de sentido único se ha de adoptar por conveniencia un solo valor arbitrario del índice  $k$  ( $k=1$ ).

En el modelo desarrollado, la unidad de tiempo utilizada para la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  es el minuto [min].

Se recuerda que, con carácter general, el tiempo de terminal (*terminal time*) se define como aquel tiempo que un vehículo o unidad de transporte permanece detenido en una de las terminales de la línea de forma adicional a los tiempos necesarios para el ascenso y descenso de pasajeros en dicha terminal (Vuchic, 2005: p. 15; Molinero y Sánchez, 2005: p. 404). En el caso de la definición dada en el marco del modelo desarrollado para la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  (tiempo de terminales), se debe tener en cuenta que este valor incluye conjuntamente los tiempos adicionales transcurridos en ambas terminales si se trata de una línea convencional (longitudinal de doble sentido), pero en cambio, en el caso de líneas circulares –ya sea con circulaciones en ambos sentidos o en sentido único– representa simplemente el tiempo adicional transcurrido en la única terminal existente (la de cierre de circuito). Por tanto, la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  incorpora los tiempos de terminal que tengan lugar durante la realización de un ciclo o vuelta completa a la línea (dos tiempos individuales de terminal si la línea es longitudinal de doble sentido y uno solo en el caso de líneas circulares). No obstante, obsérvese que en el caso de líneas circulares de doble sentido se contempla además la posibilidad de que el tiempo de terminal pueda ser distinto en uno y otro sentido (al poder ser diferentes los tiempos de operación), por lo que se determinan explícitamente dos tiempos de terminal distintos (uno para cada sentido de circulación).

Por otra parte, la indicación de que esta variable representa el tiempo mínimo o no ajustado hace referencia a que posteriormente, una vez se haya ajustado el tiempo de ciclo al producto del intervalo por el número de unidades de transporte en servicio, será necesario reajustar también el tiempo de terminales, de tal modo que el valor final a utilizar en la programación de operaciones es siempre mayor o igual que el inicialmente precalculado.

De acuerdo a la definición establecida para el coeficiente  $\gamma$  (véase epígrafe 5.5.5) como límite inferior del ratio entre el tiempo de terminales y el tiempo total de operación de la línea en cada ciclo (es decir, sumando, si procede, ambos sentidos), se pueden obtener los valores de la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  mediante las expresiones indicadas a continuación, dependiendo del tipo de línea bajo análisis.

Si  $TypL_i = LT$  :

$$ttmin_{ryij1}^{ms} = \gamma_{rij}^m \cdot (To_{ryij1}^{ms} + To_{ryij2}^{ms}) \quad (8.75.a)$$

Si  $TypL_i = RT$  :

$$ttmin_{ryijk}^{ms} = \gamma_{rij}^m \cdot To_{ryijk}^{ms}, \quad \text{con } k=1,2 \quad (8.75.b)$$

Si  $TypL_i = RO$  :

$$ttmin_{ryij1}^{ms} = \gamma_{rij}^m \cdot To_{ryij1}^{ms} \quad (8.75.c)$$

Los restantes índices genéricos ( $r,s,y,m,i,j$ ) presentes en las ecuaciones 8.75.a a 8.75.c han de tomar, en la ejecución de los cálculos, los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = 1, 2, 3, \dots, Yap ;$$

$$m = \left. \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ; i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i$$

### 8.6.1.2. Tiempo de ciclo no ajustado

La variable  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$  determina, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo de ciclo (mínimo o no ajustado) imprescindible para los vehículos o unidades de transporte que actúen en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , supuesta la operación, en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Téngase presente, al igual que en el caso de la variable anterior, que la distinción entre sentidos solo resulta aplicable a líneas circulares de doble sentido, de tal forma que, para mantener la generalidad de la notación, se da al índice correspondiente un único valor arbitrario ( $k=1$ ) en el caso de líneas convencionales y circulares de sentido único.

La unidad de medida empleada para expresar la variable  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$  en el modelo desarrollado es nuevamente el minuto [min].

Se define en general el tiempo de ciclo (*cycle time*) como el tiempo que transcurre entre que un vehículo o unidad de transporte parte dos veces consecutivas de una misma terminal (Vuchic, 2005: p. 16), o, lo que es equivalente, el tiempo que teóricamente debe tardar en pasar el mismo vehículo o unidad por un punto determinado de la línea —y en el mismo sentido de avance— dos veces seguidas (Molinero y Sánchez, 2005: p. 405). En particular, la definición de la variable  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$  especifica que en el presente epígrafe se precalcula un tiempo mínimo o no ajustado, el cual se utiliza únicamente para determinar el número de unidades de transporte que deben prestar servicio en la línea. Posteriormente, una vez se haya establecido dicho número, se debe proceder a ajustar el tiempo de ciclo definitivamente utilizado en la programación de operaciones.

El tiempo de ciclo (en su modalidad no ajustada,  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$ ) se compone de la suma de los tiempos de operación necesarios para dar una vuelta completa a la línea (incluyendo por tanto ambos sentidos en el caso de líneas convencionales o longitudinales) y el tiempo mínimo o no ajustado de terminales (calculado anteriormente por medio de la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$ ). Por consiguiente, los valores de la variable  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$  quedan determinados por las expresiones que se indican a continuación, en función de cada posible tipo de línea.

Si  $TypL_i = LT$ :

$$Tcmin_{ryij1}^{ms} = To_{ryij1}^{ms} + To_{ryij2}^{ms} + ttmin_{ryij1}^{ms} \quad (8.76.a)$$

Si  $TypL_i = RT$ :

$$Tcmin_{ryijk}^{ms} = To_{ryijk}^{ms} + ttmin_{ryijk}^{ms}, \quad \text{con } k = 1, 2 \quad (8.76.b)$$

Si  $TypL_i = RO$ :

$$Tcmin_{ryij1}^{ms} = To_{ryij1}^{ms} + ttmin_{ryij1}^{ms} \quad (8.76.c)$$

donde los índices genéricos  $(r,s,y,m,i,j)$  de las ecuaciones 8.76.a a 8.76.c deben adoptar los mismos valores que se indicaron para la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  en las ecuaciones 8.75.a a 8.75.c.

### 8.6.1.3. Número de unidades de transporte en prestación de servicio (por línea y período horario)

La variable  $NTUs_{ryijk}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el número de unidades de transporte público del modo  $m$  que, en el año  $y$  del período  $u$  horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , han de prestar servicio en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ . Esta última distinción resulta efectiva únicamente para líneas circulares de doble sentido, mientras que en el resto de los casos (líneas convencionales y circulares de sentido único) se asigna arbitrariamente un valor único ( $k=1$ ) al índice relacionado con el sentido de operación.

El número de unidades de transporte que han de prestar servicio en una línea dadas unas determinadas condiciones de operación se obtiene a partir del cociente entre el tiempo de ciclo –inicialmente sin ajustar– y el intervalo de operación establecido para el funcionamiento del servicio (Vuchic, 2005: p. 51; Molinero y Sánchez, 2005: p. 415). Dado que el número de unidades de transporte ha de ser necesariamente un valor entero, el resultado del cociente anterior (generalmente un número real) debe ser ajustado al número entero más próximo que resulte mayor o igual que dicho número real.

En consecuencia, se calcula la variable del modelo  $NTUS_{ryijk}^{ms}$  del siguiente modo:

$$NTUS_{ryijk}^{ms} = \left\lceil \frac{Tcmin_{ryijk}^{ms}}{Hs_{ryijk}^{ms}} \right\rceil \quad (8.77)$$

donde  $\lceil x \rceil$  representa la función techo de  $x$  (la cual asigna a cada posible valor de  $x$  el menor número entero que sea mayor o igual que  $x$ ), y  $Hs_{ryijk}^{ms}$  simboliza el intervalo utilizado en la operación del servicio (intervalo restringido entre sus límites mínimo y máximo  $y$ , en su caso, redondeado inferiormente).

En la ecuación 8.77, los respectivos índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  han de tomar las siguientes combinaciones de valores para la ejecución de los cálculos:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = 1, 2, 3, \dots, Yap ; m = \left. \begin{array}{l} = 0 \quad \text{si } s = 0 \\ = 0 \quad \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \quad \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \quad \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \quad \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \left. \begin{array}{l} = 1 \quad \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RO \\ = 1, 2 \quad \text{si } TypL_i = RT \end{array} \right\}$$

#### 8.6.1.4. Tiempo de ciclo (ajustado)

La variable  $Tc_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo de ciclo (ajustado) finalmente adoptado para la operación de la línea  $i$  durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dado el funcionamiento, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Nótese que, al igual que en el caso de la variable relacionada  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$ , la distinción entre sentidos solo resulta procedente para líneas circulares de doble sentido, mientras que en los demás casos (líneas convencionales y circulares de sentido único) simplemente se asigna un único valor arbitrario ( $k=1$ ) al índice que denota el sentido de operación.

Análogamente a  $Tcmin_{ryijk}^{ms}$ , la variable  $Tc_{ryijk}^{ms}$  también se cuantifica en el modelo en minutos [min].

Para mantener constante un cierto intervalo de operación (al menos en las expediciones desde las terminales), la duración del ciclo ha de adaptarse al tiempo resultante de multiplicar el número de unidades de transporte que deban prestar el servicio en la línea por el intervalo programado (Vuchic, 2005: p. 52; Molinero y Sánchez, 2005: p. 415). Consecuentemente, el tiempo de ciclo ajustado  $Tc_{ryijk}^{ms}$  se calcula en el modelo por medio de la siguiente relación:

$$Tc_{ryijk}^{ms} = NTUS_{ryijk}^{ms} \cdot Hs_{ryijk}^{ms} \quad (8.78)$$

donde todos los índices  $(r,s,y,m,i,j,k)$  han de adoptar los mismos valores que han sido señalados en la ecuación 8.77 para el caso de la variable  $NTUS_{ryijk}^{ms}$ .

### 8.6.1.5. Velocidad de ciclo

La variable  $V_{c_{ryijk}}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , la velocidad de ciclo en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dada la operación, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Al igual que en el caso del tiempo de ciclo y otras variables de similares características, obsérvese que la distinción entre sentidos solo afecta realmente a líneas circulares de doble sentido. Para los restantes tipos de líneas (convencionales y circulares de sentido único) debe interpretarse que el índice representativo del sentido de operación recibe por conveniencia un único valor arbitrario ( $k=1$ ), manteniéndose así la generalidad de la notación de la variable.

Las unidades utilizadas en el modelo para expresar numéricamente la variable  $V_{c_{ryijk}}^{ms}$  son kilómetros por hora [km/h].

La velocidad de ciclo<sup>258</sup> (*cycle speed*) representa la velocidad media —incluyendo paradas y tiempos de permanencia en terminales— de una unidad de transporte o vehículo al dar una vuelta completa a la línea (Vuchic, 2005: pp. 20-21). Se trata de una variable de interés para los operadores (no así para los pasajeros o potenciales usuarios, ya que el atributo relevante para estos sería la velocidad de operación).

De acuerdo a su definición, la velocidad de ciclo debe calcularse como la distancia recorrida por el vehículo o unidad de transporte, en una vuelta completa a la línea, dividida entre el respectivo tiempo de ciclo. A su vez, la distancia recorrida en una vuelta completa se expresa de manera diferente dependiendo del tipo de línea: equivale a la longitud de la línea ( $L_i$ ) en el caso de líneas circulares (ya sean de doble sentido o de sentido único) y, en cambio, es igual a dos veces dicha longitud ( $2 \cdot L_i$ ) si se trata de una línea convencional (longitudinal).

Así pues, la variable  $V_{c_{ryijk}}^{ms}$  se obtiene en el modelo mediante las siguientes ecuaciones, que incorporan además el correspondiente factor de conversión entre unidades (minutos y horas):

Si  $TypL_i = LT$ :

$$V_{c_{ryijk}}^{ms} = 120 \cdot \frac{L_i}{T_{c_{ryijk}}^{ms}} \quad (8.79.a)$$

Si  $TypL_i = RT \vee TypL_i = RO$ :

$$V_{c_{ryijk}}^{ms} = 60 \cdot \frac{L_i}{T_{c_{ryijk}}^{ms}} \quad (8.79.b)$$

En estas ecuaciones, los sucesivos índices ( $r, s, y, m, i, j, k$ ) deben adoptar el mismo conjunto de valores que se indicó para el caso de la variable  $NTUs_{ryijk}^{ms}$  en la ecuación 8.77.

### 8.6.1.6. Tiempo de terminales (ajustado)

La variable  $tt_{ryijk}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el tiempo de terminales (ajustado), por cada ciclo completo, que finalmente se debe adoptar para las unidades de transporte o vehículos que presten servicio en la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ , dada la operación, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , del correspondiente modo  $m$  de transporte público. Una vez más cabe señalar que, para esta variable, la diferenciación entre sentidos solo es de

<sup>258</sup> En algunas referencias (p. ej. Molinero y Sánchez, 2005: p. 405), a la velocidad de ciclo se la denomina alternativamente ‘velocidad comercial’. Sin embargo este último término puede resultar un tanto confuso, ya que es frecuente su utilización —sobre todo en medios no especializados— para referirse al concepto que se definiría técnicamente como velocidad de operación. Por ello, para evitar posibles ambigüedades, en la presente tesis se ha preferido utilizar únicamente los términos velocidad de operación y velocidad de ciclo.



aplicación a líneas circulares de doble sentido, mientras que en el resto de casos (líneas convencionales y circulares de sentido único) se asigna, por conveniencia, un solo valor arbitrario ( $k=1$ ) al índice relativo al sentido de operación.

En consonancia con  $ttmin_{ryijk}^{ms}$ , la variable  $tt_{ryijk}^{ms}$  se expresa, en el modelo desarrollado, también en minutos [min].

En cuanto al número de períodos de estadía en terminales que quedan incluidos en el tiempo indicado por la variable  $tt_{ryijk}^{ms}$ , son de aplicación las mismas observaciones que se realizaron anteriormente para la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$ . Es decir, se incorporan conjuntamente aquellos tiempos de terminal que tengan lugar durante la realización de un ciclo o vuelta completa a la línea: dos tiempos de estadía en terminales si la línea es convencional (longitudinal) y solo uno en el caso de líneas circulares.

El tiempo de terminales debe ajustarse de tal forma que sea igual a la diferencia entre el tiempo de ciclo finalmente adoptado y los tiempos de operación que serían estrictamente necesarios para dar una vuelta completa a la línea (lo que incluye ambos sentidos de circulación en el caso de líneas convencionales). Por tanto, se calcula en el modelo la variable  $tt_{ryijk}^{ms}$  según las siguientes ecuaciones, en función del tipo de línea en cuestión:

Si  $TypL_i = LT$  :

$$tt_{ryij1}^{ms} = Tc_{ryij1}^{ms} - (To_{ryij1}^{ms} + To_{ryij2}^{ms}) \quad (8.80.a)$$

Si  $TypL_i = RT$  :

$$tt_{ryijk}^{ms} = Tc_{ryijk}^{ms} - To_{ryijk}^{ms}, \quad \text{con } k = 1, 2 \quad (8.80.b)$$

Si  $TypL_i = RO$  :

$$tt_{ryij1}^{ms} = Tc_{ryij1}^{ms} - To_{ryij1}^{ms} \quad (8.80.c)$$

Por su parte, los demás índices genéricos  $(r,s,y,m,i,j)$  involucrados en las ecuaciones 8.80.a a 8.80.c han de tomar los mismos valores que se señalaron anteriormente para el cálculo de la variable  $ttmin_{ryijk}^{ms}$  en las ecuaciones 8.75.a a 8.75.c.

### 8.6.1.7. Número de unidades de transporte público prestando servicio en cada línea en su período horario de mayor exigencia

La variable  $NTUI_{ryi}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el número de unidades de transporte público del modo  $m$  que, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , han de prestar servicio en la línea  $i$  durante el período horario en el que dicha línea presente un mayor requerimiento o exigencia de unidades. Constituye por tanto el máximo número de unidades de transporte que se encuentran prestando servicio en una línea determinada, el cual se produce generalmente en su período horario de mayor demanda u hora punta.

De acuerdo a su propia definición, la variable  $NTUI_{ryi}^{ms}$  debe calcularse, para una línea determinada, examinando el número de unidades de transporte en prestación de servicio (variable  $NTUS_{ryijk}^{ms}$ ) a lo largo de todos y cada uno de los posibles períodos horarios que se hayan definido para la línea y seleccionando a continuación el mayor de dichos valores. En el caso de líneas circulares de doble sentido, debe tenerse en cuenta que la prestación del servicio se produce simultáneamente en los dos posibles sentidos de operación, de tal forma que, para cada posible período horario, se debe sumar el número de unidades que operan en uno y otro sentido. Estos procedimientos se resumen matemáticamente mediante las siguientes ecuaciones del modelo, aplicables en función del tipo de línea bajo análisis:

Si  $TypL_i = LT \vee TypL_i = RO$ :

$$NTU_{ryi}^{ms} = \max_{j=1, \dots, Nper_i} \{ NTU_{ryij1}^{ms} \} \quad (8.81.a)$$

Si  $TypL_i = RT$ :

$$NTU_{ryi}^{ms} = \max_{j=1, \dots, Nper_i} \{ NTU_{ryij1}^{ms} + NTU_{ryij2}^{ms} \} \quad (8.81.b)$$

Los pertinentes índices genéricos  $(r,s,y,m,i)$  de las ecuaciones 8.81.a y 8.81.b deben adoptar, para la ejecución de los cálculos, los siguientes valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = 1, 2, 3, \dots, Yap ; m = \left. \begin{array}{l} =0 \text{ si } s=0 \\ =0 \text{ si } s=R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ =R \text{ si } s=R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ =0 \text{ si } s=B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ =B \text{ si } s=B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ; i = 1, 2, \dots, NL$$

### 8.6.1.8. Número necesario de unidades de transporte, de cada tipo, para la prestación de servicio en el subconjunto de líneas estudiadas

La variable  $NTUt_{rym}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , una cota superior del número de unidades de transporte del subtipo o subclase  $n$  (del modo  $m$ ) que son necesarias para la prestación de servicio en el subconjunto de la red de transporte público formado por las líneas analizadas, dadas las condiciones de operación previstas para el año  $y$  del período u horizonte de evaluación en el escenario  $s$ . Representa esta variable el máximo número de unidades de transporte, de una determinada subclase o subtipo perteneciente al correspondiente modo, que simultáneamente se encontrarían prestando servicio en dicho subconjunto de líneas, coincidiendo generalmente con los períodos del día de mayor demanda de movilidad u horas punta.

Dado el modo  $m$  de transporte público que deba estar en operación en el año  $y$  del escenario  $s$ , la cantidad de unidades de un determinado subtipo o subclase  $n$  que, como máximo, son necesarias para la prestación del servicio en el subconjunto de líneas estudiadas (es decir,  $NTUt_{rym}^{ms}$ ) viene dada por la suma del número de unidades que han de utilizarse durante el período horario de mayor exigencia ( $NTU_{ryi}^{ms}$ ) en todas aquellas líneas en las que efectivamente se empleen unidades del subtipo  $n$  (es decir, las líneas en las que se cumple  $TypV_i^m = n$ ). Este planteamiento se plasma, en el modelo desarrollado, a través de la ecuación 8.82.a. En esta expresión la igualdad estricta se cumple bajo el supuesto de que los períodos horarios de mayor necesidad de unidades para cada una de las líneas analizadas coinciden en el tiempo o se solapan entre sí, situaciones que en la práctica habitual se pueden considerar como las más probables. En caso contrario, podría ser factible reasignar unidades de transporte temporalmente inactivas de una línea a otra en la que se requiriese su operación, reduciendo así el número total de unidades necesarias. De ahí que la ecuación 8.82.a se haya representado con el signo ‘menor o igual’ en lugar de la igualdad estricta, con lo que se cubren, al menos a nivel teórico, las distintas situaciones posibles <sup>259</sup>.

En síntesis, la variable  $NTUt_{rym}^{ms}$  se especifica matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$NTUt_{rym}^{ms} \leq \sum_{i=1}^{NL} NTU_{ryi}^{ms} \cdot \delta^K(TypV_i^m, n) \quad (8.82.a)$$

<sup>259</sup> No obstante, en el desarrollo y ejecución práctica del modelo propuesto, los cálculos van a ser efectuados aplicando la igualdad.

donde  $\delta^K(\mu, \nu)$  simboliza la función delta de Kronecker, la cual se define como una función de dos variables  $\mu$  y  $\nu$  (generalmente índices con valores enteros positivos) que toma valor 1 si  $\mu$  y  $\nu$  son iguales ( $\mu = \nu$ ) y valor 0 si son distintos ( $\mu \neq \nu$ ). Por tanto:

$$\delta^K(TypV_i^m, n) = \begin{cases} = 0 & \text{si } TypV_i^m \neq n \\ = 1 & \text{si } TypV_i^m = n \end{cases} \quad (8.82.b)$$

En la ecuación 8.82.a, así como en su complementaria 8.82.b, el conjunto de índices pertinentes  $(r, s, y, m, n)$  ha de adoptar las siguientes combinaciones de valores:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs; s \in \{0, R, B\}; y = 1, 2, 3, \dots, Yap; m = \begin{cases} = 0 & \text{si } s = 0 \\ = 0 & \text{si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R & \text{si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 & \text{si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B & \text{si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases}; n = 1, 2, \dots, Nvt^m$$

#### 8.6.1.9. Número adicional de unidades de transporte, de cada tipo, en reserva y en mantenimiento o reparación

La variable  $NTUrm_{ry}^{ms}$  representa, para la simulación aleatoria  $r$ , el número adicional de unidades de transporte del subtipo o subclase  $n$  (del modo  $m$ ) dedicadas a servir de reserva o a permanecer temporalmente no disponibles para el servicio por estar sometidas a labores de mantenimiento o reparación, supuestas las condiciones de operación del transporte público previstas para el año  $y$  del período u horizonte de evaluación en el escenario  $s$ .

De acuerdo a la definición dada en el epígrafe 5.3.7 para el coeficiente  $\rho$  (porcentaje de unidades de transporte destinadas a reserva o a permanecer fuera de servicio por trabajos de mantenimiento o reparación, calculado con respecto al número de unidades necesarias estrictamente para la prestación del servicio), la variable  $NTUrm_{ry}^{ms}$  se obtiene en el modelo mediante la siguiente expresión:

$$NTUrm_{ry}^{ms} = \text{nint} \left( \frac{\rho_r^m}{100} \cdot NTUt_{ry}^{ms} \right) \quad (8.83)$$

siendo  $\text{nint}(x)$  la función de redondeo que recibe como argumento un número real  $x$  y lo aproxima al entero más cercano (*nearest integer*).

Los índices  $(r, s, y, m, n)$  presentes en la ecuación 8.83 toman, para la ejecución de los cálculos, los mismos valores que se indicaron para el caso de la variable  $NTUt_{ry}^{ms}$  en las ecuaciones 8.82.a y 8.82.b.

#### 8.6.1.10. Número de unidades de transporte, de cada tipo, necesarias en la composición de la flota o parque

La variable  $NTUf_{ry}^{ms}$  indica, para la simulación aleatoria  $r$ , el número total de unidades de transporte del subtipo o subclase  $n$  (del modo  $m$ ) que, en el año  $y$  del período u horizonte de evaluación y en el escenario  $s$ , son necesarias para la explotación del subconjunto de la red de transporte público integrado por las líneas analizadas, y que por tanto deben formar parte de la flota o parque vehicular del operador.

El cálculo de esta variable consiste simplemente en sumar, en cada caso, el número de unidades de transporte necesarias estrictamente para la prestación del servicio, con el número adicional de unidades destinadas a reserva y a mantenimiento o reparación (Vuchic, 2005: p. 6; Molinero y Sánchez, 2005: pp. 405-406). Por tanto, la variable  $NTUf_{ry}^{ms}$  se obtiene en el modelo a través de la siguiente ecuación:

$$NTUf_{ry}^{ms} = NTUt_{ry}^{ms} + NTUrm_{ry}^{ms} \quad (8.84)$$

donde todos los índices  $(r,s,y,m,n)$  deben adoptar los mismos valores que se habían señalado en las ecuaciones 8.82.a y 8.82.b para el cálculo de la variable  $NTUt_{rjn}^{ms}$ .

### 8.6.2. Otras potenciales contribuciones del modelo en relación con la explotación del servicio de transporte público

A continuación se exponen someramente algunas de las potencialidades del modelo desarrollado en cuanto a la capacidad de generar resultados que a su vez puedan ser utilizados como datos en el cálculo de índices, parámetros, etc., relacionados con la explotación del servicio de transporte público. Este tipo de índices y parámetros resultan habitualmente de especial interés para las empresas operadoras del transporte público colectivo urbano y/o metropolitano (ya sean estas de titularidad pública o privada), pues constituyen indicadores de la eficiencia operativa y sus valores terminan trasladándose, en último término, a los resultados de explotación de las empresas. No obstante, estos índices presentan también una relevante dimensión social o socioeconómica (en absoluto desligada de la anterior) en la medida en que se erigen paralelamente como indicadores de la eficiencia en el consumo de recursos para la prestación a la sociedad del necesario servicio de transporte público.

En relación con este tipo de estudio, se seguirán a grandes rasgos las líneas generales marcadas por el Capítulo 4 del *'Informe Anual del Observatorio de Costes y Financiación del Transporte Urbano Colectivo 2014-2015'* (Observatorio TUC, 2017: pp. 79-159), aunque restringiendo el análisis presentado a aquellos parámetros o índices más directamente relacionados con los resultados proporcionados por el modelo y adaptando los procedimientos de cálculo a las variables particulares de este. En este sentido, se distinguen —atendiendo a la estructura de la referencia citada— parámetros e índices relativos a las operaciones, al personal, al material móvil, a gastos y costes, y a la financiación. En el primero de los casos (indicadores y parámetros de operación) se presentará explícitamente la formulación que, a modo de 'extensión' del modelo propiamente dicho, permitiría calcular los valores previstos para los diferentes índices y variables de interés. Para el resto de categorías simplemente se realizará una descripción cualitativa de cómo los resultados del modelo podrían utilizarse e integrarse —generalmente junto con otros datos básicos complementarios— en la obtención de futuras estimaciones sobre cuestiones tales como las necesidades de personal de conducción, el kilometraje anual medio por vehículo o unidad de transporte, ciertos costes de explotación, o los ingresos por recaudación directa de los usuarios (sin que dicha descripción de potenciales utilidades deba considerarse necesariamente cerrada y exhaustiva).

#### 8.6.2.1. Operaciones

A lo largo de este epígrafe se especifica la formulación propuesta para el cálculo, en base a las variables proporcionadas por el modelo como resultado de su ejecución, de varios parámetros e índices concernientes a la operación del servicio de transporte público, así como al rendimiento o eficiencia del mismo en términos de usuarios por 'cantidad' de servicio operado.

Así pues, en la serie de ecuaciones presentadas a continuación (ecuaciones 8.85.a a 8.93) se mantienen, en cuanto a la notación empleada para superíndices y subíndices, las mismas claves utilizadas en el desarrollo del modelo, es decir:  $m$  para denotar el modo de transporte (en este caso limitado a los tipos de modos de transporte público),  $s$  para especificar el escenario evaluado,  $r$  para identificar la simulación aleatoria,  $i$  para la línea de transporte público analizada,  $j$  para la franja o período horario de operación, y  $k$  para el sentido de viaje (o sentido de rotación de las unidades de transporte si la variable se refiere exclusivamente al tipo de operación de la línea). Los valores asumidos por estos índices (exceptuando  $j$  y  $k$ , que en este caso se utilizan solo como índices de suma) son por tanto los especificados a continuación:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{0, R, B\} ; y = 1, 2, 3, \dots, Yap ; m = \left. \begin{array}{l} = 0 \text{ si } s = 0 \\ = 0 \text{ si } s = R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ = R \text{ si } s = R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ = 0 \text{ si } s = B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ = B \text{ si } s = B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{array} \right\} ; i = 1, 2, \dots, NL$$

Además, se definen previamente las siguientes variables auxiliares:  $Lc_i$  como longitud (en kilómetros) de un ciclo o vuelta completa a la línea  $i$ ,  $Ntd_i$  en alusión al número de sentidos de viaje atendidos por dicha línea de transporte público, y  $K_i$  como número de sentidos de rotación de las unidades de transporte en la operación de esa línea. Estas variables auxiliares han de tomar diferentes valores según la clase de línea en cuestión (LT: longitudinal o convencional de doble sentido; RT: circular de doble sentido; RO: circular de sentido único), de tal forma que:

$$Lc_i = \left\{ \begin{array}{l} = 2 \cdot L_i \text{ si } TypL_i = LT \\ = L_i \text{ si } TypL_i = RT \vee TypL_i = RO \end{array} \right\} \quad (8.85.a)$$

$$Ntd_i = \left\{ \begin{array}{l} = 2 \text{ si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ = 1 \text{ si } TypL_i = RO \end{array} \right\} \quad (8.85.b)$$

$$K_i = \left\{ \begin{array}{l} = 1 \text{ si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RO \\ = 2 \text{ si } TypL_i = RT \end{array} \right\} \quad (8.85.c)$$

#### 8.6.2.1.a. Distancia útil (en servicio comercial) recorrida anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte

Las diferentes formas de cálculo, a partir del modelo desarrollado, de la distancia útil (es decir, en el propio trazado de una línea y en servicio comercial activo) recorrida cada año por el conjunto de vehículos o unidades de transporte están reflejadas en la ecuación 8.86, ya sea a nivel de un determinado conjunto o subconjunto de  $NL$  líneas de la red (variable  $WUL_{ry}^{ms}$ ) o a nivel de cada línea específica (variable  $WUL_{ryi}^{ms}$ ). La distancia agregada así calculada queda expresada en kilómetros [km] (o, utilizando una terminología más específica, en vehículos-kilómetro [veh-km] o unidades de transporte - kilómetro [TU-km]).

$$WUL_{ry}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} WUL_{ryi}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} \underbrace{NTUS_{ryijk}^{ms} \cdot Vc_{ryijk}^{ms} \cdot NH_{ij}}_{WUL_{ryi}^{ms}} = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} \underbrace{60 \cdot \frac{Lc_i}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}}_{WUL_{ryi}^{ms}} \quad (8.86)$$

#### 8.6.2.1.b. Distancia total recorrida anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte

Por su parte, la distancia total (es decir, incluyendo, además de la distancia útil, los desplazamientos entre los depósitos o cocheras y las terminales de inicio o final de línea, así como los trayectos fuera de servicio por incidencias, averías, accidentes, etc.) recorrida en cada año por el conjunto de vehículos o unidades de transporte puede ser estimada mediante una expresión del tipo de la presentada en la ecuación 8.87, pudiendo distinguirse dos niveles de agregación: uno referido a todo un determinado conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $WTL_{ry}^{ms}$ ) y otro relativo a cada línea singularizada (variable  $WTL_{ryi}^{ms}$ ). De nuevo, la distancia total así calculada vendría expresada en kilómetros [km] (o, más específicamente, vehículos-kilómetro [veh-km] o unidades de transporte - kilómetro [TU-km]). Así pues, se propone para el cálculo de dicha distancia:

$$WTL_{ry}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} WTL_{ryi}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \underbrace{\frac{1}{\chi_{rij}^m} \cdot \sum_{k=1}^{K_i} 60 \cdot \frac{Lc_i}{HS_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}}_{WTL_{ryi}^{ms}} \quad (8.87)$$

siendo  $\chi_{rij}^m$  el valor (calculado con datos propios o transferido de otras explotaciones similares) de la razón media entre el número de kilómetros útiles recorridos y la cantidad de kilómetros totales, el cual dependería en todo caso de cuestiones como la distancia entre la ubicación de los depósitos o cocheras y las terminales de inicio o final de una línea, las condiciones de transición entre diferentes franjas horarias de operación y la duración de las mismas, la mayor o menor propensión de los vehículos o unidades de transporte de un determinado modo a sufrir incidencias como averías o accidentes, etc. A modo de referencia orientativa, se puede indicar que esta razón presenta unos valores promedio de 0.92–0.93 (datos de 2014 y 2015) para el conjunto de empresas de transporte público en autobús analizadas en el informe del Observatorio TUC (2017: p. 87). Sin embargo, para los sistemas de tránsito rápido (en este caso metro ligero o tranvía y BHLS/BRT) Vuchic (2005: p. 69) apunta que suelen presentar valores de este coeficiente de eficiencia (que él denomina ‘*coefficient of run-cutting*’) más altos que las redes de autobuses convencionales. Por otra parte, nótese que, además de la dependencia con la línea ( $i$ ), el período horario de operación ( $j$ ) y el tipo de modo de transporte público ( $m$ ), se admite en la formulación presentada la posibilidad de tratar este factor  $\chi$  como una variable aleatorizada más ( $r$ ).

#### 8.6.2.1.c. Tiempo de servicio acumulado anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte

El cálculo del tiempo en servicio que acumulan anualmente el conjunto de vehículos o unidades de transporte (incluyendo los tiempos de permanencia en terminales) puede ser efectuado mediante las expresiones incluidas en la ecuación 8.88, tanto a nivel de un determinado conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $WUT_{ry}^{ms}$ ) como a nivel de cada línea individual (variable  $WUT_{ryi}^{ms}$ ). El resultado de dichas expresiones viene dado en horas [h] (recurriendo a una terminología más específica, podría hablarse de vehículos-hora [veh-h] o unidades de transporte - hora [TU-h]).

$$WUT_{ry}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} WUT_{ryi}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \underbrace{NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{K_i} NTUS_{ryijk}^{ms}}_{WUT_{ryi}^{ms}} = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \underbrace{NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{K_i} \frac{Tc_{ryijk}^{ms}}{HS_{ryijk}^{ms}}}_{WUT_{ryi}^{ms}} \quad (8.88)$$

Uno de los principales aspectos de interés de este cálculo radica en que sería necesario como punto de partida para la obtención del número requerido de horas de trabajo efectivo (sin contar bajas, posible absentismo, etc.) de la plantilla de conductores, para lo que se dividirían los resultados de la ecuación 8.88 entre un factor de eficiencia cuyo valor no debería diferir en gran medida del de  $\chi_{rij}^m$ .

#### 8.6.2.1.d. Tasa (anual media) de acceso o captación de pasajeros por kilómetro útil recorrido

A continuación se plantea la obtención de la tasa anual media de acceso de usuarios del servicio de transporte público (número de pasajeros captados) por cada kilómetro útil recorrido por el conjunto de vehículos o unidades de transporte. Esta tasa puede interpretarse como un índice relativo al rendimiento o eficiencia (ya sea comercial/financiera o socioeconómica) de la distancia útil recorrida, y corresponde a lo que se denominaría “tasa de ocupación de la red” según la terminología empleada en los informes del Observatorio TUC (2017: pp. 88-91, 221). En cualquier caso, esta tasa puede ser calculada a nivel de una línea específica (variable  $RUL_{ryi}^{ms}$ ), para lo que se aplicaría la ecuación 8.89.a, o a nivel de todo un determinado conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $RUL_{ry}^{ms}$ ), empleándose para ello la ecuación 8.89.b. A los resultados de estas expresiones les corresponden unidades de pasajeros por kilómetro [prs/km].

$$RUL_{ryi}^{ms} = \frac{\sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms}}{WUL_{ryi}^{ms}} = \frac{\sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms}}{\sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} 60 \cdot \frac{Lc_i}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}} \quad (8.89.a)$$

$$RUL_{ry}^{ms} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms} \right)}{WUL_{ry}^{ms}} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms} \right)}{\sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} 60 \cdot \frac{Lc_i}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} RUL_{ryi}^{ms} \cdot WUL_{ryi}^{ms}}{WUL_{ry}^{ms}} =$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^{NL} WUL_{ryi}^{ms}} \cdot \sum_{i=1}^{NL} RUL_{ryi}^{ms} \cdot WUL_{ryi}^{ms} \quad (8.89.b)$$

### 8.6.2.1.e. Tasa (anual media) de acceso o captación de pasajeros por hora en servicio

Otro interesante indicador del rendimiento o eficiencia del servicio de transporte público en términos de viajeros por ‘cantidad’ de servicio operado es la tasa anual media de acceso de usuarios (número de pasajeros captados) por cada hora en servicio acumulada por el conjunto de vehículos o unidades de transporte. Así pues, en este caso el rendimiento o eficiencia se mide en términos relativos al tiempo de servicio. Nótese que este nuevo índice equivale a la “tasa de ocupación del servicio”, según la denominación que al respecto se utiliza en los informes del Observatorio TUC (2017: pp. 88-91, 221). Distinguiendo dos posibles niveles de agregación en el cálculo, esta tasa de acceso o captación de pasajeros por hora en servicio puede hacer referencia a una línea singularizada (variable  $RUT_{ryi}^{ms}$ ) o bien estar referida a todo un conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $RUT_{ry}^{ms}$ ), aplicándose en uno u otro caso las ecuaciones 8.90.a o 8.90.b respectivamente.

$$RUT_{ryi}^{ms} = \frac{\sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms}}{WUT_{ryi}^{ms}} = \frac{\sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms}}{\sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} NTUS_{ryijk}^{ms}} \quad (8.90.a)$$

$$RUT_{ry}^{ms} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms} \right)}{WUT_{ry}^{ms}} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{Ntd_i} q_{ryijk}^{ms} \right)}{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} NTUS_{ryijk}^{ms} \right)} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} RUT_{ryi}^{ms} \cdot WUT_{ryi}^{ms}}{WUT_{ry}^{ms}} =$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^{NL} WUT_{ryi}^{ms}} \cdot \sum_{i=1}^{NL} RUT_{ryi}^{ms} \cdot WUT_{ryi}^{ms} \quad (8.90.b)$$

### 8.6.2.1.f. Velocidad (media anual) de ciclo

Para la obtención de la velocidad media anual de ciclo<sup>260</sup> en la explotación de una línea específica (variable  $VC_{ryi}^{ms}$ ) o de un determinado conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $VC_{ry}^{ms}$ ) se puede recurrir, en base a los resultados del modelo, a las ecuaciones 8.91.a y 8.91.b, respectivamente, en

<sup>260</sup> Se recuerda que la velocidad de ciclo se define como la velocidad media, incluyendo paradas y tiempos de permanencia en terminales, de las unidades de transporte o vehículos al dar una vuelta completa a la línea.

las que la velocidad así calculada queda expresada en kilómetros por hora [km/h]. Esta velocidad media anual de ciclo es equivalente al concepto que el informe del Observatorio TUC (2017: pp. 94-98, 219) denomina “velocidad de servicio”.

$$VC_{ryi}^{ms} = \frac{WUL_{ryi}^{ms}}{WUT_{ryi}^{ms}} = \frac{\sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} 60 \cdot \frac{Lc_i}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}}{\sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{K_i} NTUS_{ryijk}^{ms}} \quad (8.91.a)$$

$$VC_{ry}^{ms} = \frac{WUL_{ry}^{ms}}{WUT_{ry}^{ms}} = \frac{\sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} 60 \cdot \frac{Lc_i}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}}{\sum_{i=1}^{NL} \left( \sum_{j=1}^{Nper_i} NH_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{K_i} NTUS_{ryijk}^{ms} \right)} = \frac{1}{WUT_{ry}^{ms}} \cdot \sum_{i=1}^{NL} VC_{ryi}^{ms} \cdot WUT_{ryi}^{ms} =$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^{NL} WUT_{ryi}^{ms}} \cdot \sum_{i=1}^{NL} VC_{ryi}^{ms} \cdot WUT_{ryi}^{ms} \quad (8.91.b)$$

Adicionalmente es posible deducir de forma sencilla las siguientes relaciones en las que interviene la velocidad media anual de ciclo:

$$RUT_{ryi}^{ms} = RUL_{ryi}^{ms} \cdot VC_{ryi}^{ms} \quad (8.92.a)$$

$$RUT_{ry}^{ms} = RUL_{ry}^{ms} \cdot VC_{ry}^{ms} \quad (8.92.b)$$

### 8.6.2.1.g. Número anual de expediciones

Finalmente, se plantea el cálculo del número total de expediciones realizadas anualmente en un determinado conjunto o subconjunto de líneas de la red (variable  $NCD_{ry}^{ms}$ ) o bien en una línea singularizada (variable  $NCD_{ryi}^{ms}$ ). La cantidad de expediciones representa el número de veces que una unidad de transporte o vehículo en servicio comercial parte desde la terminal de inicio de recorrido (o desde la terminal de cierre en el caso de líneas circulares) para efectuar un ciclo o vuelta completa a la línea (o, lo que es lo mismo, mide el número de ciclos o vueltas completas a las líneas realizados por el conjunto de vehículos o unidades de transporte en servicio). Ya sea a partir de los resultados del modelo o a partir de parámetros anteriores, el número anual de expediciones puede ser calculado mediante las igualdades reflejadas en la ecuación 8.93, siendo el resultado de tipo adimensional.

$$NCD_{ry}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} NCD_{ryi}^{ms} = \sum_{i=1}^{NL} \underbrace{\sum_{j=1}^{Nper_i} \sum_{k=1}^{K_i} \frac{60}{Hs_{ryijk}^{ms}} \cdot NH_{ij}}_{NCD_{ryi}^{ms}} = \sum_{i=1}^{NL} \underbrace{\frac{WUL_{ryi}^{ms}}{Lc_i}}_{NCD_{ryi}^{ms}} \quad (8.93)$$

### 8.6.2.2. Personal

Tal como ya se apuntó anteriormente, en base al cálculo del tiempo en servicio acumulado anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de transporte ( $WUT_{ry}^{ms}$ ), es posible estimar de forma bastante precisa el número requerido de horas de trabajo efectivo (sin contar bajas, posible absentismo, etc.) de la plantilla de conductores (teniendo en cuenta, cuando sea pertinente, el número de conductores necesarios por unidad de transporte en circulación, si en algún caso particular pudiese llegar a ser distinto de uno). A partir de aquí, dividiendo entre el coeficiente de asistencia del personal (Vuchic, 2005: p. 69) es posible obtener el número total de horas remuneradas anualmente a la plantilla de



conductores, y con ello, dividiendo ahora entre el número medio de horas laborales al año del personal de conducción (dependiente de convenios, calendarios laborales, etc.), se estimaría la dimensión de la plantilla de conductores necesaria en cada caso. Adicionalmente, es posible calcular con ello ciertos indicadores de rendimiento como los promedios de kilómetros útiles y kilómetros totales por conductor (en base a  $WUL_{ry}^{ms}$  y  $WTL_{ry}^{ms}$  respectivamente), o el promedio de conductores en plantilla por vehículo o unidad de transporte de la flota (utilizando para ello la variable del modelo  $NTUf_{ry}^{ms}$ ). Incluso sería posible realizar una estimación orientativa de la plantilla total si se tiene en cuenta para este fin que, según los datos del conjunto de empresas de transporte público en autobús analizadas en el informe del Observatorio TUC (2017: pp. 98-100), la plantilla de conductores representa, en promedio, en torno al 71-72% del número total de empleados. No obstante, debe aplicarse este dato con relativa precaución, ya que puede variar sensiblemente para otros sistemas de transporte público distintos del autobús convencional, como el metro ligero o tranvía y el BHLS o BRT, además de las lógicas variaciones –posiblemente menores– entre diferentes empresas operadoras de un mismo modo de transporte público.

### 8.6.2.3. Material móvil

El número de vehículos o unidades de transporte, de cada tipo, que son necesarias en la composición de la flota viene indicado, para cada año del horizonte de evaluación, por la variable del modelo  $NTUf_{ry}^{ms}$ . Por tanto, este resultado –complementado con datos sobre los costes de adquisición de cada tipo de unidad y sobre la duración estimada de la vida útil de cada clase de vehículo o unidad de transporte– permitiría realizar una previsión de la inversión anual media en incorporación o renovación de la flota. También es posible calcular algunos parámetros de servicio de la flota como los promedios anuales de kilómetros útiles y de kilómetros totales por unidad de transporte o vehículo (utilizando las variables  $WUL_{ry}^{ms}$  y  $WTL_{ry}^{ms}$  junto con  $NTUf_{ry}^{ms}$ ).

### 8.6.2.4. Gastos y costes

En relación con los gastos y costes por consumo de fuentes secundarias de energía o ‘portadores energéticos’ (combustibles o energía eléctrica, según el caso), el modelo permite calcular fácilmente, según se ha visto con anterioridad (ecuación 8.87), la distancia total recorrida anualmente por el conjunto de vehículos o unidades de cada tipo o modo de transporte público (variables  $WTL_{ry}^{ms}$  o  $WTL_{ryi}^{ms}$ ). Combinando estos resultados con los datos pertinentes sobre el consumo medio unitario (por kilómetro recorrido) de cada uno de estos tipos de vehículos o unidades de transporte público (l/km para los combustibles o kW·h/km para la energía eléctrica), se obtiene directamente una estimación del consumo total de combustibles y/o de energía eléctrica necesario, en cada posible caso, para la prestación del servicio de transporte público en la línea o sub-/conjunto de líneas analizadas. Incluso, si se dispusiese de curvas de consumo en función de la velocidad media de operación, podría ser posible afinar un poco más este tipo de cálculo, ya que el modelo proporciona, como uno de sus resultados, los valores de la velocidad media de operación correspondiente a cada combinación de condiciones (variable  $Vo_{ryijk}^{ms}$ ). En cualquier caso, con los posibles pronósticos disponibles sobre la evolución en el tiempo del coste unitario de los combustibles o de la energía eléctrica (contabilizado desde una perspectiva financiera o desde una perspectiva socioeconómica, según el marco de referencia de cada evaluación), sería posible prever el gasto financiero (o coste socioeconómico) del consumo de fuentes secundarias de energía en cada año y escenario. Adicionalmente, pueden calcularse a partir de ello índices relativos, como el gasto o coste en fuentes secundarias de energía por kilómetro útil recorrido (empleando  $WUL_{ry}^{ms}$  o  $WUT_{ryi}^{ms}$ ), por kilómetro total (con  $WTL_{ry}^{ms}$  o  $WTL_{ryi}^{ms}$ ), o por pasajero transportado (en base a las variables del modelo  $q_{ryijk}^{ms}$  y  $NH_{ij}$ ).

En lo concerniente a los gastos y costes de personal, una posible forma de calcular el coste total al año de la plantilla de conductores pasaría simplemente por multiplicar el número necesario de estos (obtenido

de acuerdo a las indicaciones planteadas en el epígrafe de 'Personal', 8.6.2.2) por una estimación del coste laboral medio anual de este tipo de empleados (que a veces puede diferir apreciablemente según se trate de modos de rodadura ferroviaria o de sistemas basados en autobuses). Otra alternativa —en principio equivalente— consistiría en utilizar el número total de horas de trabajo de los conductores necesarios en cada año (también obtenido anteriormente según el epígrafe de 'Personal') por el coste laboral por hora estimado para esta clase de empleados. Ya sea de uno u otro modo, a partir de la cifra resultante se pueden calcular indicadores relativos, como el coste promedio en conductores por vehículo o unidad de transporte (en base a la variable  $NTUf_{ryn}^{ms}$ ), el coste promedio de conductores por kilómetro útil recorrido (dividiendo entre  $WUL_{ry}^{ms}$  o  $WUT_{ryi}^{ms}$ ) o por kilómetro total (empleando  $WTL_{ry}^{ms}$  o  $WTL_{ryi}^{ms}$ ), o el coste promedio de conductores por usuario transportado (recurriendo a las variables del modelo  $q_{ryijk}^{ms}$  y  $NH_{ij}$ ).

En cuanto a los gastos o costes totales de explotación, aunque evidentemente existen otros centros de coste adicionales a los expuestos, se debe tener en cuenta que las dos principales partidas corresponden con diferencia a los costes de personal (mayoritarios) y al aprovisionamiento y consumo de fuentes secundarias de energía, de tal forma que la suma de ambas partidas (con la conveniente posibilidad de añadir además el coste anualizado de incorporación o renovación de la flota) puede tomarse como un indicador bastante útil para comparar los gastos o costes totales de explotación de cada uno de los modos de transporte público bajo estudio. Al igual que en los casos anteriores, estos gastos o costes totales (o 'cuasitotales') pueden promediarse fácilmente por viajero transportado o por kilómetro recorrido.

### 8.6.2.5. Financiación

El análisis de la financiación del servicio de transporte público se limitaría, en lo que atañe directamente a las potencialidades del modelo para la generación de resultados, a los ingresos por recaudación directa de las tarifas abonadas por los usuarios. Así, para cada escenario con su correspondiente modo de transporte público, los resultados del modelo permitirían realizar una previsión estimativa de la recaudación tarifaria anual en función de los volúmenes de usuarios pronosticados (dados por la variable  $q_{ryijk}^{ms}$  con  $m \in \{0, R, B\}$ ), y de datos de entrada del propio modelo como los precios de las diferentes clases de tarifa asignados a cada modo (variable  $far_n^m$ ) y las proporciones de uso de cada una de esas modalidades tarifarias (variable  $Pfar_{nijk}$ ). Por consiguiente, los ingresos recaudados a lo largo de un determinado año en una línea, durante una cierta franja horaria de operación y en un sentido determinado de viaje, se calcularían a través de la expresión  $(\sum_n Pfar_{nijk} \cdot far_n^m) \cdot q_{ryijk}^{ms} \cdot NH_{ij}$ , donde el subíndice  $n$  representa cada una de las modalidades tarifarias que se contemplan. Agregando estos resultados para los distintos sentidos de viaje (si son dos por el tipo de línea), y para los diferentes períodos o franjas horarias, se obtendrían los ingresos anuales en esa línea, que sumados en las líneas del conjunto o subconjunto de la red que sea objeto de estudio proporcionarían los ingresos totales por recaudación tarifaria atribuibles a la explotación de dichas líneas.

Asimismo, a partir del resultado anterior sería posible calcular algunos índices adicionales, como la tasa de cobertura de la recaudación tarifaria sobre los costes de explotación (o, más bien, sobre una aproximación a los mismos), o los promedios de ingresos tarifarios por kilómetro útil recorrido, por hora en servicio y por vehículo o unidad de transporte disponible.

### 8.6.3. Cálculo del excedente de los viajeros (excedente del consumidor)

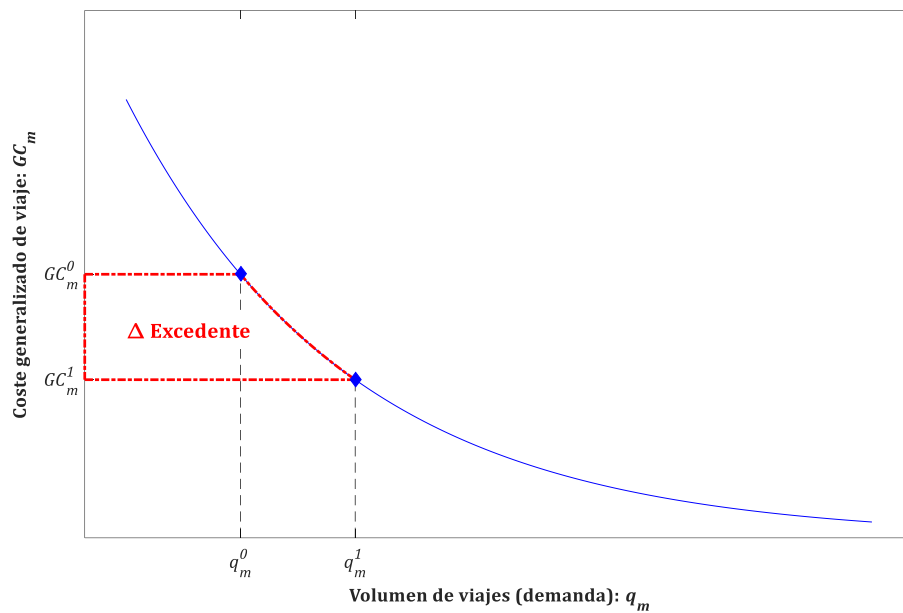
#### 8.6.3.1. Principios fundamentales y formulación general

Los beneficios o aumentos de bienestar o satisfacción recibidos de forma directa por los usuarios o viajeros que hacen utilización en sus desplazamientos de una determinada red de transporte como

consecuencia de un proyecto, intervención o política que conlleve una mejora de las condiciones de viaje en dicha red (tiempos, costes monetarios, comodidad, etc.), se definen cuantitativamente a través del concepto de excedente del consumidor. Este concepto procede de la terminología económica general. En el ámbito del transporte, puede definirse el excedente del consumidor como la parte de la disposición a pagar del individuo por realizar un viaje específico que excede del coste generalizado realmente afrontado, siendo la disposición a pagar la máxima cantidad de costes que, trasladados a unidades monetarias equivalentes, el individuo estaría predispuesto a asumir por efectuar el viaje en particular, y el coste generalizado la cantidad de unidades monetarias equivalentes representativa de la desutilidad total (conjunto de inconveniencias o desincentivos) efectivamente percibida al realizar el viaje mediante un determinado modo de transporte (EC-DGRP, 2008: p. 78).

Puesto que en el caso del transporte de viajeros —tal como es objeto de estudio en esta tesis e independientemente de que sea producido por cuenta ajena o por cuenta propia— el bien o servicio ‘consumido’ es el propio viaje, se ha particularizado el término genérico ‘excedente del consumidor’ como ‘excedente del viajero’. De forma aclaratoria, se puede redefinir este como la diferencia entre la máxima disposición a pagar del individuo por ver satisfecha la necesidad de desplazarse a su destino (como actividad intermedia para dar cumplimiento al motivo de su viaje, que es el verdadero generador de esa disposición a pagar), y el total de costes particulares y componentes de desutilidad (es decir, el coste generalizado) en los que efectivamente se ha de incurrir para la realización de dicho desplazamiento. El excedente del viajero es por tanto una medida del beneficio personal —a modo de aumento de satisfacción o bienestar— obtenido por el individuo con la realización del viaje. Lógicamente, de acuerdo a la teoría del comportamiento racional, solo se llevan a cabo aquellos viajes en los que existe (es mayor o, en el límite, igual a 0) excedente del viajero, quedando sin realizarse todos aquellos otros potenciales desplazamientos en los que el hipotético excedente del viajero resultaría, en caso de sí producirse el viaje, negativo.

En su forma más simple de cálculo, en la que se asume un enfoque de análisis unimodal (se contempla un ‘mercado primario’ formado únicamente por el modo de transporte sobre el que directamente se actúa), el cambio en el excedente agregado de los viajeros producido por un determinado proyecto o intervención es comúnmente estimado mediante la aplicación directa de la denominada ‘regla de la mitad’ (de Rus *et al.*, 2006: p. 37; EC-DGRP, 2008: p. 78; de Rus *et al.*, 2010: pp. 48-49; DfT, 2017c: pp. 1-2). Dada una determinada función inversa de demanda (es decir, aquella que proporciona en el eje de ordenadas el coste generalizado correspondiente a un determinado volumen de viajes, representado este en el eje de abscisas, tal como puede observarse en la Figura 8.23), por definición teórica el excedente agregado de los viajeros viene dado por el área situada bajo la curva de demanda y por encima del coste generalizado de equilibrio. En la situación inicial, sin proyecto o intervención, se asume un coste generalizado de viaje (en el modo  $m$ ) de valor  $GC_m^0$ , al cual corresponde un volumen de viajes (demanda)  $q_m^0$  en dicho modo (nótese que las variables referidas a la situación sin proyecto o intervención se denotan aquí con el superíndice 0, mientras que se utilizará el superíndice 1 para hacer referencia a las variables que corresponden a la situación con proyecto o intervención). Así pues, tras el proyecto o intervención, si el coste generalizado de viaje se ha reducido, como consecuencia de las mejoras implantadas en la oferta, hasta un valor  $GC_m^1$ , el volumen de viajes o demanda habrá aumentado hasta  $q_m^1$  (inversamente, el volumen de viajes habría disminuido si el coste generalizado con el proyecto o intervención resultase superior al de la situación sin proyecto o intervención). El incremento en el excedente agregado de los viajeros entre las dos situaciones (véase Figura 8.23) vendrá dado entonces por el aumento del área situada bajo la curva de demanda y por encima del coste generalizado al pasar del punto de equilibrio inicial  $(q_m^0, GC_m^0)$  al punto de equilibrio final  $(q_m^1, GC_m^1)$ . La regla de la mitad asume implícitamente la linearización de la curva de demanda entre estos dos puntos, por lo que su validez o precisión será mayor si los cambios de coste generalizado son relativamente pequeños.



**Figura 8.23.** Ejemplo genérico del cálculo del cambio o variación en el excedente de los viajeros (excedente del consumidor) para un modo de transporte.

Una interpretación o explicación complementaria de la regla de la mitad se basa en que, para los  $q_m^0$  viajes preexistentes (aquellos que se efectuarían en el modo  $m$  de todas formas, se realice el proyecto o intervención o no), los respectivos viajeros reciben como excedente o beneficio del proyecto o intervención la totalidad de la disminución del coste generalizado (es decir,  $GC_m^0 - GC_m^1$ ), ya que en todos estos viajes la disposición a pagar es superior a  $GC_m^0$ . Por su parte, para el conjunto de nuevos viajes que solo se realizarán en el modo  $m$  si efectivamente se implementa el proyecto o intervención (cuyo número viene dado por la diferencia  $q_m^1 - q_m^0$ ), e independientemente de que se trate de viajes procedentes de otros modos de transporte (cambio modal) o de viajes inducidos o de nueva generación (que no tendrían lugar sin el proyecto o intervención), el excedente del viajero varía (siguiendo la forma de la curva de demanda) entre la totalidad de la reducción de coste generalizado (para el ‘primer’ viaje adicional, por el que la disposición a pagar es prácticamente igual a  $GC_m^0$ ) y un valor nulo (para el ‘último’ viaje adicional, por el que la disposición a pagar es prácticamente igual a  $GC_m^1$ ). Esto implica que, de forma agregada, el excedente recibido por cada uno de estos nuevos viajes es, de media, igual a la mitad de la disminución total del coste generalizado, es decir,  $\frac{1}{2} \cdot (GC_m^0 - GC_m^1)$ . Nótese, no obstante, que en la obtención de este valor medio también se está asumiendo igualmente la linealización de la curva de demanda entre estos dos puntos, de forma que la disposición a pagar por cada uno de estos viajes se asume uniformemente distribuida entre  $GC_m^1$  y  $GC_m^0$  (o, lo que es lo mismo, el excedente por viaje se distribuye uniformemente entre 0 y  $GC_m^0 - GC_m^1$ ).

En síntesis, supuesto un análisis unimodal con una actuación directa sobre un determinado modo  $m$  de transporte, el cambio en el excedente agregado o acumulado de los viajeros usuarios de este modo  $m$  ( $\Delta CS_m$ ) producido por el proyecto o intervención se estima, de acuerdo a la regla de la mitad, según la siguiente ecuación:

$$\Delta CS_m \cong \frac{1}{2} \cdot (GC_m^0 - GC_m^1) \cdot (q_m^0 + q_m^1) \tag{8.94.a}$$

No obstante, la aplicabilidad de la regla de la mitad puede ser extendida a redes o situaciones más complejas, entre las que se encuentran un enfoque o análisis de tipo multimodal (es decir, con funciones de demanda interdependientes entre distintos modos y con efectos cruzados entre las demandas y costes generalizados de las diferentes opciones modales, por ejemplo por descongestión de un modo de

transporte tras un trasvase modal a otro), la consideración de multiplicidad de orígenes y destinos en una red, etc. (véanse, entre otros, Nellthorp y Hyman (2001); Small y Verhoef (2007: p. 183); DFT (2017c: p. 2)).

Por su estrecha relación con el modelo desarrollado en la presente tesis, resulta de particular interés el caso del análisis multimodal, en el cual se contempla que un proyecto o intervención sobre un determinado tipo de opción modal (el transporte público en el caso de esta tesis) puede tener repercusiones no solamente en el coste generalizado de dicho tipo de transporte, sino también en el de otras opciones alternativas, con sus correspondientes efectos cruzados en la demanda. Bajo este enfoque, la variación en el excedente agregado o acumulado de todos los viajeros del sistema multimodal formado por un conjunto  $A$  de alternativas u opciones modales ( $\Delta CS_A$ ), a consecuencia de un determinado proyecto o intervención sobre dicho sistema, puede ser calculada mediante la aplicación de la regla de la mitad extendida —como sumatorio— a todas las opciones modales en las que se produzca una modificación del coste generalizado de viaje. Es decir:

$$\Delta CS_A \cong \sum_{m \in A} \frac{1}{2} \cdot (GC_m^0 - GC_m^1) \cdot (q_m^0 + q_m^1) \quad (8.94.b)$$

Sin embargo, la aplicabilidad de la ecuación 8.94.b está sometida en la práctica a ciertas limitaciones o restricciones. Tal es el caso de aquellos proyectos o intervenciones que introducen una alternativa totalmente nueva (que además no reemplaza o sustituye a alguna de las anteriores que pueda ser considerada como asimilable), de forma que se produce un cambio en el número de alternativas disponibles (nótese que para estas nuevas alternativas no están definidos, en la situación sin proyecto o intervención, ni el coste generalizado  $GC_m^0$  ni el volumen de viajes  $q_m^0$ ).

Así pues, una alternativa al uso de expresiones similares a la ecuación 8.94.b —basadas en la aplicación por separado de la regla de la mitad a diferentes alternativas y la posterior suma de resultados— se derivaría de la utilización de las funciones de tipo '*logsum*' (logaritmo natural de la suma de las exponenciales de las utilidades de las alternativas) como medida de evaluación del beneficio percibido por el individuo ante la situación de elección y, consecuentemente, del excedente del consumidor o viajero. El uso de la función '*logsum*' como medida de evaluación presenta una mayor versatilidad y consistencia que expresiones del tipo de la ecuación 8.94.b, ya que permite considerar nuevas alternativas (inexistentes en la situación sin proyecto) y, por tanto, cambios en el número de opciones del conjunto disponible de elección.

El empleo del concepto de '*logsum*' como medida de la utilidad esperable por un individuo ante un determinado conjunto de elección (Williams, 1977; Small y Rosen, 1981; Kohli y Daly, 2006; de Jong *et al.*, 2007; Small y Verhoef, 2007: pp. 23-25) se desarrolla a partir del campo de los modelos de elección discreta y, en particular, es aplicable a aquellos modelos con una forma funcional de tipo logit. No obstante, la conveniencia de la función '*logsum*' como medida de interés para la evaluación del excedente del viajero puede ser extendida, a través del concepto de coste compuesto de viaje (*composite cost*), a modelos sintéticos agregados de distribución y de reparto modal —o modelos gravitacionales— como el representado genéricamente en la ecuación 4.1 (que sirve de base para el desarrollo del modelo de demanda de viajes de esta tesis). En estos casos, el nexo de relación entre variaciones de utilidad y cambios de coste generalizado viene dado a través del parámetro  $\lambda_n$  (parámetro de sensibilidad del reparto modal a las diferencias de coste generalizado en el modelo sintético agregado), que a su vez es representativo, en los modelos de elección discreta, de la utilidad marginal del ingreso (dada una determinada escala de utilidad en función de la variabilidad o dispersión de las elecciones) para el individuo  $n$  o, en general, para cualquier individuo del correspondiente segmento o categoría  $n$  (véase, con más detalle, el epígrafe 4.5).

Así pues, la variación del excedente del consumidor para un solo viaje que sería realizado por el individuo  $n$  ( $\Delta CS_n$ ) —o por cualquier individuo del segmento o categoría  $n$ — en las situaciones sin

proyecto y con proyecto, puede ser estimada en el caso del modelo sintético agregado mediante una formulación análoga a la desarrollada para los modelos logit de elección discreta (véase esta última por ejemplo en de Jong *et al.*, 2007), introduciendo para ello la relación entre cambios de utilidad representativa y cambios de coste generalizado dada por la igualdad situada en la parte derecha de la ecuación 4.48.b. De esta forma se tiene, por tanto:

$$\begin{aligned} \Delta CS_n &= \left[ \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A^1} \exp(-\lambda_n \cdot GC_{mn}^1) \right) + C \right] - \left[ \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A^0} \exp(-\lambda_n \cdot GC_{mn}^0) \right) + C \right] = \\ &= K_n^0 - K_n^1 = \frac{-1}{\lambda_n} \cdot \left[ \ln \left( \sum_{m \in A^0} \exp(-\lambda_n \cdot GC_{mn}^0) \right) - \ln \left( \sum_{m \in A^1} \exp(-\lambda_n \cdot GC_{mn}^1) \right) \right] \end{aligned} \quad (8.95)$$

con:  $A^0 = \{m_1^0, m_2^0, m_3^0, \dots, m_N^0\}$ ,  $A^1 = \{m_1^1, m_2^1, m_3^1, \dots, m_M^1\}$

donde  $A^0$  y  $A^1$  simbolizan el conjunto de alternativas disponibles en las situaciones sin y con proyecto o intervención, respectivamente;  $GC_{mn}^0$  y  $GC_{mn}^1$  son el coste generalizado de la alternativa modal  $m$  para el individuo  $n$  (o para cualquier individuo del segmento o categoría  $n$ ) en las situaciones sin y con proyecto o intervención; y  $K_n^0$  y  $K_n^1$  representan el coste compuesto de viaje (véase también ecuación 4.2) para el individuo  $n$  (o, en su caso, para cualquier individuo del segmento o categoría  $n$ ) en las respectivas situaciones sin y con proyecto o intervención. Por su parte,  $C$  es una constante de valor desconocido que, al afectar en todo caso por igual a las situaciones con y sin proyecto o intervención, se anula al calcular la variación del excedente del viajero. La presencia de esta constante responde al hecho de que ni el valor de la utilidad ni el de los correspondientes costes equivalentes pueden ser determinados en términos absolutos (solo las diferencias son relevantes).

Una vez que se ha determinado la variación del excedente del viajero para un desplazamiento que sería indistintamente realizado tanto en la situación con proyecto o intervención como sin proyecto o intervención (siendo dicha variación del excedente igual a la disminución del coste compuesto de viaje, tal como se observa en la ecuación 8.95), para calcular el excedente agregado de los viajeros producido por dicho proyecto o intervención es necesario contemplar también la contribución de aquellos nuevos viajes que se producirían gracias a la implantación del proyecto o intervención pero que no se habrían efectuado sin este (es decir, aquellos viajes para los cuales la disposición a pagar se sitúa en un valor comprendido entre  $K^0$  y  $K^1$ ). Para ello cabe considerar los mismos principios que se señalaron anteriormente para la justificación de la regla de la mitad, pero aplicados al coste compuesto de viaje del conjunto de alternativas u opciones modales (en lugar de al coste generalizado de cada opción), y al volumen total de demanda de viajes en el conjunto de alternativas u opciones modales (en lugar de a los volúmenes de viajes propios de cada opción o alternativa). Se obtiene por tanto, como alternativa más versátil a la ecuación 8.94.b, la siguiente formulación:

$$\Delta CS_A \cong \frac{1}{2} \cdot (K^0 - K^1) \cdot (Q^0 + Q^1) \quad (8.96.a)$$

siendo  $K^0$  y  $K^1$  los costes compuestos de viaje en las situaciones sin y con proyecto o intervención, calculados del siguiente modo:

$$K^0 = \frac{-1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A^0} \exp(-\lambda \cdot GC_m^0) \right) \quad (8.96.b.i)$$

$$K^1 = \frac{-1}{\lambda} \cdot \ln \left( \sum_{m \in A^1} \exp(-\lambda \cdot GC_m^1) \right) \quad (8.96.b.ii)$$

y  $Q^0$  y  $Q^1$  los volúmenes totales de viajes en el conjunto disponible de alternativas u opciones modales ( $A^0$  y  $A^1$  respectivamente) en las situaciones sin y con proyecto o intervención, es decir:

$$Q^0 = \sum_{m \in A^0} q_m^0 \quad (8.96.c.i)$$

$$Q^1 = \sum_{m \in A^1} q_m^1 \quad (8.96.c.ii)$$

### 8.6.3.2. Aplicación al modelo

La variable  $\Delta CS_{ryijk}^s$  indica para la simulación aleatoria  $r$  el cambio en el excedente agregado de los viajeros (genéricamente consumidores) generado, a lo largo de todo el año  $y$ , por la implementación del proyecto planteado en el escenario  $s$  (con  $s=R$  o  $s=B$ ), en comparación con el escenario de referencia o escenario base (escenario '0'), para el caso de los viajes desarrollados sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea  $i$ , durante el período horario  $j$  y en el sentido  $k$ .

La variable  $\Delta CS_{ryijk}^s$  se expresa en el modelo en unidades monetarias constantes [CU] (por año).

Para el cálculo de la variable  $\Delta CS_{ryijk}^s$  podría plantearse en el modelo una formulación basada en la ecuación 8.96.a, dada la versatilidad y validez general de la misma. No obstante, para el caso particular planteado en dicho modelo también resulta aplicable la ecuación 8.94.b, ya que en ningún momento se produce un cambio en el número de alternativas modales disponibles. En este sentido, se debe tener en cuenta que las modificaciones directamente introducidas por las situaciones con proyecto (escenarios 'R' y 'B') se producen sobre la alternativa que es considerada genéricamente como opción de transporte público, aunque esta se materialice según el escenario y el año como metro ligero o tranvía, como BHLS o BRT o como autobús convencional en tráfico mixto, donde, en el caso de los escenarios 'R' y 'B', uno de los dos primeros modos de transporte público sustituye o reemplaza al autobús convencional. Por tanto, dada la estructura planteada para el modelo, estos tres modos pueden considerarse como tres expresiones particulares de una misma alternativa genérica de viaje (la opción de transporte público), de forma que sus costes generalizados y volúmenes de viajes son comparables entre escenarios.

Además, la forma de la ecuación 8.94.b presenta, en la práctica, la ventaja de que permite desglosar o diferenciar, de una forma más explícita, la atribución de los cambios totales en el excedente de los viajeros generados por un proyecto o intervención a los distintos modos de transporte en los que se ha alterado el coste generalizado de realizar el viaje en dicha opción modal. De hecho, en las guías TAG (*Transport Analysis Guidance*) del Departamento de Transportes del Reino Unido (DfT), se propone este tipo de desglose y atribución de beneficios de los viajeros basado en modos de transporte, utilizando para ello la regla de la mitad aplicada a nivel de cada modo (DfT, 2017c: p. 3).

Con respecto a las alternativas modales que deban ser incorporadas al cálculo del cambio en el excedente de los viajeros según la formulación dada por la ecuación 8.94.b, resulta inmediato que una de ellas ha de ser la opción de transporte público, sobre la cual se interviene directamente. Esta opción, definida de forma genérica, puede particularizarse dependiendo del escenario y del año del horizonte o período de evaluación en forma de metro ligero o tranvía, de BHLS o BRT, o de autobús convencional en tráfico mixto, calculándose directamente la diferencia de costes generalizados de viaje en las distintas situaciones, y multiplicando dicha diferencia por la media de los volúmenes de viajes en transporte público en las situaciones con y sin proyecto.

También se producen diferencias entre escenarios en el coste generalizado de viaje de los modos de transporte motorizado privado, tanto automóvil particular como moto o ciclomotor, debido fundamentalmente a la acción conjunta de los cambios en el volumen o intensidad de tráfico mixto y en la capacidad viaria. Debido a la estructura incremental que en el modelo se ha utilizado para los costes generalizados de estas dos alternativas modales, las diferencias de coste entre escenarios existentes en un año determinado han de ser calculadas de forma acumulativa, es decir, sumando las diferencias que

se han ido produciendo a lo largo de todos los años precedentes, hasta llegar al año en cuestión. En este sentido, debe tenerse en cuenta que todos los escenarios parten de una situación común (la del año base), de forma que el coste generalizado inicial de la opción (es decir, aquel que corresponda al año base) queda anulado al calcular cualquier diferencia entre escenarios.

En el caso de las opciones modales no motorizadas y de ‘micromovilidad’ (bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viaje a pie), por las propias condiciones de diseño del modelo, no hay diferencias de coste generalizado entre los distintos escenarios. Es decir, para cualquiera de estas dos alternativas el factor  $GC_m^0 - GC_m^1$  (con  $m=V$  o  $m=P$ ) de la ecuación 8.94.b es siempre igual a 0 en el modelo, de forma que en estas dos opciones modales no se producen cambios en el excedente de los viajeros entre escenarios.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que, dado un determinado corredor, eje o itinerario, tipo de período horario y sentido de viaje, para obtener el cambio en el excedente agregado de los viajeros generado bajo dichas condiciones a lo largo de un año completo, es necesario multiplicar la aportación producida por cada hora (recuérdese que en el modelo la variable  $q_{ryijk}^{ms}$  es expresada en personas (viajes) por hora [prs/h]) por el número de horas anuales asignadas al tipo de período horario en cuestión (variable  $NH_{ij}$  del modelo).

En conclusión, en cada simulación aleatoria, el cambio en el excedente agregado de los viajeros generado por los proyectos planteados en los escenarios ‘R’ y ‘B’ a lo largo de un año puede ser calculado en el modelo, para cada corredor, eje o itinerario, tipo de período horario y sentido de viaje, mediante la ecuación 8.97. Nótese que en dicha ecuación el primer sumando corresponde a los cambios de excedente atribuibles a los viajes en transporte público, el segundo sumando a los viajes en automóvil particular y el tercero a los viajes en moto o ciclomotor.

$$\begin{aligned} \Delta CS_{ryijk}^s = & \left[ \frac{1}{2} \cdot (GC_{ryijk}^{00} - GC_{ryijk}^{ms}) \cdot (q_{ryijk}^{00} + q_{ryijk}^{ms}) + \frac{1}{2} \cdot \left( \sum_{l=1}^y (\Delta GC_{rlijk}^{C0} - \Delta GC_{rlijk}^{Cs}) \right) \cdot (q_{ryijk}^{C0} + q_{ryijk}^{Cs}) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \cdot \left( \sum_{l=1}^y (\Delta GC_{rlijk}^{M0} - \Delta GC_{rlijk}^{Ms}) \right) \cdot (q_{ryijk}^{M0} + q_{ryijk}^{Ms}) \right] \cdot NH_{ij} \end{aligned} \quad (8.97)$$

con:

$$r = 1, 2, \dots, Nrs ; s \in \{R, B\} ; y = 1, 2, 3, \dots, Yap ; m = \begin{cases} =0 & \text{si } s=R \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^R \\ =R & \text{si } s=R \wedge Yimp_r^R + 1 \leq y \leq Yap \\ =0 & \text{si } s=B \wedge 1 \leq y \leq Yimp_r^B \\ =B & \text{si } s=B \wedge Yimp_r^B + 1 \leq y \leq Yap \end{cases} ;$$

$$i = 1, 2, \dots, NL ; j = 1, 2, \dots, Nper_i ; k = \begin{cases} =1, 2 & \text{si } TypL_i = LT \vee TypL_i = RT \\ =1 & \text{si } TypL_i = RO \end{cases}$$

Por último, ha de indicarse que para obtener el cambio en el excedente total de los viajeros generado cada año en un determinado corredor, eje o itinerario (es decir, por una determinada línea de transporte público en la que se proyectase implantar un sistema de capacidad intermedia), bastaría con agregar los resultados parciales correspondientes a cada período horario y a cada sentido de viaje (esto último en el caso habitual de líneas de doble sentido). Por tanto, simplemente habría que calcular el sumatorio de la variable  $\Delta CS_{ryijk}^s$  sobre los índices  $j$  y  $k$ .



## 9. Ejemplo práctico de aplicación numérica

### 9.1. INTRODUCCIÓN

Una vez expuesto en su totalidad el modelo planteado en la tesis, en este capítulo se propone el desarrollo de un ejemplo de ejecución numérica en el que se lleve a la práctica dicho modelo, aplicándolo sobre una línea de transporte público. Aunque este ejemplo de aplicación numérica se desarrolla en base a un conjunto de datos que han sido diseñados artificialmente (es decir, sin ser tomados de ningún caso real en concreto), se ha procurado, a la hora de seleccionar sus valores, que puedan resultar representativos de situaciones en las que tenga sentido plantear, de manera justificada, la posible implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia como sustitución de una línea análoga de autobús convencional en tráfico mixto. De esta forma los resultados obtenidos permitirán extraer —aunque con ciertas limitaciones y sin perder de vista que se trata únicamente de un caso particular— conclusiones orientativas para la evaluación comparativa entre modos ferroviarios urbanos (metro ligero o tranvía) y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT).

Así pues, el capítulo comienza con la especificación detallada de los valores dados en este ejemplo de aplicación a todas las variables de entrada utilizadas como datos del modelo. De conformidad con la estructura de datos planteada en el Capítulo 5, los valores de las variables de entrada se presentan ordenados por áreas temáticas, según se relacionen con la configuración física de las líneas de transporte público, con los vehículos o unidades de transporte, con la operación y explotación del servicio, con el rendimiento operativo de los modos de transporte público, con la utilización o demanda actual de las líneas, con los horizontes temporales y la división en fases o etapas, con la caracterización de la movilidad y del reparto modal, con las condiciones de circulación de los vehículos motorizados en el tráfico mixto, con las características de los viajes realizados en vehículo motorizado privado, con los costes unitarios relativos al tiempo de viaje, con los costes unitarios relacionados con el consumo de energía en vehículos particulares, con los posibles cambios en otros costes modales, con la obtención de parámetros del modelo de demanda, y con la ejecución numérica del modelo.

A continuación, tras haber procedido a la ejecución computacional del modelo desarrollado, aplicado al ejemplo propuesto, se pasará a la fase de exposición y análisis de resultados, donde los resultados obtenidos para las múltiples simulaciones aleatorias del modelo y para los sucesivos años del horizonte o período de evaluación son tratados estadísticamente, representados gráficamente, e interpretados en relación con las características del caso analizado. En este sentido, se analizarán, además de algunos de los cálculos preliminares del modelo, los principales resultados concernientes a atributos del nivel de servicio en transporte público, a las condiciones de circulación en vehículo motorizado privado, a los costes generalizados de viaje en las distintas opciones modales, a los volúmenes de viajes previsiblemente efectuados en cada modo de transporte, al reparto modal resultante, y a las características de explotación del transporte público.

Finalmente, se estudiarán las principales conclusiones que puedan extraerse del ejemplo de aplicación numérica planteado en este capítulo, para lo que resulta preciso analizar en primer lugar los cambios que los proyectos de implantación de los nuevos sistemas de transporte público de capacidad intermedia generarían, con respecto al escenario base, en el excedente agregado de los viajeros (es decir, en el beneficio personal neto obtenido por el conjunto de individuos en la realización de sus viajes). También se procederá al análisis desglosado de dichos cambios de excedente de acuerdo a la contribución de cada uno de los modos de transporte en los que se haya alterado el coste generalizado

de realizar el viaje. En último término, se culminará el análisis con las principales conclusiones preliminares que, en referencia a este ejemplo particular de aplicación, sea posible extraer en relación con la rentabilidad socioeconómica de los sistemas de capacidad intermedia y con la evaluación comparativa de modos ferroviarios urbanos y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada.

## 9.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS (VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA)

### 9.2.1. Características básicas de la línea de transporte público

- Número de líneas a analizar

$$NL = 1$$

- Tipología de la línea

$$TypL_1 = LT \text{ (convencional, longitudinal de doble sentido)}$$

Por lo que respecta al recorrido de la línea en relación con la estructura territorial del área urbana o metropolitana, se asume que se trata de una línea de tipo diametral.

- Longitud de la línea

$$L_1 = 10 \text{ (km)}$$

- Número de paradas o estaciones

$$Nst_1 = 23$$

- Localización (coordenada longitudinal) de las paradas o estaciones a lo largo de la línea

$$s_{1n} = \begin{bmatrix} 0.55 & 1.10 & 1.60 & 2.10 & 2.55 & 3.00 & 3.45 & 3.85 & 4.25 & 4.65 & 5.00 & 5.35 & 5.75 & 6.15 & 6.55 & 7.00 & 7.45 & 7.90 \\ 8.40 & 8.90 & 9.45 \end{bmatrix}_{1 \times 21} \text{ (km)}$$

La separación media entre paradas resultante de la longitud de la línea y del número de paradas o estaciones es de 454.5 m.

- Proporción de paradas entrantes o en bahía (en autobús convencional en tráfico mixto)

$$ols_{1k} = \begin{bmatrix} 0.391 & 0.435 \end{bmatrix}$$

En la Figura 9.1 se representa gráficamente un esquema simplificado de la línea de transporte público que ha sido propuesta como objeto de análisis para el ejemplo de aplicación numérica llevado a cabo en este capítulo.

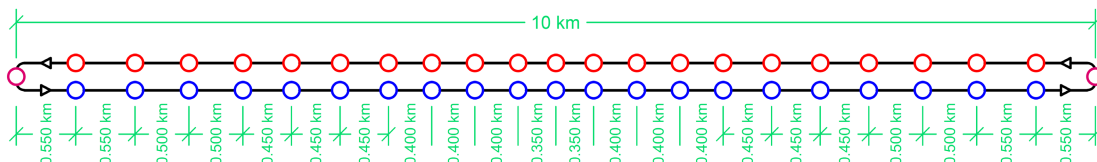


Figura 9.1. Representación esquematizada de la línea de transporte público objeto de análisis.

### 9.2.2. Características básicas de los vehículos o unidades de transporte público

Con respecto a los tipos de vehículos cuya potencial utilización se plantea para cada uno de los posibles modos de transporte público, se indican de inicio las siguientes características generales:

- Autobús convencional en tráfico mixto ( $m=0$ ): autobús convencional articulado de 18 m de longitud (aprox.).
- Metro ligero o tranvía ( $m=R$ ): LRV o tranvía con una longitud comprendida en el rango entre 32 y 37 m (bidireccional; 5 módulos / 3 bogies; 2650 mm de anchura).
- BHLS o BRT ( $m=B$ ): autobús BRT biarticulado de 24 m de longitud (aprox.)<sup>261</sup>.

- Densidad de pasajeros de pie de referencia para la definición de la capacidad estática

$$D_{ref} = 4 \text{ (prs/m}^2\text{)}$$

- Capacidad estática de las unidades de transporte

$$CAPu_1^0 = 104 \text{ ; } CAPu_1^R = 212 \text{ ; } CAPu_1^B = 140$$

- Número de plazas de asiento en las unidades de transporte

$$Nse_1^0 = 37 \text{ ; } Nse_1^R = 68 \text{ ; } Nse_1^B = 52$$

- Número limitante de canales de paso (de entrada o de salida) en las unidades de transporte

$$Ndc_1^0 = 1 \text{ ; } Ndc_1^R = 5 \text{ ; } Ndc_1^B = 3$$

- Aceleración de las unidades de transporte o vehículos

$$a_1^R = 1.25 \text{ (m/s}^2\text{)} \text{ ; } a_1^B = 1.08 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

- Deceleración de las unidades de transporte o vehículos

$$b_1^R = 1.25 \text{ (m/s}^2\text{)} \text{ ; } b_1^B = 1.18 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

- Para cada sistema de transporte público, índice identificativo del tipo de vehículo o unidad de transporte asignado a la línea

$$TypV_1^0 = 1 \text{ ; } TypV_1^R = 1 \text{ ; } TypV_1^B = 1$$

- Porcentaje de vehículos o unidades de transporte para reserva y mantenimiento o reparación

$$\rho_{min}^0 = 12.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{max}^0 = 25.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{mod}^0 = 18.5 \text{ (\%)}$$

$$\rho_{min}^R = 8.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{max}^R = 18.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{mod}^R = 13.0 \text{ (\%)}$$

$$\rho_{min}^B = 12.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{max}^B = 22.0 \text{ (\%)} \text{ ; } \rho_{mod}^B = 17.0 \text{ (\%)}$$

### 9.2.3. Características básicas de la operación y explotación del servicio de transporte público

- Número de períodos horarios diferenciados

$$Nper_1 = 6$$

<sup>261</sup> Aunque no afecta a los cálculos efectuados por el modelo, en el caso de la opción BHLS o BRT debe considerarse la posibilidad de incorporar vehículos propulsados mediante formas de energía alternativas a las convencionales en autobuses: electricidad de la red (*trolley*), gas natural comprimido (GNC/CNG), autobuses eléctricos recargables, híbridos diésel-eléctricos, híbridos pila de combustible - eléctrico, etc.

- Horas anuales asignadas a cada período horario de operación

$$NH_{1j} = [875 \ 1000 \ 875 \ 1000 \ 750 \ 2070] \text{ (h/a)}$$

Horas anuales de funcionamiento del servicio:  $\sum_{j=1}^{N_{per_1}} NH_{1j} = 6750 \text{ (h/a)}$

- Intervalo mínimo de diseño

$$Hmin_{1j}^0 = [2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00] \text{ (min)}$$

$$Hmin_{1j}^R = [2.33 \ 2.33 \ 2.33 \ 2.33 \ 2.33 \ 2.33] \text{ (min)}$$

$$Hmin_{1j}^B = [2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00 \ 2.00] \text{ (min)}$$

- Intervalo máximo (intervalo de servicio)

$$Hmax_{1j}^0 = [15 \ 25 \ 20 \ 15 \ 30 \ 30] \text{ (min)}$$

$$Hmax_{1j}^R = [15 \ 20 \ 15 \ 15 \ 25 \ 20] \text{ (min)}$$

$$Hmax_{1j}^B = [15 \ 20 \ 15 \ 15 \ 25 \ 20] \text{ (min)}$$

- Coeficiente de utilización de la capacidad programada

$$LF_{1jk}^0 = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.80 \\ 0.75 & 0.75 \\ 0.80 & 0.80 \\ 0.80 & 0.85 \\ 0.75 & 0.75 \\ 0.65 & 0.65 \end{bmatrix} ; LF_{1jk}^R = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.70 \\ 0.67 & 0.67 \\ 0.70 & 0.70 \\ 0.70 & 0.75 \\ 0.67 & 0.67 \\ 0.60 & 0.60 \end{bmatrix} ; LF_{1jk}^B = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.70 \\ 0.67 & 0.67 \\ 0.70 & 0.70 \\ 0.70 & 0.75 \\ 0.67 & 0.67 \\ 0.60 & 0.60 \end{bmatrix}$$

- Máxima velocidad programada u objetivo para cada tramo (en plataforma reservada)

$$Vg_{1nk}^R = Vg_{1nk}^B = \begin{bmatrix} 70 & 70 \\ \vdots & \vdots \\ 70 & 70 \text{ (n=4)} \\ \hline 50 & 50 \\ \vdots & \vdots \\ 50 & 50 \text{ (n=10)} \\ \hline 30 & 30 \\ 30 & 30 \\ \hline 50 & 50 \\ \vdots & \vdots \\ 50 & 50 \text{ (n=18)} \\ \hline 70 & 70 \\ \vdots & \vdots \\ 70 & 70 \text{ (n=22)} \end{bmatrix}_{22 \times 2} \text{ (km/h)}$$

- Precios de las diferentes modalidades de tarifa

Se plantea la representación de 5 modalidades tarifarias, que podrían sustanciarse del siguiente modo:  $n=1$ : billete sencillo con pago en metálico;  $n=2$ : bono ocasional para un determinado número de viajes (p. ej. bono de 10 viajes);  $n=3$ : tarjeta de transporte estándar o general;  $n=4$ : tarjeta de transporte con descuento social;  $n=5$ : transbordo con tarjeta de transporte.

$$far_n^0 = [1.30 \ 0.90 \ 0.75 \ 0.30 \ 0.10] \text{ (€)}$$

$$far_n^R = [1.40 \ 1.00 \ 0.80 \ 0.30 \ 0.00] \text{ (€)}$$

$$far_n^B = [1.35 \ 0.95 \ 0.80 \ 0.30 \ 0.00] \text{ (€)}$$

- Proporción de viajes en transporte público que son abonados mediante cada modalidad tarifaria

$$Pfar_{n1j1} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.13 & 0.07 & 0.06 & 0.18 & 0.21 \\ 0.06 & 0.13 & 0.09 & 0.07 & 0.15 & 0.19 \\ 0.60 & 0.49 & 0.53 & 0.59 & 0.47 & 0.40 \\ 0.14 & 0.12 & 0.13 & 0.14 & 0.09 & 0.07 \\ 0.16 & 0.13 & 0.18 & 0.14 & 0.11 & 0.13 \end{bmatrix} ; Pfar_{n1j2} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.12 & 0.07 & 0.04 & 0.19 & 0.23 \\ 0.07 & 0.14 & 0.08 & 0.07 & 0.15 & 0.20 \\ 0.59 & 0.49 & 0.54 & 0.61 & 0.48 & 0.38 \\ 0.12 & 0.11 & 0.14 & 0.13 & 0.08 & 0.05 \\ 0.17 & 0.14 & 0.17 & 0.15 & 0.10 & 0.14 \end{bmatrix}$$

#### 9.2.4. Parámetros relacionados con el rendimiento operativo de los modos de transporte público

- Tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior

$$pstnmin_{1jk}^0 = \begin{bmatrix} 2.75 & 3.25 \\ 3.75 & 3.75 \\ 3.25 & 3.25 \\ 3.25 & 2.75 \\ 3.75 & 3.75 \\ 4.25 & 4.25 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmax_{1jk}^0 = \begin{bmatrix} 5.25 & 5.75 \\ 6.25 & 6.25 \\ 5.75 & 5.75 \\ 5.75 & 5.25 \\ 6.25 & 6.25 \\ 6.75 & 6.75 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmod_{1jk}^0 = \begin{bmatrix} 4.00 & 4.50 \\ 5.00 & 5.00 \\ 4.50 & 4.50 \\ 4.50 & 4.00 \\ 5.00 & 5.00 \\ 5.50 & 5.50 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)}$$

$$pstnmin_{1jk}^R = \begin{bmatrix} 2.25 & 2.75 \\ 3.25 & 3.25 \\ 2.75 & 2.75 \\ 2.75 & 2.25 \\ 3.25 & 3.25 \\ 3.75 & 3.75 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmax_{1jk}^R = \begin{bmatrix} 4.25 & 4.75 \\ 5.25 & 5.25 \\ 4.75 & 4.75 \\ 4.75 & 4.25 \\ 5.25 & 5.25 \\ 5.75 & 5.75 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmod_{1jk}^R = \begin{bmatrix} 3.00 & 3.50 \\ 4.00 & 4.00 \\ 3.50 & 3.50 \\ 3.50 & 3.00 \\ 4.00 & 4.00 \\ 4.50 & 4.50 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)}$$

$$pstnmin_{1jk}^B = \begin{bmatrix} 2.50 & 3.00 \\ 3.50 & 3.50 \\ 3.00 & 3.00 \\ 3.00 & 2.50 \\ 3.50 & 3.50 \\ 4.00 & 4.00 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmax_{1jk}^B = \begin{bmatrix} 4.50 & 5.00 \\ 5.50 & 5.50 \\ 5.00 & 5.00 \\ 5.00 & 4.50 \\ 5.50 & 5.50 \\ 6.00 & 6.00 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)} ; pstnmod_{1jk}^B = \begin{bmatrix} 3.25 & 3.75 \\ 4.25 & 4.25 \\ 3.75 & 3.75 \\ 3.75 & 3.25 \\ 4.25 & 4.25 \\ 4.75 & 4.75 \end{bmatrix} \text{ (s/prs)}$$

- Factor de eficacia unitaria de los canales de paso

$$fdpmin_1^0 = fdpmax_1^0 = fdpmod_1^0 = 1 \rightarrow \text{Valor no aleatorio}$$

$$fdpmin_1^R = 0.59 ; fdpmax_1^R = 0.79 ; fdpmod_1^R = 0.69$$

$$fdpmin_1^B = 0.63 ; fdpmax_1^B = 0.85 ; fdpmod_1^B = 0.74$$

- Índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros

$$basmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.45 \\ 0.40 & 0.40 \\ 0.45 & 0.45 \\ 0.45 & 0.35 \\ 0.35 & 0.35 \\ 0.30 & 0.30 \end{bmatrix} ; basmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.75 \\ 0.70 & 0.70 \\ 0.75 & 0.75 \\ 0.75 & 0.65 \\ 0.65 & 0.65 \\ 0.60 & 0.60 \end{bmatrix} ; basmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.60 \\ 0.55 & 0.55 \\ 0.60 & 0.60 \\ 0.60 & 0.50 \\ 0.50 & 0.50 \\ 0.45 & 0.45 \end{bmatrix}$$

- Tiempo medio por parada para las operaciones de apertura y cierre de puertas

$$octmin_1^0 = 2.00 \text{ (s)} ; octmax_1^0 = 5.00 \text{ (s)} ; octmod_1^0 = 3.50 \text{ (s)}$$

$$octmin_1^R = 2.50 \text{ (s)} ; octmax_1^R = 5.00 \text{ (s)} ; octmod_1^R = 3.75 \text{ (s)}$$

$$octmin_1^B = 2.00 \text{ (s)} ; octmax_1^B = 5.00 \text{ (s)} ; octmod_1^B = 3.50 \text{ (s)}$$

- Coeficiente de tiempo de terminales

$$\gamma min_{1j}^0 = [0.12 \ 0.09 \ 0.10 \ 0.12 \ 0.09 \ 0.09] ; \gamma max_{1j}^0 = [0.20 \ 0.15 \ 0.18 \ 0.20 \ 0.15 \ 0.15] ;$$

$$\gamma mod_{1j}^0 = [0.16 \ 0.12 \ 0.14 \ 0.16 \ 0.12 \ 0.12]$$

$$\gamma min_{1j}^R = [0.09 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.09 \ 0.08 \ 0.08] ; \gamma max_{1j}^R = [0.16 \ 0.14 \ 0.15 \ 0.16 \ 0.14 \ 0.14] ;$$

$$\gamma mod_{1j}^R = [0.12 \ 0.10 \ 0.11 \ 0.12 \ 0.10 \ 0.10]$$

$$\gamma min_{1j}^B = [0.10 \ 0.09 \ 0.09 \ 0.10 \ 0.09 \ 0.09] ; \gamma max_{1j}^B = [0.18 \ 0.15 \ 0.16 \ 0.18 \ 0.15 \ 0.15] ;$$

$$\gamma mod_{1j}^B = [0.14 \ 0.11 \ 0.12 \ 0.14 \ 0.11 \ 0.11]$$

### 9.2.5. Características básicas de la utilización (demanda) de la línea de transporte público

- Volumen inicial (año base) de viajes en transporte público

$$q_{1jk}^{*0} = \begin{bmatrix} 1700.00 & 1125.00 \\ 516.67 & 558.33 \\ 800.00 & 866.67 \\ 1050.00 & 1433.33 \\ 281.11 & 307.50 \\ 500.00 & 500.00 \end{bmatrix} \text{ (prs/h)}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de viajes al año en la línea de transporte público (sentido 1): } \sum_{j=1}^{Nper_1} q_{1j1}^{*0} \cdot NH_{1j} \cong 5,000,000 \text{ (pax/a)}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de viajes al año en la línea de transporte público (sentido 2): } \sum_{j=1}^{Nper_1} q_{1j2}^{*0} \cdot NH_{1j} \cong 5,000,000 \text{ (pax/a)}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de viajes al año en la línea de transporte público (total): } \sum_{j=1}^{Nper_1} \sum_{k=1}^2 q_{1jk}^{*0} \cdot NH_{1j} \cong 10,000,000 \text{ (pax/a)}$$

- Coeficiente de concentración relativa de pasajeros en la sección de máxima demanda

$$\sigma_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.58 \\ 0.46 & 0.52 \\ 0.63 & 0.54 \\ 0.56 & 0.66 \\ 0.41 & 0.45 \\ 0.50 & 0.45 \end{bmatrix}$$

- Coeficiente de compacidad del perfil de volúmenes de pasajeros a lo largo de la longitud de la línea

$$\delta_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.68 \\ 0.69 & 0.62 \\ 0.61 & 0.71 \\ 0.69 & 0.64 \\ 0.74 & 0.72 \\ 0.66 & 0.70 \end{bmatrix}$$

- Coeficiente de pico intrahorario o de hora punta

$$PHC_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.23 & 1.25 \\ 1.33 & 1.30 \\ 1.27 & 1.29 \\ 1.28 & 1.31 \\ 1.38 & 1.36 \\ 1.42 & 1.45 \end{bmatrix}$$

### 9.2.6. Horizontes temporales y datos para la división en fases o etapas

- Duración total del horizonte temporal o período de evaluación

$$Yap = 40 \text{ (años)}$$

- Velocidad media de avance en la implantación de los nuevos modos de transporte público

a) Metro ligero o tranvía:

$$Vimpmin_1^R = 1.33 \text{ (km/a)} ; Vimpmax_1^R = 2.67 \text{ (km/a)} ; Vimpmod_1^R = 2.00 \text{ (km/a)}$$

b) BHLS o BRT:

$$Vimpmin_1^B = 2.00 \text{ (km/a)} ; Vimpmax_1^B = 3.00 \text{ (km/a)} ; Vimpmod_1^B = 2.50 \text{ (km/a)}$$

- Duración de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio de transporte público

a) Metro ligero o tranvía:

$$Nicmin^R = 2.00 \text{ (años)} ; Nicmax^R = 4.00 \text{ (años)} ; Nicmod^R = 3.00 \text{ (años)}$$

b) BHLS o BRT:

$$Nicmin^B = 2.00 \text{ (años)} ; Nicmax^B = 4.50 \text{ (años)} ; Nicmod^B = 3.25 \text{ (años)}$$

### 9.2.7. Características generales de la movilidad y del reparto modal en los itinerarios o corredores afectados

- Proporción inicial (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público

$$Pcp^*_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.139 & 0.123 \\ 0.140 & 0.130 \\ 0.115 & 0.114 \\ 0.114 & 0.127 \\ 0.115 & 0.119 \\ 0.093 & 0.099 \end{bmatrix}$$

- Proporciones iniciales (año base) de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual

$$Pco^*_{1jk}^C = \begin{bmatrix} 0.090 & 0.098 \\ 0.050 & 0.053 \\ 0.079 & 0.081 \\ 0.094 & 0.088 \\ 0.179 & 0.176 \\ 0.064 & 0.064 \end{bmatrix} ; Pco^*_{1jk}^M = \begin{bmatrix} 0.006 & 0.006 \\ 0.003 & 0.003 \\ 0.006 & 0.005 \\ 0.006 & 0.006 \\ 0.003 & 0.003 \\ 0.003 & 0.003 \end{bmatrix} ; Pco^*_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} ; Pco^*_{1jk}^P = \begin{bmatrix} 0.020 & 0.019 \\ 0.015 & 0.014 \\ 0.018 & 0.017 \\ 0.021 & 0.021 \\ 0.021 & 0.021 \\ 0.013 & 0.013 \end{bmatrix}$$

- Reparto modal inicial (año base)

$$MS_{1jk}^{*0} = \begin{bmatrix} 0.232 & 0.205 \\ 0.254 & 0.237 \\ 0.200 & 0.198 \\ 0.190 & 0.211 \\ 0.153 & 0.158 \\ 0.135 & 0.142 \end{bmatrix}; MS_{1jk}^{*C} = \begin{bmatrix} 0.450 & 0.490 \\ 0.396 & 0.425 \\ 0.453 & 0.460 \\ 0.472 & 0.439 \\ 0.596 & 0.585 \\ 0.460 & 0.458 \end{bmatrix}; MS_{1jk}^{*M} = \begin{bmatrix} 0.039 & 0.042 \\ 0.032 & 0.034 \\ 0.044 & 0.043 \\ 0.044 & 0.046 \\ 0.031 & 0.032 \\ 0.048 & 0.045 \end{bmatrix};$$

$$MS_{1jk}^{*V} = \begin{bmatrix} 0.018 & 0.015 \\ 0.025 & 0.025 \\ 0.023 & 0.024 \\ 0.019 & 0.021 \\ 0.015 & 0.015 \\ 0.035 & 0.035 \end{bmatrix}; MS_{1jk}^{*P} = \begin{bmatrix} 0.261 & 0.248 \\ 0.293 & 0.279 \\ 0.280 & 0.275 \\ 0.275 & 0.283 \\ 0.205 & 0.210 \\ 0.322 & 0.320 \end{bmatrix}$$

- Composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje

- a) Fracción del volumen general de viajes clasificables como viajes de negocios o comerciales (viajes en tiempo de trabajo remunerado):

$$Pbsn_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.10 \\ 0.06 & 0.06 \\ 0.06 & 0.07 \\ 0.09 & 0.08 \\ 0.04 & 0.04 \\ 0.02 & 0.03 \end{bmatrix}$$

- b) Fracción del volumen general de viajes clasificables como viajes de tipo *commuting*:

$$Pcom_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.75 \\ 0.27 & 0.25 \\ 0.53 & 0.50 \\ 0.68 & 0.66 \\ 0.32 & 0.35 \\ 0.12 & 0.10 \end{bmatrix}$$

- Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público: variación anual media (en puntos porcentuales)

$$iPcpmin_{1jk} = \begin{bmatrix} -0.20 & -0.20 \\ -0.15 & -0.15 \\ -0.15 & -0.15 \\ -0.20 & -0.20 \\ -0.12 & -0.12 \\ -0.11 & -0.11 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}; iPcpmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 \\ 0.15 & 0.15 \\ 0.15 & 0.15 \\ 0.20 & 0.20 \\ 0.12 & 0.12 \\ 0.11 & 0.11 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}; iPcpmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}$$

- Evolución futura de la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual: variación anual media (en puntos porcentuales)

- a) Automóvil particular:

$$iPcomin_{1jk}^C = \begin{bmatrix} -0.12 & -0.12 \\ -0.06 & -0.06 \\ -0.09 & -0.09 \\ -0.12 & -0.12 \\ -0.20 & -0.20 \\ -0.08 & -0.08 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}; iPcomax_{1jk}^C = \begin{bmatrix} 0.09 & 0.09 \\ 0.04 & 0.04 \\ 0.06 & 0.06 \\ 0.09 & 0.09 \\ 0.20 & 0.20 \\ 0.08 & 0.08 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}; iPcomod_{1jk}^C = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}$$



b) Moto y ciclomotor:

$$iPcomin_{1jk}^M = \begin{bmatrix} -0.02 & -0.02 \\ -0.01 & -0.01 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.01 & -0.01 \\ -0.01 & -0.01 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomax_{1jk}^M = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.06 \\ 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 \\ 0.06 & 0.06 \\ 0.04 & 0.04 \\ 0.04 & 0.04 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomod_{1jk}^M = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}$$

c) Bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal:

$$iPcomin_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomax_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.03 & 0.03 \\ 0.04 & 0.04 \\ 0.04 & 0.04 \\ 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 \\ 0.04 & 0.04 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomod_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}$$

d) Modo peatonal:

$$iPcomin_{1jk}^P = \begin{bmatrix} -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \\ -0.02 & -0.02 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomax_{1jk}^P = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.02 \\ 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 \\ 0.02 & 0.02 \\ 0.02 & 0.02 \\ 0.03 & 0.03 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)} ; iPcomod_{1jk}^P = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ (p.p.)}$$

- Evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos (ajenos a los costes de transporte o atributos de viaje en los itinerarios o corredores analizados): tasa media de variación exógena anual

$$IQexmin_{1jk} = \begin{bmatrix} -0.20 & -0.15 \\ -0.15 & -0.15 \\ -0.20 & -0.20 \\ -0.15 & -0.20 \\ -0.15 & -0.15 \\ -0.10 & -0.10 \end{bmatrix} \text{ (\%)} ; IQexmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.15 & 1.25 \\ 1.45 & 1.45 \\ 1.10 & 1.20 \\ 1.30 & 1.25 \\ 1.60 & 1.60 \\ 1.75 & 1.75 \end{bmatrix} \text{ (\%)} ; IQexmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.55 & 0.65 \\ 0.75 & 0.75 \\ 0.50 & 0.55 \\ 0.65 & 0.55 \\ 0.80 & 0.80 \\ 0.90 & 0.90 \end{bmatrix} \text{ (\%)}$$

### 9.2.8. Características básicas de las condiciones de circulación de vehículos motorizados en tráfico mixto (datos de estudios de tráfico)

- Velocidad promedio de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico

a) Automóviles particulares:

$$VFcmin_{1k} = [24.0 \ 24.0] \text{ (km/h)} ; VFcmax_{1k} = [28.0 \ 29.0] \text{ (km/h)} ; VFcmod_{1k} = [26.0 \ 26.5] \text{ (km/h)}$$

b) Motos y ciclomotores:

$$VFmmin_{1k} = [24.0 \ 24.0] \text{ (km/h)} ; VFmmax_{1k} = [27.5 \ 28.5] \text{ (km/h)} ; VFmmod_{1k} = [25.8 \ 26.3] \text{ (km/h)}$$

c) Autobuses convencionales (en tráfico mixto):

$$VFbmin_{1k} = [21.0 \ 21.0] \text{ (km/h)} ; VFbmax_{1k} = [24.0 \ 24.5] \text{ (km/h)} ; VFbmod_{1k} = [22.5 \ 22.7] \text{ (km/h)}$$

- Capacidad viaria inicial para tráfico mixto

$$CMTimin_{1k} = [1585 \ 1450] \text{ (PCE/h)}$$

$$CMTimax_{1k} = [1915 \ 1750] \text{ (PCE/h)}$$

$$CMTimod_{1k} = [1750 \ 1600] \text{ (PCE/h)}$$

- Capacidad viaria para tráfico mixto tras la implantación de los nuevos sistemas de transporte público

$$CMTnmin_{1k}^R = [1365 \ 1300] \text{ (PCE/h)} ; CMTnmax_{1k}^R = [1635 \ 1550] \text{ (PCE/h)} ;$$

$$CMTnmod_{1k}^R = [1500 \ 1425] \text{ (PCE/h)}$$

$$CMTnmin_{1k}^B = [1295 \ 1245] \text{ (PCE/h)} ; CMTnmax_{1k}^B = [1575 \ 1505] \text{ (PCE/h)} ;$$

$$CMTnmod_{1k}^B = [1435 \ 1375] \text{ (PCE/h)}$$

- Parámetro  $\alpha$  de la fórmula BPR

a) Automóviles particulares y autobuses:

$$\alpha fmin_{1k} = [1.11 \ 1.11] ; \alpha fmax_{1k} = [1.55 \ 1.57] ; \alpha fmod_{1k} = [1.33 \ 1.34]$$

b) Motos y ciclomotores:

$$atmin_{1k} = [0.56 \ 0.56] ; atmax_{1k} = [0.98 \ 1.00] ; atmod_{1k} = [0.77 \ 0.78]$$

- Parámetro  $\beta$  de la fórmula BPR

a) Automóviles particulares y autobuses:

$$\beta fmin_{1k} = [3.0 \ 3.0] ; \beta fmax_{1k} = [5.5 \ 5.5] ; \beta fmod_{1k} = [4.0 \ 4.0]$$

b) Motos y ciclomotores:

$$\beta tmin_{1k} = [2.5 \ 2.5] ; \beta tmax_{1k} = [5.0 \ 5.0] ; \beta tmod_{1k} = [3.5 \ 3.5]$$

- Factores de conversión a automóviles ligeros equivalentes

a) Vehículos de tipo autobús:

$$EFbmin_{1k} = [2.6 \ 2.6] ; EFbmax_{1k} = [4.0 \ 3.8] ; EFbmod_{1k} = [3.3 \ 3.2]$$

b) Motos y ciclomotores:

$$EFmmin = 0.25 ; EFmmax = 0.70 ; EFmmod = 0.45$$

### 9.2.9. Características adicionales sobre los viajes realizados en vehículo motorizado privado

- Ratio o razón entre la distancia media recorrida sobre el itinerario o corredor en los desplazamientos realizados en vehículo motorizado privado y la longitud media de viaje por pasajero del transporte público

$$lpmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.90 \\ 0.93 & 0.93 \\ 0.92 & 0.91 \\ 0.88 & 0.90 \\ 0.98 & 0.97 \\ 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} ; lpmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.10 & 1.10 \\ 1.23 & 1.23 \\ 1.18 & 1.17 \\ 1.12 & 1.10 \\ 1.28 & 1.27 \\ 1.30 & 1.30 \end{bmatrix} ; lpmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 \\ 1.08 & 1.08 \\ 1.05 & 1.04 \\ 1.00 & 1.00 \\ 1.13 & 1.12 \\ 1.15 & 1.15 \end{bmatrix}$$

- Contribución de vehículos realizando viajes pasantes al ratio Volumen/Capacidad

$$EEVCmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.08 & 0.09 \\ 0.05 & 0.06 \\ 0.07 & 0.07 \\ 0.08 & 0.07 \\ 0.05 & 0.05 \\ 0.11 & 0.10 \end{bmatrix} ; EEVCmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.17 \\ 0.11 & 0.12 \\ 0.13 & 0.13 \\ 0.16 & 0.15 \\ 0.11 & 0.11 \\ 0.21 & 0.20 \end{bmatrix} ; EEVCmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.13 \\ 0.08 & 0.09 \\ 0.10 & 0.10 \\ 0.12 & 0.11 \\ 0.08 & 0.08 \\ 0.16 & 0.15 \end{bmatrix}$$

- Tasa inicial (año base) de ocupación en automóvil particular

$$OCcmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.14 & 1.13 \\ 1.29 & 1.31 \\ 1.22 & 1.21 \\ 1.16 & 1.17 \\ 1.26 & 1.24 \\ 1.47 & 1.48 \end{bmatrix} ; OCcmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.28 & 1.27 \\ 1.49 & 1.51 \\ 1.40 & 1.39 \\ 1.32 & 1.33 \\ 1.46 & 1.44 \\ 1.71 & 1.72 \end{bmatrix} ; OCcmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 1.21 & 1.20 \\ 1.39 & 1.41 \\ 1.31 & 1.30 \\ 1.24 & 1.25 \\ 1.36 & 1.34 \\ 1.59 & 1.60 \end{bmatrix}$$

- Tasa de ocupación en moto o ciclomotor

$$OCmmin = 1.06 ; OCmmax = 1.18 ; OCmmod = 1.12$$

- Evolución futura de la tasa de ocupación en automóvil particular: variación anual media (en número de personas por vehículo)

$$iOCcmin_{1jk} = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -1.5 & -1.5 \\ -2.0 & -2.0 \\ -1.7 & -1.7 \\ -1.5 & -1.5 \\ -2.0 & -2.0 \\ -2.5 & -2.5 \end{bmatrix} ; iOCcmax_{1jk} = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 3.5 & 3.5 \\ 2.2 & 2.2 \\ 3.0 & 3.0 \\ 4.0 & 4.0 \\ 2.0 & 2.0 \\ 3.5 & 3.5 \end{bmatrix} ; iOCcmod_{1jk} = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 1.5 & 1.5 \\ 0.7 & 0.7 \\ 1.2 & 1.2 \\ 1.7 & 1.7 \\ 0.6 & 0.6 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

- Proporción de cumplimiento de la obligación de facilitar la reincorporación de autobuses de transporte público desde paradas

$$ycmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.20 \\ 0.16 & 0.18 \\ 0.18 & 0.19 \\ 0.20 & 0.25 \\ 0.14 & 0.14 \\ 0.24 & 0.27 \end{bmatrix} ; ycmx_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.53 & 0.50 \\ 0.40 & 0.42 \\ 0.46 & 0.47 \\ 0.50 & 0.55 \\ 0.36 & 0.36 \\ 0.56 & 0.59 \end{bmatrix} ; ycmo_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.38 & 0.35 \\ 0.28 & 0.30 \\ 0.32 & 0.33 \\ 0.35 & 0.40 \\ 0.25 & 0.25 \\ 0.40 & 0.43 \end{bmatrix}$$

## 9.2.10. Datos sobre costes unitarios relativos al tiempo de viaje

### 9.2.10.1. Coste unitario del tiempo de viaje en el vehículo

- Coste unitario del tiempo de viaje en transporte público (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para viajes de tipo *commuting*

$$VTCpbmin = 8.87 \text{ (€/h)} ; VTCpbmax = 11.99 \text{ (€/h)} ; VTCpbmod = 10.43 \text{ (€/h)}$$

- Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en otros tipos de desplazamientos fuera del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

$$VROpbmin = 0.70 ; VROpbmax = 0.98 ; VROpbmod = 0.84$$

- Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos dentro del tiempo de trabajo remunerado y en viajes de tipo *commuting*, para viajes en transporte público

$$VRBpbmin = 2.08 ; VRBpbmax = 2.96 ; VRBpbmod = 2.52$$

- Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes de tipo *commuting*

$$VRCprmin = 1.18 ; VRCprmax = 1.60 ; VRCprmod = 1.39$$

- Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado

$$VROprmin=1.18 ; VROprmax=1.60 ; VROprmod=1.39$$

- Factor de proporcionalidad entre el coste unitario del tiempo de viaje en desplazamientos en vehículo motorizado privado y en transporte público, para viajes en tiempo de trabajo remunerado

$$VRBprmin=1.06 ; VRBprmax=1.44 ; VRBprmod=1.25$$

**9.2.10.2. Valoración del coste unitario del tiempo de espera en parada (transporte público)**

- Factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de espera en las paradas o estaciones de transporte público y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar)

$$WRmin^0=1.75 ; WRmax^0=2.45 ; WRmod^0=2.10$$

$$WRmin^R=1.60 ; WRmax^R=2.30 ; WRmod^R=1.95$$

$$WRmin^B=1.65 ; WRmax^B=2.35 ; WRmod^B=2.00$$

**9.2.10.3. Valoración de costes unitarios asociados a deficiencias en la fiabilidad de horarios o tiempos de viaje**

- Valoración del coste unitario del tiempo medio de retraso (transporte público): factor de proporcionalidad o cociente entre el coste unitario del tiempo de retraso en transporte público y el coste unitario del tiempo de viaje a bordo del vehículo (en condiciones base o estándar)

$$LRmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 2.28 & 2.36 \\ 1.66 & 1.63 \\ 2.00 & 1.98 \\ 2.25 & 2.20 \\ 1.69 & 1.73 \\ 1.39 & 1.38 \end{bmatrix} ; LRmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 3.22 & 3.32 \\ 2.40 & 2.37 \\ 2.85 & 2.82 \\ 3.17 & 3.11 \\ 2.44 & 2.49 \\ 2.05 & 2.04 \end{bmatrix} ; LRmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 2.75 & 2.84 \\ 2.03 & 2.00 \\ 2.42 & 2.40 \\ 2.71 & 2.66 \\ 2.06 & 2.11 \\ 1.72 & 1.71 \end{bmatrix}$$

- Valoración del coste unitario de la variabilidad del tiempo de viaje (transporte motorizado privado): ratio de valor de la fiabilidad (*reliability ratio*) como factor de proporcionalidad o cociente entre el coste percibido por el viajero por cada unidad de desviación típica del tiempo de viaje y el valor o coste de una unidad análoga del propio tiempo medio de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar)

$$RRprmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.30 \\ 0.24 & 0.24 \\ 0.27 & 0.27 \\ 0.29 & 0.29 \\ 0.24 & 0.25 \\ 0.22 & 0.22 \end{bmatrix} ; RRprmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.64 \\ 0.57 & 0.56 \\ 0.59 & 0.60 \\ 0.63 & 0.62 \\ 0.56 & 0.56 \\ 0.53 & 0.53 \end{bmatrix} ; RRprmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.46 & 0.47 \\ 0.40 & 0.40 \\ 0.43 & 0.43 \\ 0.46 & 0.45 \\ 0.40 & 0.40 \\ 0.37 & 0.37 \end{bmatrix}$$

**9.2.10.4. Evolución futura del coste unitario del tiempo de viaje (en unidades monetarias constantes)**

- Tasa media de variación anual del coste unitario del tiempo de viaje en unidades monetarias constantes

$$IVTTmin=0.22 (\%) ; IVTTmax=1.55 (\%) ; IVTTmod=1.11 (\%)$$

### 9.2.11. Datos sobre costes unitarios relativos al consumo de energía

#### 9.2.11.1. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de automóviles particulares

- Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa

$$P_{cemin} = 0.0005 \quad ; \quad P_{cemax} = 0.0040 \quad ; \quad P_{cmod} = 0.0020$$

- Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina)

$$P_{cgmin} = 0.3498 \quad ; \quad P_{cgmax} = 0.4296 \quad ; \quad P_{cgmod} = 0.3856$$

- Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante alimentación eléctrica externa: variación (en puntos porcentuales) prevista para cada año

$$iP_{cemin}_y = \left[ \underbrace{0.1 \ 0.1 \ \dots \ 0.1}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.3 \ 0.3 \ \dots \ 0.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.8 \ 0.8 \ \dots \ 0.8}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.3 \ 1.3 \ \dots \ 1.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.4 \ 1.4 \ \dots \ 1.4}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{cemax}_y = \left[ \underbrace{0.3 \ 0.3 \ \dots \ 0.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.9 \ 0.9 \ \dots \ 0.9}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.8 \ 1.8 \ \dots \ 1.8}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.7 \ 2.7 \ \dots \ 2.7}_{1 \times 5} \ \underbrace{3.0 \ 3.0 \ \dots \ 3.0}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{cmod}_y = \left[ \underbrace{0.2 \ 0.2 \ \dots \ 0.2}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.6 \ 0.6 \ \dots \ 0.6}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.3 \ 1.3 \ \dots \ 1.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.0 \ 2.0 \ \dots \ 2.0}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.2 \ 2.2 \ \dots \ 2.2}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

- Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en automóviles particulares) recorridos mediante uso de gasolina, con respecto al total de combustibles convencionales (diésel y gasolina): variación (en puntos porcentuales) prevista para cada año

$$iP_{cgmin}_y = \left[ \underbrace{0.0 \ 0.0 \ \dots \ 0.0}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.3 \ 0.3 \ \dots \ 0.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.6 \ 0.6 \ \dots \ 0.6}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.9 \ 0.9 \ \dots \ 0.9}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.6 \ 0.6 \ \dots \ 0.6}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{cgmax}_y = \left[ \underbrace{0.4 \ 0.4 \ \dots \ 0.4}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.9 \ 0.9 \ \dots \ 0.9}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.6 \ 1.6 \ \dots \ 1.6}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.3 \ 2.3 \ \dots \ 2.3}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.6 \ 1.6 \ \dots \ 1.6}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{cgmod}_y = \left[ \underbrace{0.2 \ 0.2 \ \dots \ 0.2}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.6 \ 0.6 \ \dots \ 0.6}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.1 \ 1.1 \ \dots \ 1.1}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.6 \ 1.6 \ \dots \ 1.6}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.1 \ 1.1 \ \dots \ 1.1}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

#### 9.2.11.2. Reparto de vehículos-km por tipo de alimentación de energía en el caso de motos y ciclomotores

- Fracción inicial (año base) de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica

$$P_{memin} = 0.0005 \quad ; \quad P_{memax} = 0.0040 \quad ; \quad P_{memod} = 0.0020$$

- Evolución futura de la fracción de vehículos-km (en motos y ciclomotores) recorridos mediante alimentación eléctrica: variación (en puntos porcentuales) prevista para cada año

$$iP_{memin}_y = \left[ \underbrace{0.2 \ 0.2 \ \dots \ 0.2}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.4 \ 0.4 \ \dots \ 0.4}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.7 \ 0.7 \ \dots \ 0.7}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.1 \ 1.1 \ \dots \ 1.1}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.9 \ 0.9 \ \dots \ 0.9}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{memax}_y = \left[ \underbrace{0.8 \ 0.8 \ \dots \ 0.8}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.4 \ 1.4 \ \dots \ 1.4}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.1 \ 2.1 \ \dots \ 2.1}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.7 \ 2.7 \ \dots \ 2.7}_{1 \times 5} \ \underbrace{2.3 \ 2.3 \ \dots \ 2.3}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

$$iP_{memod}_y = \left[ \underbrace{0.5 \ 0.5 \ \dots \ 0.5}_{1 \times 5} \ \underbrace{0.9 \ 0.9 \ \dots \ 0.9}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.4 \ 1.4 \ \dots \ 1.4}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.9 \ 1.9 \ \dots \ 1.9}_{1 \times 5} \ \underbrace{1.6 \ 1.6 \ \dots \ 1.6}_{1 \times 20} \right]^T \quad (\text{p.p.})$$

### 9.2.11.3. Consumo de energía en vehículos eléctricos y proyecciones de reducción de consumo de combustible en motores de combustión interna

- Consumo promedio de energía en automóviles eléctricos  
 $EC_{cmin} = 0.150$  (kW·h/km) ;  $EC_{cmax} = 0.210$  (kW·h/km) ;  $EC_{cmod} = 0.180$  (kW·h/km)
- Consumo promedio de energía en motos y ciclomotores eléctricos  
 $EC_{mmin} = 0.030$  (kW·h/km) ;  $EC_{mmax} = 0.070$  (kW·h/km) ;  $EC_{mmod} = 0.043$  (kW·h/km)
- Porcentajes de reducción proporcional del consumo medio de combustible (por unidad de distancia recorrida) esperable en el año final del horizonte de evaluación, para distintos tipos de vehículos particulares con motores de combustión interna
  - a) Automóviles de gasolina:  
 $fcr_{gmin} = 18$  (%) ;  $fcr_{gmax} = 36$  (%) ;  $fcr_{gmod} = 30$  (%)
  - b) Automóviles diésel:  
 $fcr_{dmin} = 12$  (%) ;  $fcr_{dmax} = 25$  (%) ;  $fcr_{dmod} = 20$  (%)
  - c) Motos y ciclomotores de gasolina:  
 $fcr_{mmin} = 8$  (%) ;  $fcr_{mmax} = 25$  (%) ;  $fcr_{mmod} = 18$  (%)

### 9.2.11.4. Precios de los combustibles y de la energía eléctrica

- Precio inicial (año base) de venta de la gasolina  
 $PRg^* = 1.314$  (€/l)
- Precio inicial (año base) de venta del combustible diésel  
 $PRd^* = 1.217$  (€/l)
- Precio inicial (año base) de la energía eléctrica consumida para recarga de vehículos eléctricos  
 $PRemin = 0.0898$  (€/kW·h) ;  $PRemax = 0.1346$  (€/kW·h) ;  $PRemod = 0.1122$  (€/kW·h)
- Evolución futura del precio de venta de los productos energéticos (en unidades monetarias constantes)
  - a) Evolución futura del precio de venta de la gasolina: variación anual media del precio de venta al consumidor en unidades monetarias constantes, cuantificada como porcentaje con respecto al precio en el año base  
 $iPRgmin = 0.59$  (%) ;  $iPRgmax = 3.59$  (%) ;  $iPRgmod = 2.09$  (%)
  - b) Evolución futura del precio de venta del combustible diésel: variación anual media del precio de venta al consumidor en unidades monetarias constantes, cuantificada como porcentaje con respecto al precio en el año base  
 $iPRdmin = 0.73$  (%) ;  $iPRdmax = 3.73$  (%) ;  $iPRdmod = 2.23$  (%)
  - c) Evolución futura del precio de venta de la energía eléctrica: variación anual media del precio, en unidades monetarias constantes, de la energía eléctrica consumida por los usuarios de vehículos eléctricos, cuantificada como porcentaje con respecto a su precio en el año base  
 $iPRemin = -0.04$  (%) ;  $iPRemax = 3.21$  (%) ;  $iPRemod = 1.96$  (%)

### 9.2.12. Estimación de posibles cambios en otros costes modales

- *Bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto a autobús convencional

a) Metro ligero o tranvía:

$$Bnsmin^R = 1.65 \text{ (min)} ; Bnsmax^R = 4.95 \text{ (min)} ; Bnsmod^R = 3.30 \text{ (min)}$$

b) BHLS o BRT:

$$Bnsmin^B = 0.00 \text{ (min)} ; Bnsmax^B = 3.30 \text{ (min)} ; Bnsmod^B = 1.65 \text{ (min)}$$

- Evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo: variación anual (real, en unidades monetarias constantes) de otros posibles costes modales diferentes de los contemplados expresamente en la modelización (costes exógenos al modelo), prevista para cada año

a) Automóvil particular:

$$\Delta Cexmin_{y1j1}^C = \Delta Cexmin_{y1j2}^C = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00_{(y=10)} \\ 0.04 & 0.01 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.02 \\ 0.04 & 0.01 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.02 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.04 & 0.01 & 0.03 & 0.04 & 0.02 & 0.02_{(y=25)} \\ 0.02 & 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.00 & 0.00 \\ 0.02 & 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.02 & 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.00 & 0.00_{(y=40)} \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta Cexmax_{y1j1}^C = \Delta Cexmax_{y1j2}^C = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.12 \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.12 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.12_{(y=10)} \\ 0.14 & 0.11 & 0.13 & 0.14 & 0.10 & 0.14 \\ 0.14 & 0.11 & 0.13 & 0.14 & 0.10 & 0.14 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.14 & 0.11 & 0.13 & 0.14 & 0.10 & 0.14_{(y=25)} \\ 0.10 & 0.06 & 0.07 & 0.09 & 0.06 & 0.08 \\ 0.10 & 0.06 & 0.07 & 0.09 & 0.06 & 0.08 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.10 & 0.06 & 0.07 & 0.09 & 0.06 & 0.08_{(y=40)} \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta Cexmod_{y1j1}^C = \Delta Cexmod_{y1j2}^C = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00_{(y=10)} \\ 0.09 & 0.06 & 0.08 & 0.09 & 0.06 & 0.08 \\ 0.09 & 0.06 & 0.08 & 0.09 & 0.06 & 0.08 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.09 & 0.06 & 0.08 & 0.09 & 0.06 & 0.08_{(y=25)} \\ 0.06 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.03 & 0.04 \\ 0.06 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.03 & 0.04 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.06 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.03 & 0.04_{(y=40)} \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

b) Moto o ciclomotor:

$$\Delta Cexmin_{y1j1}^M = \Delta Cexmin_{y1j2}^M = \begin{bmatrix} -0.08 & -0.05 & -0.08 & -0.08 & -0.05 & -0.03 \\ -0.08 & -0.05 & -0.08 & -0.08 & -0.05 & -0.03 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.08 & -0.05 & -0.08 & -0.08 & -0.05 & -0.03 & (y=10) \\ -0.13 & -0.10 & -0.10 & -0.13 & -0.07 & -0.10 \\ -0.13 & -0.10 & -0.10 & -0.13 & -0.07 & -0.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.13 & -0.10 & -0.10 & -0.13 & -0.07 & -0.10 & (y=25) \\ -0.11 & -0.08 & -0.10 & -0.11 & -0.08 & -0.10 \\ -0.11 & -0.08 & -0.10 & -0.11 & -0.08 & -0.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.11 & -0.08 & -0.10 & -0.11 & -0.08 & -0.10 & (y=40) \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta Cexmax_{y1j1}^M = \Delta Cexmax_{y1j2}^M = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & (y=10) \\ 0.03 & 0.06 & 0.04 & 0.03 & 0.07 & 0.10 \\ 0.03 & 0.06 & 0.04 & 0.03 & 0.07 & 0.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.03 & 0.06 & 0.04 & 0.03 & 0.07 & 0.10 & (y=25) \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.10 \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.10 & (y=40) \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta Cexmod_{y1j1}^M = \Delta Cexmod_{y1j2}^M = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & (y=10) \\ -0.05 & -0.02 & -0.03 & -0.05 & 0.00 & 0.00 \\ -0.05 & -0.02 & -0.03 & -0.05 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.05 & -0.02 & -0.03 & -0.05 & 0.00 & 0.00 & (y=25) \\ -0.03 & 0.00 & -0.02 & -0.03 & 0.00 & 0.00 \\ -0.03 & 0.00 & -0.02 & -0.03 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.03 & 0.00 & -0.02 & -0.03 & 0.00 & 0.00 & (y=40) \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

c) Bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal:

$$\Delta Cexmin_{y1j1}^V = \Delta Cexmin_{y1j2}^V = \begin{bmatrix} -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.10 \\ -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.10 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.10 & (y=10) \\ -0.30 & -0.25 & -0.28 & -0.30 & -0.24 & -0.30 \\ -0.30 & -0.25 & -0.28 & -0.30 & -0.24 & -0.30 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.30 & -0.25 & -0.28 & -0.30 & -0.24 & -0.30 & (y=25) \\ -0.30 & -0.20 & -0.24 & -0.30 & -0.20 & -0.22 \\ -0.30 & -0.20 & -0.24 & -0.30 & -0.20 & -0.22 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.30 & -0.20 & -0.24 & -0.30 & -0.20 & -0.22 & (y=40) \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$



$$\Delta C_{exmax}_{y_1j_1}^V = \Delta C_{exmax}_{y_1j_2}^V = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \hline -0.10 & -0.05 & -0.08 & -0.10 & 0.00 & -0.06 \\ -0.10 & -0.05 & -0.08 & -0.10 & 0.00 & -0.06 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.10 & -0.05 & -0.08 & -0.10 & 0.00 & -0.06 \\ \hline 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta C_{exmod}_{y_1j_1}^V = \Delta C_{exmod}_{y_1j_2}^V = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \hline -0.20 & -0.15 & -0.18 & -0.20 & -0.12 & -0.18 \\ -0.20 & -0.15 & -0.18 & -0.20 & -0.12 & -0.18 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.20 & -0.15 & -0.18 & -0.20 & -0.12 & -0.18 \\ \hline -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.11 \\ -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.11 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.15 & -0.10 & -0.12 & -0.15 & -0.10 & -0.11 \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

d) Modo peatonal:

$$\Delta C_{exmin}_{y_1j_1}^P = \Delta C_{exmin}_{y_1j_2}^P = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \hline -0.26 & -0.21 & -0.26 & -0.26 & -0.18 & -0.21 \\ -0.26 & -0.21 & -0.26 & -0.26 & -0.18 & -0.21 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.26 & -0.21 & -0.26 & -0.26 & -0.18 & -0.21 \\ \hline -0.16 & -0.14 & -0.16 & -0.16 & -0.12 & -0.14 \\ -0.16 & -0.14 & -0.16 & -0.16 & -0.12 & -0.14 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.16 & -0.14 & -0.16 & -0.16 & -0.12 & -0.14 \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta C_{exmax}_{y_1j_1}^P = \Delta C_{exmax}_{y_1j_2}^P = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.21 & 0.18 \\ 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.21 & 0.18 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.30 & 0.21 & 0.18 \\ \hline -0.10 & -0.07 & -0.10 & -0.10 & -0.06 & -0.07 \\ -0.10 & -0.07 & -0.10 & -0.10 & -0.06 & -0.07 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.10 & -0.07 & -0.10 & -0.10 & -0.06 & -0.07 \\ \hline 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

$$\Delta Cexmod_{y1j1}^P = \Delta Cexmod_{y1j2}^P = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.14 & 0.12 \\ 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.14 & 0.12 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.14 & 0.12 \\ \hline -0.18 & -0.14 & -0.18 & -0.18 & -0.12 & -0.14 \\ -0.18 & -0.14 & -0.18 & -0.18 & -0.12 & -0.14 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.18 & -0.14 & -0.18 & -0.18 & -0.12 & -0.14 \\ \hline -0.08 & -0.07 & -0.08 & -0.08 & -0.06 & -0.07 \\ -0.08 & -0.07 & -0.08 & -0.08 & -0.06 & -0.07 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.08 & -0.07 & -0.08 & -0.08 & -0.06 & -0.07 \end{bmatrix}_{40 \times 6} \quad (\text{€})$$

**9.2.13. Datos adicionales para la obtención de valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  del modelo de demanda**

- Proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

$$Pcp^{A}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.142 & 0.125 \\ 0.141 & 0.133 \\ 0.116 & 0.117 \\ 0.116 & 0.130 \\ 0.114 & 0.118 \\ 0.095 & 0.102 \end{bmatrix}$$

- Proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos de otros modos de transporte privado o individual en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

$$Pco^{A^C}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.092 & 0.096 \\ 0.055 & 0.054 \\ 0.082 & 0.083 \\ 0.092 & 0.090 \\ 0.181 & 0.179 \\ 0.063 & 0.062 \end{bmatrix} ; Pco^{A^M}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.005 & 0.006 \\ 0.003 & 0.003 \\ 0.007 & 0.006 \\ 0.007 & 0.005 \\ 0.002 & 0.003 \\ 0.003 & 0.002 \end{bmatrix} ; Pco^{A^V}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} ; Pco^{A^P}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.019 & 0.017 \\ 0.014 & 0.013 \\ 0.017 & 0.015 \\ 0.020 & 0.020 \\ 0.023 & 0.022 \\ 0.015 & 0.014 \end{bmatrix}$$

- Cuota modal del transporte público en el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros de demanda

$$MS^{A^0}_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.228 & 0.201 \\ 0.247 & 0.233 \\ 0.196 & 0.195 \\ 0.187 & 0.208 \\ 0.155 & 0.160 \\ 0.140 & 0.148 \end{bmatrix}$$

- Variación media por viajero, entre el año previo de referencia utilizado para la calibración de parámetros y el año base, del coste generalizado de las opciones modales de transporte

a) Transporte público (autobús convencional en tráfico mixto):

$$\Phi GCmin^{A^0}_{1jk} = \begin{bmatrix} -0.60 & -0.71 \\ -0.55 & -0.55 \\ -0.47 & -0.64 \\ -0.62 & -0.57 \\ 0.52 & 0.53 \\ 0.55 & 0.52 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmax^{A^0}_{1jk} = \begin{bmatrix} -0.48 & -0.54 \\ -0.44 & -0.43 \\ -0.37 & -0.51 \\ -0.49 & -0.46 \\ 0.67 & 0.68 \\ 0.72 & 0.69 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmod^{A^0}_{1jk} = \begin{bmatrix} -0.54 & -0.62 \\ -0.49 & -0.49 \\ -0.42 & -0.57 \\ -0.55 & -0.51 \\ 0.59 & 0.60 \\ 0.63 & 0.60 \end{bmatrix} (\text{€})$$

b) Automóvil particular:

$$\Phi GCmin_{1jk}^C = \begin{bmatrix} -0.05 & -0.05 \\ -0.04 & -0.03 \\ -0.02 & -0.04 \\ -0.05 & -0.04 \\ -0.06 & -0.06 \\ -0.04 & -0.06 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmax_{1jk}^C = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.13 \\ 0.08 & 0.11 \\ 0.14 & 0.12 \\ 0.11 & 0.12 \\ 0.08 & 0.10 \\ 0.12 & 0.10 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmod_{1jk}^C = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.04 \\ 0.02 & 0.04 \\ 0.06 & 0.04 \\ 0.03 & 0.04 \\ 0.01 & 0.02 \\ 0.04 & 0.02 \end{bmatrix} (\text{€})$$

c) Moto o ciclomotor:

$$\Phi GCmin_{1jk}^M = \begin{bmatrix} -0.09 & -0.08 \\ -0.05 & -0.06 \\ -0.06 & -0.05 \\ -0.06 & -0.07 \\ -0.07 & -0.07 \\ -0.09 & -0.09 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmax_{1jk}^M = \begin{bmatrix} 0.09 & 0.08 \\ 0.05 & 0.06 \\ 0.06 & 0.05 \\ 0.06 & 0.07 \\ 0.07 & 0.07 \\ 0.09 & 0.09 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmod_{1jk}^M = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} (\text{€})$$

d) Bicicleta u otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal:

$$\Phi GCmin_{1jk}^V = \begin{bmatrix} -0.10 & -0.12 \\ -0.09 & -0.10 \\ -0.11 & -0.12 \\ -0.12 & -0.10 \\ -0.10 & -0.11 \\ -0.11 & -0.12 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmax_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.12 \\ 0.09 & 0.10 \\ 0.11 & 0.12 \\ 0.12 & 0.10 \\ 0.10 & 0.11 \\ 0.11 & 0.12 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmod_{1jk}^V = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} (\text{€})$$

e) Modo peatonal:

$$\Phi GCmin_{1jk}^P = \begin{bmatrix} -0.10 & -0.11 \\ -0.08 & -0.10 \\ -0.11 & -0.09 \\ -0.12 & -0.10 \\ -0.11 & -0.10 \\ -0.10 & -0.12 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmax_{1jk}^P = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.11 \\ 0.08 & 0.10 \\ 0.11 & 0.09 \\ 0.12 & 0.10 \\ 0.11 & 0.10 \\ 0.10 & 0.12 \end{bmatrix} (\text{€}) ; \Phi GCmod_{1jk}^P = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} (\text{€})$$

- Ratio o cociente entre los parámetros  $\theta$  y  $\lambda$  del modelo de demanda

$$RDPmin_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.09 & 0.09 \\ 0.18 & 0.18 \\ 0.13 & 0.14 \\ 0.10 & 0.11 \\ 0.17 & 0.17 \\ 0.21 & 0.21 \end{bmatrix} ; RDPmax_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.69 & 0.69 \\ 0.78 & 0.78 \\ 0.73 & 0.74 \\ 0.70 & 0.71 \\ 0.77 & 0.77 \\ 0.81 & 0.81 \end{bmatrix} ; RDPmod_{1jk} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.27 \\ 0.46 & 0.46 \\ 0.36 & 0.37 \\ 0.30 & 0.31 \\ 0.45 & 0.44 \\ 0.52 & 0.53 \end{bmatrix}$$

### 9.2.14. Parámetros numéricos relativos a la ejecución del modelo

- Número de simulaciones aleatorias a ejecutar

$$Nrs = 2500$$

- Parámetros numéricos concernientes a la convergencia de las iteraciones

a) Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo de las cuotas de reparto modal general:

$$\varepsilon_s = 1 \cdot 10^{-6}$$

b) Tolerancia absoluta de los procesos iterativos aplicada al cálculo del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales:

$$\varepsilon_Q = 1 \cdot 10^{-4} \text{ (prs/h)}$$

c) Coeficiente de avance relativo entre iteraciones:

$$\psi = 0.50$$

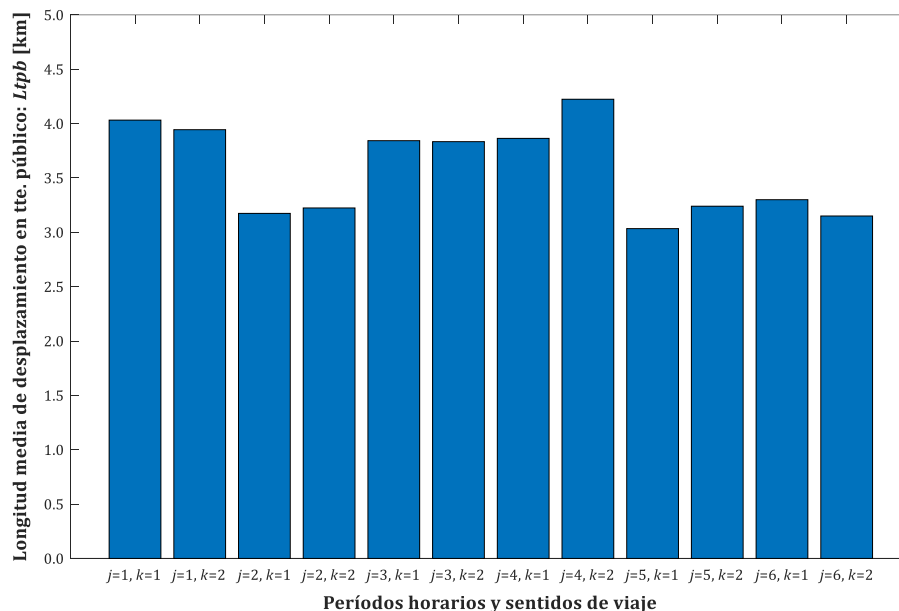
### 9.3. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS: POST-PROCESADO, REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y ANÁLISIS

Tras haber procedido a la implementación computacional del modelo y a su ejecución con los datos especificados en el epígrafe 9.2 (tareas para las cuales se utilizó el software de computación numérica MATLAB, versión R2016a), se exponen y analizan a continuación los principales resultados obtenidos, incluyendo su post-procesado estadístico, su representación gráfica y su interpretación.

#### 9.3.1. Resultados relativos a los cálculos preliminares

##### 9.3.1.1. Distancia media de desplazamiento de los pasajeros del modo de transporte público

Se presentan en primer lugar los resultados preliminares relativos a la distancia media recorrida a bordo del vehículo de transporte público por los pasajeros que hacen uso de la línea analizada, en cada período horario y para cada sentido de viaje (variable  $Ltpb_{1jk}$ ). Así pues, la Figura 9.2 muestra los resultados obtenidos para dicha distancia —por aplicación directa de la ecuación 7.26— mediante un simple diagrama de barras en el que las diferentes barras corresponden a cada una de las posibles combinaciones de período horario y sentido de desplazamiento. Obsérvese que en este caso concreto se está tratando una variable con valores únicos empleados por todas las simulaciones aleatorias, por lo que no cabe aplicar ningún tipo de análisis estadístico sobre la misma.

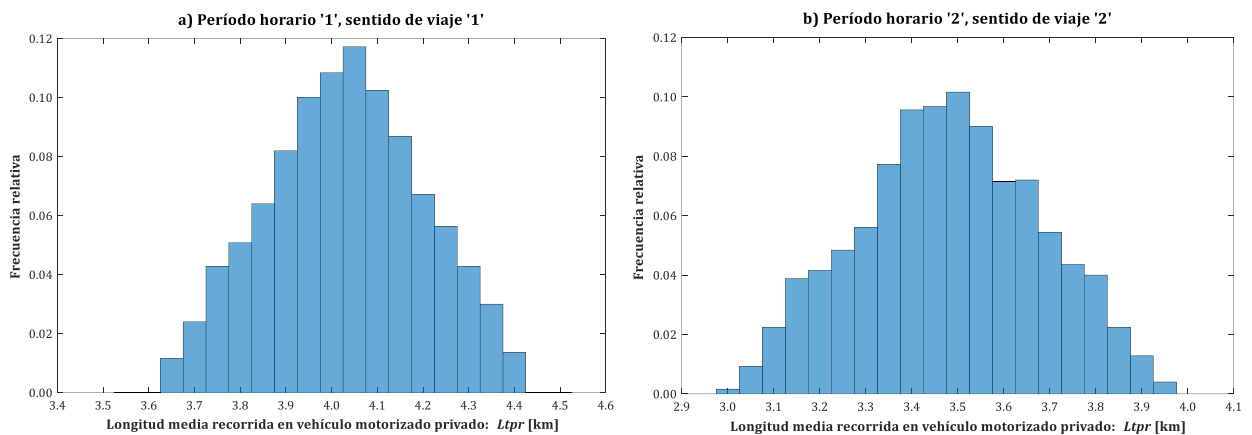


**Figura 9.2.** Distancia media recorrida a bordo del vehículo de transporte público por los pasajeros que hacen uso de la línea analizada, en cada período horario y para cada sentido de viaje.

Como puede observarse en la Figura 9.2, el rango de la distancia media de desplazamiento de los pasajeros del transporte público se sitúa en el ejemplo numérico planteado entre un mínimo de 3.0340 km (período horario '5', sentido '1') y un máximo de 4.2240 km (período horario '4', sentido '2').

### 9.3.1.2. Longitud media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado

Se muestra a continuación, en la Figura 9.3, una síntesis de los resultados preliminares concernientes a la distancia media que es recorrida sobre el corredor, eje o itinerario servido por la línea objeto de estudio en aquellos viajes efectuados en vehículo motorizado privado (con un itinerario sensiblemente coincidente con el del transporte público), la cual viene dada en cada caso por la variable  $Ltpr_{r1jk}$ . En particular, de todas las posibles combinaciones de período horario y sentido de recorrido se seleccionan, a efectos de representación gráfica de resultados, aquellas correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (es decir,  $j=1, k=1$ ) y al período horario '2' en el sentido '2' ( $j=2, k=2$ ). Recuérdese que en el ejemplo numérico propuesto la primera de estas combinaciones se puede considerar representativa del período punta de la mañana en día laborable (analizándose los viajes efectuados en el sentido identificado como '1'), mientras que la segunda correspondería a un período valle también en día laborable, estudiándose en este caso los viajes realizados en sentido opuesto. Dado el carácter aleatorio que la variable  $Ltpr_{rjk}$  tiene en el modelo, la Figura 9.3 muestra los histogramas de frecuencias relativas de dicha variable en las 2,500 simulaciones aleatorias llevadas a cabo, para cada uno de los dos casos anteriormente mencionados.



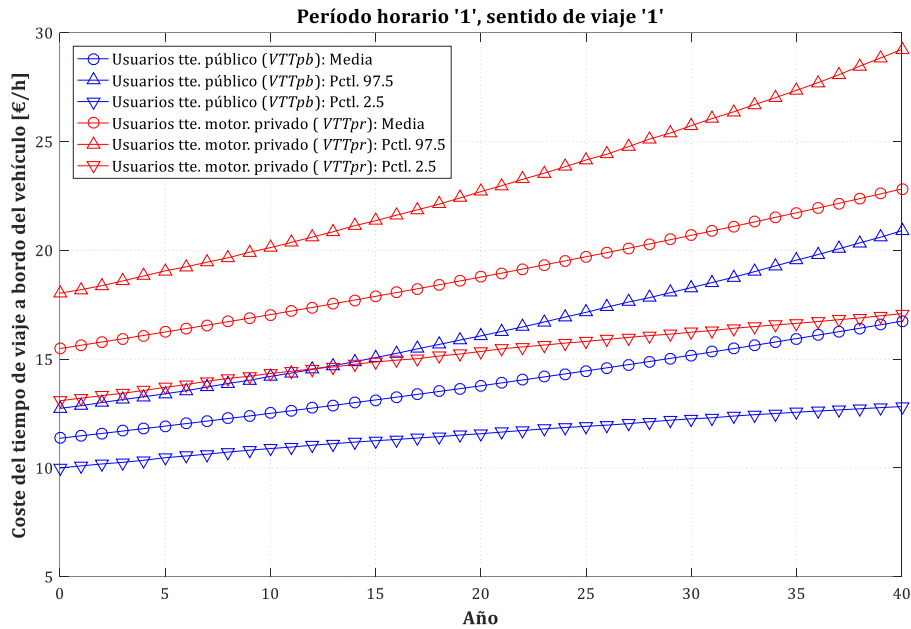
**Figura 9.3.** Histogramas de frecuencias relativas de la distancia media recorrida sobre el corredor o itinerario en los viajes realizados en vehículo motorizado privado: a) Caso  $j=1, k=1$ ; b) Caso  $j=2, k=2$ .

A título indicativo, puede reseñarse que el valor medio de la variable  $Ltpr_{r1jk}$  se sitúa en 4.0304 km en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' (con una amplitud entre mínimo y máximo de 0.7832 km), mientras que en el caso  $j=2, k=2$  el valor medio es de 3.4820 km con una amplitud entre mínimo y máximo de 0.9483 km.

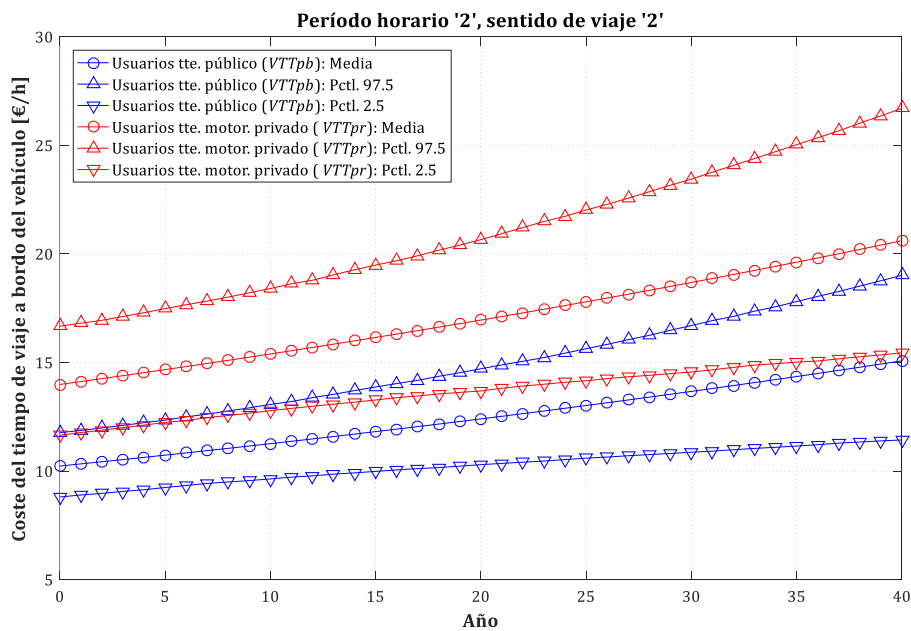
### 9.3.1.3. Coste promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para los usuarios de transporte público y para los usuarios de transporte motorizado privado, en el año base y a lo largo del horizonte de evaluación

A continuación se presentan, en las Figuras 9.4 y 9.5, varios parámetros estadísticos de interés aplicados sobre las variables aleatorias  $VTTpb_{ry1jk}$  y  $VTTpr_{ry1jk}$  (así como sobre sus homólogos para el año base  $VTTpb^*_{r1jk}$  y  $VTTpr^*_{r1jk}$ ), las cuales representan el coste unitario promedio del tiempo de viaje (a bordo del vehículo, en condiciones base o estándar) para el conjunto de usuarios del transporte público y para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, respectivamente. En especial, se muestra mediante las Figuras 9.4 y 9.5 la futura evolución prevista de los parámetros estadísticos representativos de dichas variables a lo largo del tiempo, desde el año base de partida (representado en las gráficas como año '0') hasta el final del horizonte o período de evaluación (de 40 años de duración en el ejemplo

numérico planteado). Particularmente se han seleccionado, a efectos de presentación gráfica de resultados, los casos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.4) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.5), al igual que anteriormente. Por su parte, como parámetros estadísticos representativos se han tomado en este caso la media, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo), de tal modo que se estimaría un 95% de probabilidad de que el valor de la variable estuviese comprendido entre los valores de los percentiles 2.5 y 97.5.



**Figura 9.4.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coste unitario promedio del tiempo de viaje en el vehículo para el conjunto de usuarios del transporte público y para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

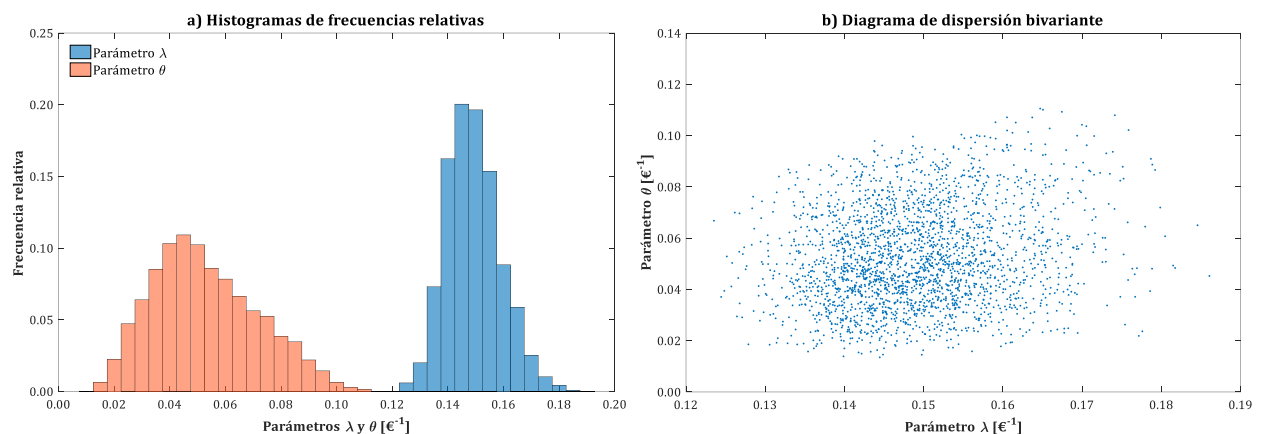


**Figura 9.5.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coste unitario promedio del tiempo de viaje en el vehículo para el conjunto de usuarios del transporte público y para el conjunto de usuarios de vehículo motorizado privado, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

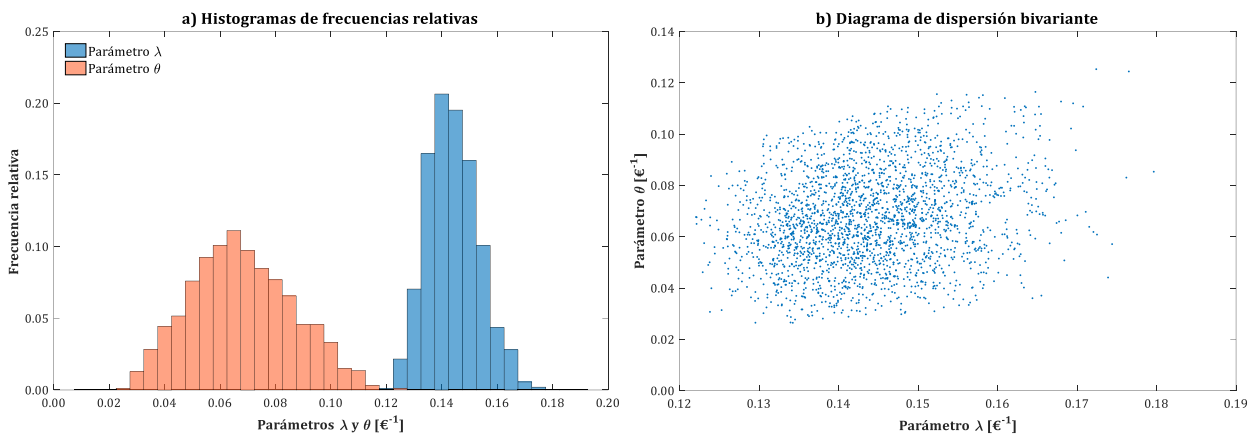
Tal como se observa en las Figuras 9.4 y 9.5, el valor o coste unitario promedio del tiempo de viaje en el vehículo resulta notablemente más alto para los usuarios de vehículo motorizado privado que para los pasajeros del transporte público, al ser —según los datos introducidos— los factores de proporcionalidad  $VRCpr_r$ ,  $VRBpr_r$  y  $VROpr_r$  todos ellos mayores que 1.00. Este comportamiento coincide con la pauta observada generalmente en la literatura científica, estando relacionado fundamentalmente con el efecto de autoselección que se produce entre los usuarios de uno y otro tipo de transporte (es decir, aquellos individuos que conceden un mayor valor al tiempo de viaje en comparación con otros atributos serán más propensos a elegir el transporte motorizado privado, al ser este habitualmente más rápido que el transporte público). Por otra parte, también se observa un mayor valor o coste promedio del tiempo de viaje para aquellos individuos que efectúan su viaje en el período horario '1' y en el sentido '1' que para aquellos otros que realizan desplazamientos durante el período horario '2' y en el sentido de viaje '2'. A este respecto, las diferencias entre distintos períodos y sentidos de desplazamiento son un reflejo —de acuerdo a la estructura del modelo desarrollado— de las diferentes composiciones de la demanda de movilidad según los tipos o motivos de viaje (recuérdese al respecto la segmentación entre viajes de tipo *commuting* fuera del tiempo de trabajo remunerado, otros tipos de viajes fuera del tiempo de trabajo remunerado por ocio, compras, etc., y viajes en tiempo de trabajo remunerado, de negocios o comerciales de tipo *work/business*). Por último, se aprecia una tendencia creciente a lo largo del tiempo para el coste o valor del tiempo de viaje. Esta tendencia está controlada por los valores de la variable  $IVTT_r$ , que, de acuerdo a los datos introducidos, son en todo caso positivos (se relacionaría este incremento progresivo con la previsión de una evolución positiva a largo plazo de la renta real o PIB real *per cápita*).

#### 9.3.1.4. Parámetros $\lambda$ y $\theta$ del modelo de demanda

Se muestran en este epígrafe varias gráficas relativas al modo en el que los valores obtenidos para los parámetros del modelo de demanda  $\lambda$  (sensibilidad al coste generalizado de las alternativas en el reparto modal) y  $\theta$  ('impedancia', 'fricción' o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes) se distribuyen estadísticamente a lo largo de la serie de simulaciones aleatorias efectuadas, siendo por tanto las variables objeto de estudio  $\lambda_{r1jk}$  y  $\theta_{r1jk}$ . En particular, se toman como ejemplos significativos los casos concernientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.6) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.7), tal como se viene haciendo con los restantes resultados. En cada uno de estos dos casos se incluyen, por un lado, los histogramas comparados de frecuencias relativas de los valores recibidos por los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$ , y, por otra parte, los diagramas de dispersión bivalente entre ambas variables, en los que se representan los valores tomados simultáneamente por uno y otro parámetro en cada una de las múltiples simulaciones aleatorias. Este último tipo de gráficos hacen referencia, por tanto, al modo en el que los valores de  $\lambda$  y  $\theta$  se correlacionan entre sí.



**Figura 9.6.** Representaciones gráficas concernientes a la distribución estadística conjunta de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  del modelo de demanda en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1': a) Histogramas de frecuencias relativas; b) Diagrama de dispersión bivalente.



**Figura 9.7.** Representaciones gráficas concernientes a la distribución estadística conjunta de los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  del modelo de demanda en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’: a) Histogramas de frecuencias relativas; b) Diagrama de dispersión bivalente.

En las Figuras 9.6 y 9.7 se aprecia, en primer lugar, que los valores recibidos por el parámetro  $\lambda$  de sensibilidad al coste generalizado de las opciones en el reparto modal son, en general, ligeramente mayores para el caso  $j=1, k=1$  que en el caso  $j=2, k=2$  (valores medios de 0.1492 frente a 0.1441, respectivamente). Recuérdese que, de acuerdo a la teoría subyacente (véase epígrafe 4.5), los valores del parámetro  $\lambda$  son directamente proporcionales a la utilidad marginal del ingreso percibida por los individuos que realizan los viajes. A su vez, suele considerarse como pauta dominante —aunque no exenta de posibles excepciones— que dicha utilidad marginal del ingreso disminuye a medida que aumenta la renta disponible por el individuo y, recíprocamente, se incrementa la utilidad marginal del ingreso en el caso de grupos de individuos encuadrados en segmentos o categorías con menor renta. Por lo que respecta al valor del parámetro  $\theta$  de ‘impedancia’, ‘fricción’ o resistencia al coste compuesto en la distribución de viajes, nótese que este presenta —de acuerdo a la estructura y datos del modelo— un nivel de incertidumbre o potencial dispersión notablemente mayor que el del parámetro  $\lambda$ . Además, sus valores son, como tónica general, sensiblemente más altos en el caso  $j=2, k=2$  que en el caso  $j=1, k=1$  (valores medios de 0.0529 para  $j=1, k=1$  y de 0.0678 para  $j=2, k=2$ ), al contrario de lo que sucede con el parámetro  $\lambda$ . En este sentido cabe recordar que los valores dados —como dato de entrada— al ratio o cociente entre los parámetros  $\theta$  y  $\lambda$  del modelo de demanda deben tener presente la composición del conjunto general de viajes característicos de cada período horario y sentido de desplazamiento, en relación con la división de los mismos entre viajes correspondientes a movilidad obligada y viajes que, por el contrario, responden a una movilidad no obligada, facultativa o discrecional, con valores comparativamente menores del ratio o cociente  $\theta/\lambda$  en el caso de predominio de los primeros y con mayores valores de  $\theta/\lambda$  si aumenta la proporción de los segundos. A su vez, esta división entre movilidad obligada y no obligada también puede ser relacionada indirectamente con la segmentación de la demanda de movilidad por tipos de viaje realizada según el epígrafe 5.8.4 (viajes de negocios o comerciales en tiempo de trabajo remunerado, viajes de tipo *commuting*, y viajes de la categoría genérica ‘otros’), dado que los primeros y segundos suelen corresponder muy frecuentemente a movilidad obligada, mientras que entre los viajes de la categoría de ‘otros’ suele aumentar notablemente la proporción de desplazamientos efectuados por movilidad no obligada o facultativa. Así pues, los resultados obtenidos a este respecto son coherentes con los datos aportados en el apartado de composición de la demanda de movilidad por tipos de viaje (variables  $Pbsn_{1jk}$  y  $Pcom_{1jk}$ ), reflejando consecuentemente una mayor proporción de viajes realizados por movilidad obligada en el caso representativo de la hora punta ( $j=1, k=1$ ) que en el caso que ejemplifica un período valle ( $j=2, k=2$ ).

A su vez, la correlación entre los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  también viene directamente condicionada por las distribuciones estadísticas propuestas como dato para los valores del ratio o cociente  $\theta/\lambda$ , especificadas previamente mediante las variables de entrada  $RDPmin_{1jk}$ ,  $RDPmax_{1jk}$  y  $RDPmod_{1jk}$ . A título indicativo, se señala que, de acuerdo a los datos introducidos en el ejemplo numérico y las simulaciones aleatorias



ejecutadas, el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables  $\theta_{r1jk}$  y  $\lambda_{r1jk}$  es de 0.1744 en el caso  $j=1, k=1$  y de 0.2339 en el caso  $j=2, k=2$ .

### 9.3.2. Resultados relacionados con el nivel de servicio en transporte público

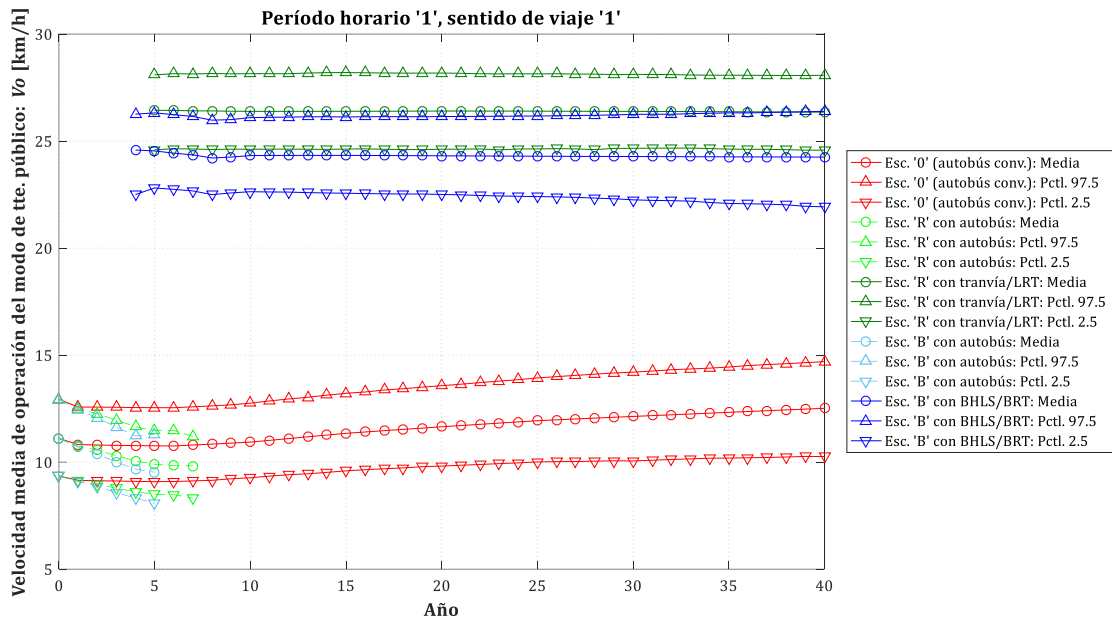
#### 9.3.2.1. Velocidad media de operación del transporte público

A continuación se comienza la presentación de resultados relativos al nivel de servicio en transporte público mediante el estudio de la velocidad media de operación previsiblemente ofrecida por los distintos modos de transporte público en sus correspondientes escenarios, considerando su evolución desde el año base de partida (año '0') hasta el final del horizonte o período de evaluación (año '40'). En consecuencia, la variable objeto de análisis para este estudio es  $Vo_{ry1jk}^{ms}$  (así como su homóloga  $Vo_{r1jk}^*$  en el caso del año base).

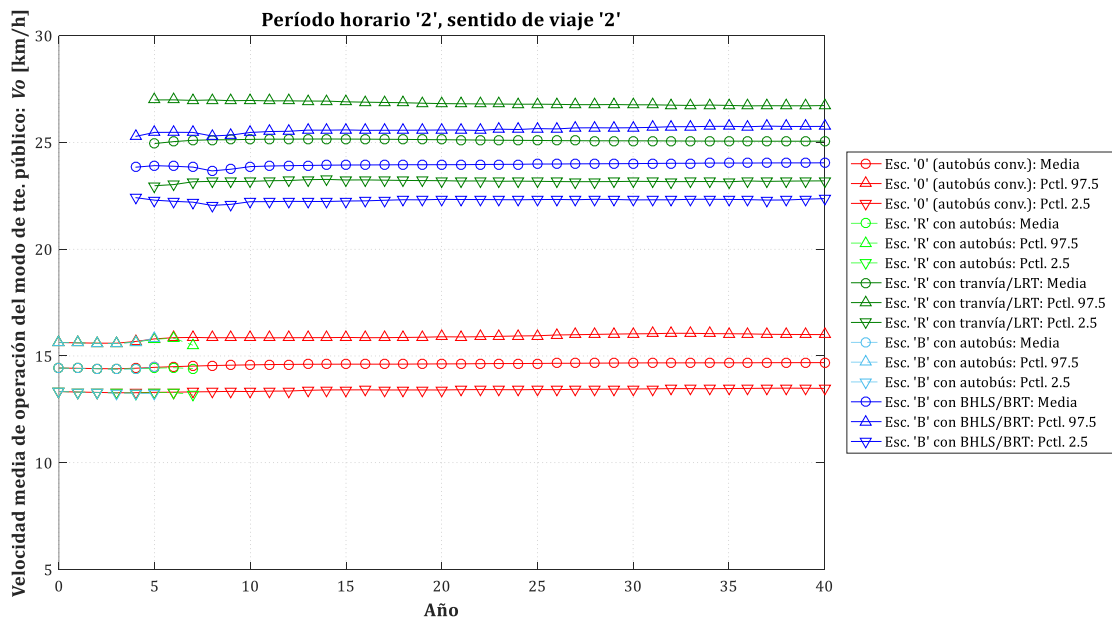
De esta forma, en las Figuras 9.8 y 9.9 se muestra la evolución prevista por el modelo para varios parámetros estadísticos de interés aplicados sobre las variables aleatorias  $Vo_{r1jk}^*$  y  $Vo_{ry1jk}^{ms}$ , seleccionándose como tales la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). Por otra parte, se toman como ejemplos representativos entre los diferentes períodos horarios y sentidos de viaje los casos pertenecientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.8) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.9).

Obsérvese además que en las Figuras 9.8 y 9.9 (así como en muchas de las posteriores), las series temporales de parámetros estadísticos se agrupan en 5 clases o categorías, según las posibles combinaciones entre escenario y modo de transporte público en servicio en cada momento. Así, para el escenario '0' o escenario de referencia se tiene únicamente, a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, la operación con autobús convencional en tráfico mixto. Por el contrario, para el escenario 'R' se debe distinguir una pequeña serie de años iniciales (concretamente aquellos durante los que pueda prolongarse la fase de implantación del nuevo modo de transporte público), en los que todavía se mantiene la operación con autobús convencional en tráfico mixto como único modo de transporte público disponible para el servicio. Sin embargo, a partir del año más temprano posible de puesta en servicio del nuevo modo implantado en dicho escenario, se tendría ya la operación con tranvía o metro ligero, prolongándose esta durante todos los años restantes del horizonte o período de evaluación (comprendiendo las fases de introducción y consolidación del servicio y de madurez). Lo mismo sucede en el caso del escenario 'B', pero referido a la implantación del sistema de tipo BHLS/BRT en vez del tranvía o metro ligero. Se distinguen en conclusión los 5 grupos de series a los que se alude en la leyenda de las Figuras 9.8 y 9.9.

Nótese, por último, que se produce un cierto solapamiento en los escenarios 'R' y 'B' entre los grupos de series pertenecientes a las fases de implantación de los nuevos modos de transporte público (todavía con servicio prestado mediante autobús convencional), y aquellas otras que corresponden ya al nuevo modo una vez puesto en servicio, sea este tranvía o metro ligero o bien BHLS/BRT. Este aparente solapamiento responde al carácter aleatorio del año de finalización de la fase de implantación del nuevo modo de transporte público y el comienzo de la fase de introducción y consolidación del nuevo servicio. Así, durante algunos años (concretamente en este caso entre los años '5' al '7' y '4' al '5', respectivamente), existen simulaciones aleatorias en las que la fase de implantación del nuevo modo ha finalizado y por tanto este ha sido puesto ya en servicio, mientras que en otras simulaciones aleatorias de ese mismo año todavía no ha terminado dicha fase de implantación y se sigue prestando el servicio de transporte público mediante autobús convencional en tráfico mixto. Es por tanto posible distinguir las simulaciones aleatorias en las que se produce una u otra situación y calcular con ellas separadamente los parámetros estadísticos de interés, según la variable de estudio (en este caso la velocidad de operación) se refiera en cada simulación al modo preexistente (autobús convencional) o al nuevo sistema de transporte público (metro ligero o tranvía o BHLS/BRT). Esto se traduce en la aparente coexistencia para dichos años de dos grupos de series por escenario ('R' y 'B').



**Figura 9.8.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media de operación de los modos de transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.9.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media de operación de los modos de transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En la Figura 9.8, referida al período horario '1' (representativo de las horas punta matinales en día laborable) con sentido de viaje '1', puede apreciarse claramente cómo la velocidad de operación proporcionada por los nuevos modos en plataforma reservada y con priorización semafórica sería muy superior a la que puede ser ofrecida mediante el mantenimiento de la operación con autobús convencional en tráfico mixto (escenario '0'), cuyos valores medios de la velocidad de operación se situarían aproximadamente entre 10.7 y 12.5 km/h, con una tendencia en el tiempo ligeramente creciente <sup>262</sup>

<sup>262</sup> Esta tendencia ligeramente creciente en la velocidad de operación del autobús convencional en tráfico mixto se asocia directamente a una leve caída en los valores del ratio Volumen/Capacidad en los viales de circulación utilizados por dicho modo de transporte público, relacionada a su vez con una disminución del volumen de tráfico mixto expresado en

(tras una breve y pequeña caída inicial). Entre los posibles nuevos modos, el metro ligero o tranvía operativo en el escenario 'R' proporcionaría una velocidad de operación algo superior a la que se prevé para el sistema de tipo BHLS o BRT del escenario 'B'. Así, para el tranvía o metro ligero se obtienen valores medios siempre en el entorno de los 26.4 km/h, mientras que para los modos BHLS/BRT la media de las velocidades de operación se sitúa entre los 24.2 y los 24.6 km/h. Obsérvese que en ambos casos las velocidades de operación permanecen muy estables a lo largo del paso de los años. Además, en cualquiera de los tres modos reseñados la diferencia de los percentiles 97.5 y 2.5 con respecto a los valores medios es del orden de  $\pm 2$  km/h, si bien resulta ligeramente menor para el metro ligero o tranvía que para los sistemas basados en autobuses.

Por su parte, para las fases de implantación de los nuevos sistemas de transporte en los escenarios 'R' y 'B' se aprecia una progresiva caída de la velocidad de operación del autobús convencional, alcanzando velocidades inferiores a las propias del escenario '0' (valores medios que llegan a caer hasta los 9.8 km/h en el caso del escenario 'R' y hasta 9.5 km/h en el escenario 'B'). Esta caída de velocidad de operación está estrechamente ligada a la reducción de capacidad viaria que se produce durante dicha fase de implantación en los escenarios 'R' y 'B', que redundan en un aumento del ratio Volumen/Capacidad para la circulación en tráfico mixto en la que debe desenvolverse el autobús convencional (es decir, se generan mayores niveles de congestión y con ello una reducción de la velocidad de circulación).

En el caso del período horario '2' (representativo de horas valle en día laborable) con sentido de viaje '2' (véase Figura 9.9), la panorámica global es bastante similar a la descrita para el caso  $j=1, k=1$ , pero debe matizarse que la diferencia de velocidad de operación entre los modos con plataforma reservada y priorización semafórica y el autobús convencional en tráfico mixto se reduce apreciablemente. La reducción de estas diferencias se debe principalmente a que en este caso la velocidad de operación del autobús convencional es sensiblemente mayor que en el período punta (situándose los valores medios entre 14.4 y 14.7 km/h). A su vez, esta mayor velocidad de operación del autobús convencional se relaciona con el menor volumen de tráfico mixto en las horas valle, lo cual se traduce en valores bajos del ratio Volumen/Capacidad y por tanto mayores velocidades de circulación (recuérdese la forma de las fórmulas BPR). Por su parte, los valores medios de las velocidades de operación del tranvía o metro ligero se sitúan ahora en torno a 25 km/h, mientras que para el sistema de tipo BHLS o BRT dichos valores medios oscilan alrededor de 24 km/h. Estas pequeñas disminuciones de velocidad de operación con respecto a la situación analizada en el caso  $j=1, k=1$  se deben principalmente a la influencia de uno de los datos introducidos en la aplicación numérica del modelo: el tiempo medio por pasajero por cada movimiento de entrada o salida del vehículo de transporte público en ausencia de congestión en el interior (con valores medios de 3.17 s/prs para tranvía o metro ligero y de 3.42 s/prs para BHLS/BRT en el caso  $j=1, k=1$ , y de 4.17 y 4.42 s/prs respectivamente para el caso  $j=2, k=2$ ). Esta diferencia favorecería un mayor tiempo acumulado de servicio a pasajeros (como componente del tiempo acumulado de estaciones o paradas) en el caso  $j=2, k=2$ , mientras que en el tiempo acumulado de

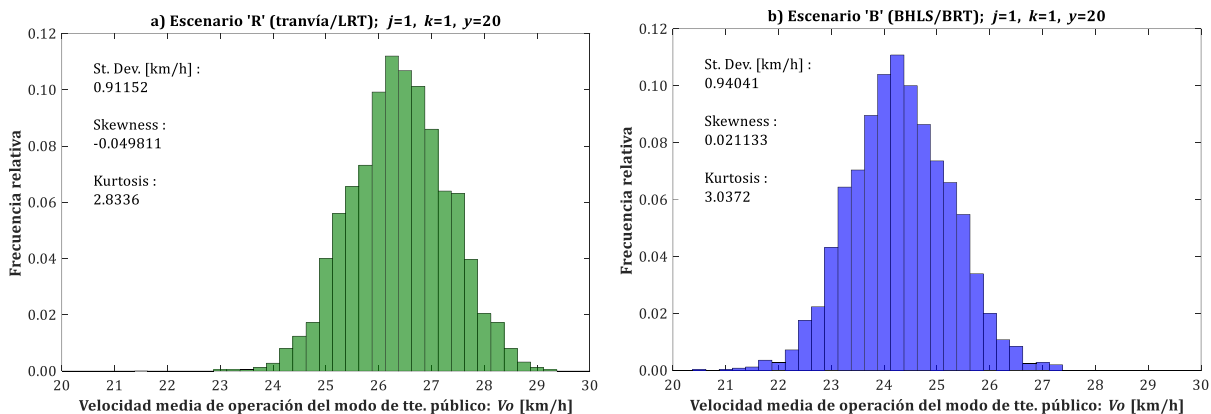
---

automóviles ligeros equivalentes. Esta disminución del volumen de tráfico mixto se debe principalmente, por un lado, a una cierta pérdida de cuota modal del automóvil particular, vinculada estrechamente a los datos introducidos en el apartado de evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo (iguales para los tres escenarios). Los valores propuestos para dichos datos (en consonancia con las futuras políticas de movilidad previsiblemente implementadas en las ciudades) tienden a desfavorecer el uso del automóvil particular y a reflejar por el contrario la promoción del conjunto de modos no motorizados y de 'micromovilidad' (viajes a pie, en bicicleta, etc.). También una ligerísima tendencia decreciente en la proporción de viajes realizados por usuarios cautivos del automóvil particular actuaría en este mismo sentido. Además, la tendencia creciente adoptada para la evolución de la tasa de ocupación en automóvil particular (prs/veh) también favorecería una ligera caída del volumen de tráfico mixto, ya que sería necesaria una menor cantidad de automóviles en circulación para realizar un mismo número de viajes en dicha opción modal. Por el contrario, el volumen total de viajes (en todos los posibles modos de transporte) tiende a aumentar, pero lo hace bastante moderadamente de acuerdo a los datos introducidos, de forma que no es suficiente para que el resultado neto (combinado con todos los efectos anteriores) no sea de disminución del volumen de tráfico mixto. La consecuencia final es el ligero aumento de la velocidad de los vehículos que circulan en tráfico mixto (incluido, en este caso, el autobús convencional).

recorrido de los tramos entre paradas apenas se manifestarían diferencias importantes entre ambas situaciones (especialmente en el caso del tranvía o metro ligero).

Por otra parte, nótese que en el período horario '2' con sentido de viaje '2' las velocidades de operación alcanzadas mediante autobús convencional durante las fases de implantación de los nuevos sistemas de transporte público de los escenarios 'R' y 'B' son prácticamente coincidentes con la del escenario '0', ya que la reducción de capacidad viaria no llega a desempeñar en este caso un papel relevante. Al tratarse de un período valle, el volumen de tráfico mixto es suficientemente bajo como para poder asumir la reducción de capacidad sin que se produzca una disminución significativa de la velocidad de circulación (es decir, los ratios Volumen/Capacidad se encuentran en los tres escenarios en la parte de menor pendiente de las curvas BPR).

Complementariamente, en la Figura 9.10 se presentan dos histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media de operación de los modos de transporte público de capacidad intermedia implantados en los escenarios 'R' y 'B', es decir, metro ligero o tranvía y BHLS o BRT, respectivamente. Estos ejemplos de histogramas se han centrado en el análisis de las condiciones correspondientes al período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ , es decir, condiciones representativas de hora punta), con las previsiones efectuadas para el año '20' ( $y=20$ ), al ser este el año central del horizonte o período de evaluación.



**Figura 9.10.** Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media de operación de los modos de transporte público de capacidad intermedia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R' (metro ligero / tranvía); b) Escenario 'B' (BHLS/BRT).

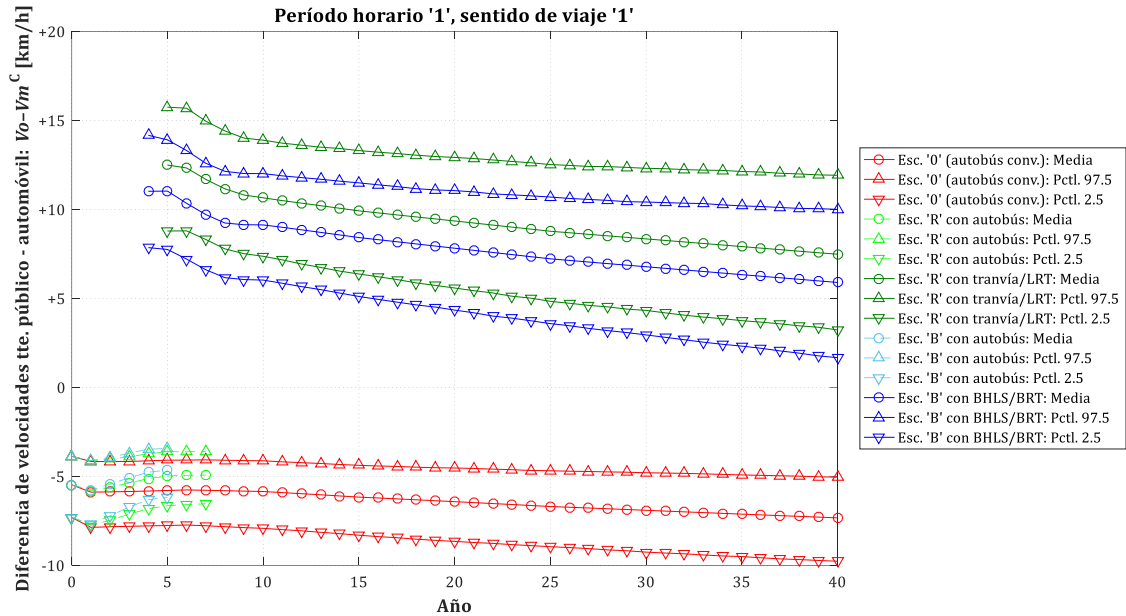
### 9.3.2.2. Diferencia entre la velocidad media de operación del transporte público y la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular

Se aborda a continuación el análisis de la diferencia prevista entre la velocidad media de operación ofrecida por los distintos modos de transporte público y la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular pronosticada para el respectivo escenario (esta última se estudia separadamente en el epígrafe 9.3.3.2.a). Esta diferencia de velocidades constituye un interesante indicador comparativo del potencial atractivo que, en una primera aproximación, estos dos tipos de opciones de movilidad (transporte público y transporte motorizado privado en automóvil particular) pueden presentar al hipotético viajero, si bien es cierto que posteriormente se analizarán indicadores mucho más completos y exhaustivos como es el caso del coste generalizado de viaje.

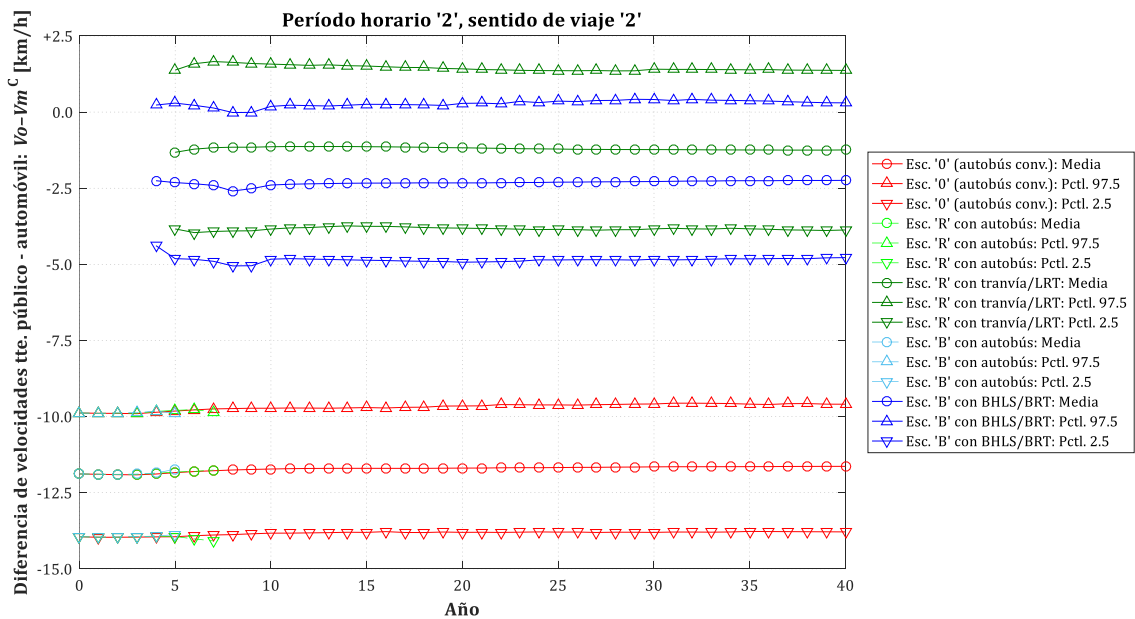
Así pues, la variable objeto de análisis en este punto queda constituida por la diferencia  $Vo_{ry1jk}^{ms} - Vm_{ry1jk}^{Cs}$  ( $Vo_{r1jk}^* - Vm_{r1jk}^C$  en el caso particular del año base), estudiándose la evolución de la misma desde el año base de partida (año '0') hasta el final del horizonte o período de evaluación (año '40'). Los parámetros estadísticos de interés escogidos para la representación de esta variable aleatoria son de nuevo la media o valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5. Igualmente, como ejemplos significativos de diferentes

períodos horarios y sentidos de viaje se seleccionan los casos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (mostrado en la Figura 9.11) y al período horario '2' en el sentido '2' (representado en la Figura 9.12).

Nótese que en estas dos figuras valores positivos de la diferencia analizada indican mayor velocidad (de operación) del modo de transporte público frente a la velocidad media (de trayecto) del automóvil particular, mientras que valores negativos significan una ventaja del automóvil en la comparación de ambas velocidades.



**Figura 9.11.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia entre la velocidad de operación del transporte público y la velocidad de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.12.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia entre la velocidad de operación del transporte público y la velocidad de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Para el caso mostrado en la Figura 9.11 (período horario '1' con sentido de viaje '1'), representativo de la situación en horas punta, se observa con claridad que la velocidad de operación del transporte público que puede ser ofrecida mediante los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica es significativamente superior a la velocidad de trayecto que en esas condiciones puede proporcionar el automóvil particular. Así, para el tranvía o metro ligero del escenario 'R', el valor medio de la diferencia de velocidades se sitúa aproximadamente entre 7.5 y 12.5 km/h, mientras que dicho valor medio presenta cuantías entre 5.9 y 11 km/h en el caso del sistema BHLS/BRT implantado en el escenario 'B'. Se trata, por tanto, de diferencias notablemente elevadas en favor de estos modos de transporte público. Obsérvese que la tendencia general en el tiempo para esta diferencia es, en ambos casos, moderadamente decreciente, pero este decrecimiento no se debe a una disminución de la velocidad de operación del transporte público a medio/largo plazo, sino principalmente a una mejora de la velocidad de trayecto en automóvil al irse generando una ligera descongestión<sup>263</sup>. Por su parte, el autobús convencional en tráfico mixto en servicio en el escenario '0' solo puede proporcionar velocidades de operación notablemente inferiores a la velocidad de trayecto en automóvil particular, con diferencias a favor del automóvil que, en valor medio, estarían comprendidas entre aproximadamente 5.5 y 7.3 km/h.

La situación mostrada en la Figura 9.12 a modo de ejemplo representativo de un período valle (período horario '2' y sentido de viaje '2') varía sustancialmente con respecto a la previamente observada en la Figura 9.11, la cual resultaba típica de un período punta. Bajo estas nuevas condiciones, la velocidad de operación de los modos de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica es en general un poco inferior a la velocidad media de trayecto en automóvil particular, debido fundamentalmente a que esta última aumenta mucho con respecto a la situación de hora punta. De esta forma, el valor medio de la diferencia de velocidades fluctúa en torno a 1.2 km/h a favor del automóvil en el caso de prestar el servicio mediante tranvía o metro ligero (escenario 'R'), y se sitúa alrededor de aproximadamente 2.3 km/h si el modo de transporte público en operación es el BHLS o BRT (escenario 'B'). Nótese que solamente con el sistema de tranvía o metro ligero el modelo prevé una probabilidad relevante (aunque reducida) de que la velocidad de operación del transporte público pueda llegar a ser superior a la velocidad media de trayecto del automóvil particular (obsérvese al respecto que el valor 0 o diferencia nula se sitúa aproximadamente en el punto medio entre los valores positivos del percentil 97.5 y la media). Por el contrario, para el sistema de BHLS o BRT el percentil 97.5 de la diferencia de velocidades es prácticamente coincidente con el 0 o valor nulo, lo que indica que la probabilidad de una velocidad mayor de este modo de transporte público con respecto al automóvil particular apenas superaría el 2.5%. Por lo que concierne al autobús convencional en tráfico mixto que permanecería en operación en el escenario '0', puede apreciarse que la inferioridad de su velocidad de operación con respecto a la de trayecto en automóvil particular resulta bastante más acusada que en el caso representativo del período punta, estando ahora el valor medio de dicha diferencia negativa en torno a 11.7 km/h (y todo ello a pesar de que objetivamente la velocidad de operación del autobús convencional es sensiblemente mayor en el ejemplo característico del período valle que en el ejemplo correspondiente al período punta). Esta circunstancia se explica de nuevo por el muy notable incremento que la velocidad de trayecto en automóvil particular experimenta en las horas valle en relación con las situaciones de hora punta.

### 9.3.2.3. Intervalo de paso entre unidades de transporte público de la línea

A continuación se pasa a estudiar el comportamiento, a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación (40 años) y desde el año base de partida (año '0'), del intervalo previsto entre el paso de dos vehículos o unidades de transporte público consecutivas en la línea objeto de análisis. Este intervalo

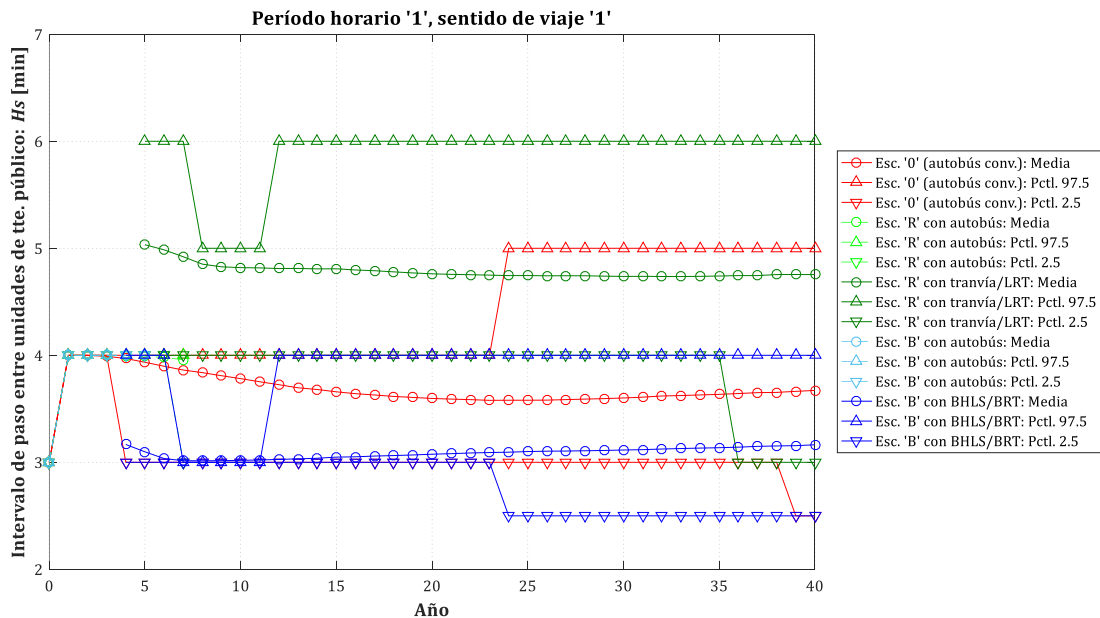
<sup>263</sup> Esta ligera descongestión (durante las fases de introducción y consolidación de los nuevos modos de transporte público en los escenarios 'R' y 'B' y durante sus respectivas fases de madurez) se vincula a una disminución del volumen de tráfico mixto en automóviles ligeros equivalentes y, consecuentemente, a una caída del ratio Volumen/Capacidad. Los factores que contribuyen a explicar esta disminución son básicamente los apuntados en la nota al pie n° 262, pero añadiendo, especialmente durante las fases de introducción y consolidación de los nuevos servicios de transporte público, el efecto de trasvase modal hacia estos nuevos modos.

constituye por tanto, desde el punto de vista del nivel de servicio para el usuario, un indicador (inversamente proporcional) de la frecuencia con la que los potenciales viajeros disponen de un servicio de transporte público adecuado a sus necesidades horarias.

Para este fin, deben tomarse en particular como variable de estudio los intervalos de diseño sometidos tanto a la restricción del rango de variación (entre sus límites mínimo y máximo) como al redondeo hacia abajo (si resultasen mayores a 2.5 minutos) que ajuste dichos intervalos a una serie de valores preestablecidos o estandarizados (2.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, ... , y sucesivos múltiplos de 5 minutos). Es decir, se estudia el intervalo que, según las previsiones del modelo en cada simulación aleatoria, sería el finalmente adoptado para la operación del servicio. Por consiguiente, la variable objeto de análisis en este epígrafe es  $Hs_{ry1jk}^{ms}$  (así como su homóloga  $Hs^*_{1jk}$  en el caso del año base).

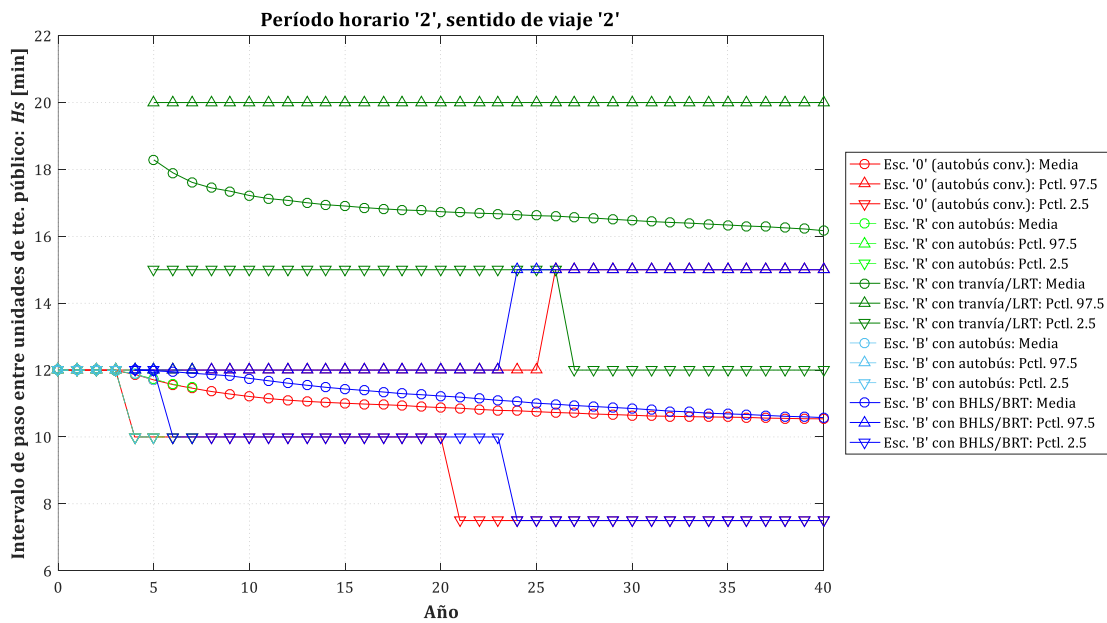
Así pues, en las Figuras 9.13 y 9.14 se presenta la evolución futura prevista por el modelo para algunos parámetros estadísticos de interés aplicados sobre la variable aleatoria  $Hs_{ry1jk}^{ms}$ , tales como el valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). En cuanto a los períodos horarios y sentidos de viaje, se han tomado nuevamente, como ejemplos representativos, los casos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.13) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.14). Obsérvese no obstante que, al ser la línea analizada de tipo convencional (longitudinal de doble sentido), los intervalos de operación han de ser comunes a ambos sentidos de viaje (estando condicionados por aquel sentido con un mayor cociente entre el volumen de diseño y el coeficiente o factor de utilización de la capacidad programada), de tal modo que los resultados presentados serían en este caso aplicables también a los sentidos opuestos.

Una primera cuestión a destacar en relación con las Figuras 9.13 y 9.14 es que, lógicamente, los intervalos de operación resultan ser mucho mayores en el caso del período horario '2' (que ejemplifica la situación en un período valle) que en el período horario '1' (representativo de una hora punta matinal). Este comportamiento responde fundamentalmente a la mayor demanda de transporte público (y por tanto mayor volumen de diseño) en los períodos punta que en los períodos valle.



**Figura 9.13.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.





**Figura 9.14.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Además, se observa que en cualquiera de los casos y modos analizados los valores medios de los posibles intervalos de operación se mantienen bastante estables a lo largo del horizonte o período de evaluación (nótese al respecto que el valor de la media estadística puede tomar cualquier número real, lo que permite un comportamiento más suave y continuo en su evolución a través del tiempo). Por el contrario, un comportamiento más irregular es el que aparentan presentar los percentiles 97.5 y 2.5, mas debe tenerse en cuenta al respecto que son las características de la variable aleatoria analizada (que por los efectos del redondeo a intervalos estandarizados solo puede tomar ciertos valores discretos), junto con la naturaleza del propio concepto de percentil, las que explican los aparentes 'saltos' o escalones en la evolución temporal de estos parámetros estadísticos.

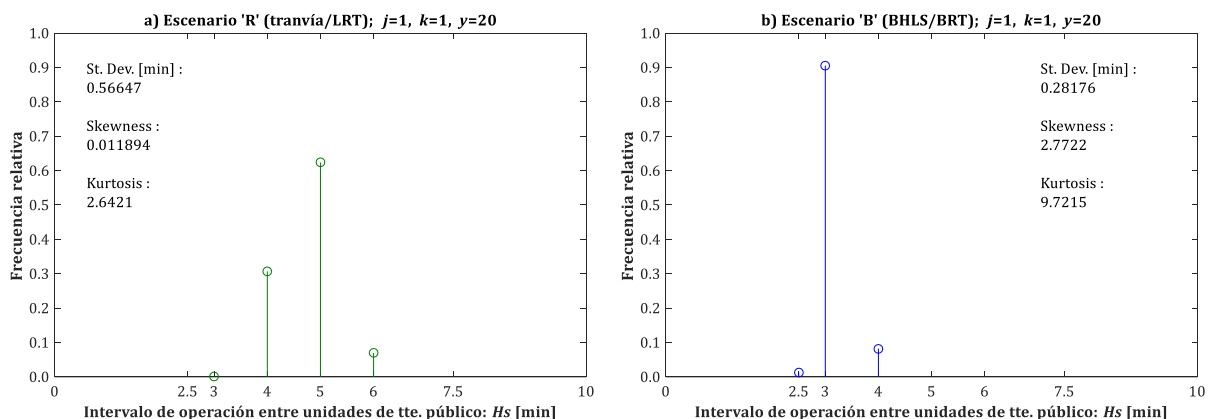
Para el caso del período horario '1' (período punta), el modo de transporte público utilizado en el escenario de referencia o escenario '0' (es decir, el autobús convencional en tráfico mixto) lleva a mantener, como valor medio, unos intervalos que en general se sitúan algo por debajo de los 4 minutos. Por su parte, el sistema BHLs o BRT implantado en el escenario 'B' permite reducir la media de los posibles intervalos a valores muy ligeramente por encima de los 3 minutos, puesto que la mayor capacidad estática de las unidades de transporte o vehículos se vería sobradamente compensada por el aumento de usuarios generado por este nuevo sistema de transporte público. Mientras, el sistema de tipo tranvía o metro ligero implantado en el escenario 'R' conllevaría en este caso unos intervalos de operación un poco mayores que los dos modos previamente citados, con valores medios que se situarían en su gran mayoría ligeramente por debajo de los 5 minutos. En este sentido, el notable aumento de la capacidad estática de las unidades de transporte de este sistema, en comparación con los dos anteriores, tiene un peso fundamental a la hora de determinar el intervalo necesario, de forma que el incremento de usuarios atraídos por este modo (por su menor coste generalizado de viaje, como se verá posteriormente) no llega a ser tan alto como para poder reducir su intervalo hasta valores inferiores a los que pueden ser mantenidos con los otros dos modos de transporte público. De todas formas, en el caso del período horario '1', como representativo de las horas punta, la diferencia entre los intervalos de operación que podrían ser ofrecidos por los distintos sistemas de transporte público se mantiene en valores notablemente reducidos (no más de dos minutos de diferencia entre las medias), por lo que no tendría un impacto demasiado significativo sobre el nivel de servicio prestado a los viajeros.

En el caso del período horario '2' (período valle), el autobús convencional (escenario '0') y el sistema de BHLs/BRT (escenario 'B') conducen a intervalos de operación muy similares entre sí, con valores



medios que se situarían entre 10 y 12 minutos. Por su parte, la operación de un sistema de tipo tranvía o metro ligero (escenario 'R') conllevaría, bajo estas condiciones, un intervalo sensiblemente mayor, con valores medios que se moverían aproximadamente entre 16 y 18 minutos para poder estar justificados por el volumen de demanda. Nótese en este sentido que el percentil 97.5 para el intervalo de este modo de transporte público queda condicionado ya por el intervalo máximo o intervalo de servicio, cifrado como dato en 20 minutos para el período horario '2' (este valor puede considerarse relativamente alto para un sistema de metro ligero, ya que es posible que en una situación real se optase por imponer un intervalo máximo de servicio algo más reducido, aunque en todo caso dependería de las particularidades concretas de la franja horaria). En general, el comportamiento observado en el período horario '2' coincide con la percepción de que, desde el punto de vista del intervalo de operación que puede ser ofrecido y mantenido, los modos de transporte público con una menor capacidad unitaria de los vehículos se adaptan mejor a los períodos valle o de baja demanda.

Finalmente, en la Figura 9.15 se incluyen histogramas (discretos) de frecuencias relativas del intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte público de la línea estudiada, para los escenarios en los que se implantarían los nuevos modos de capacidad intermedia con plataforma reservada y priorización semafórica (es decir, el escenario 'R' con metro ligero o tranvía y el escenario 'B' con BHLS o BRT). Las condiciones específicas de estos dos histogramas hacen referencia al período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ ; condiciones representativas de hora punta), así como a un horizonte temporal de previsión centrado en el año '20' ( $y=20$ ). En estos histogramas se aprecian claramente las singularidades que caracterizan a esta variable, en particular por el hecho de tratarse de una variable que, por su definición, solo puede tomar ciertos valores discretos como consecuencia del proceso de redondeo hacia abajo aplicado sobre los intervalos inicialmente calculados.



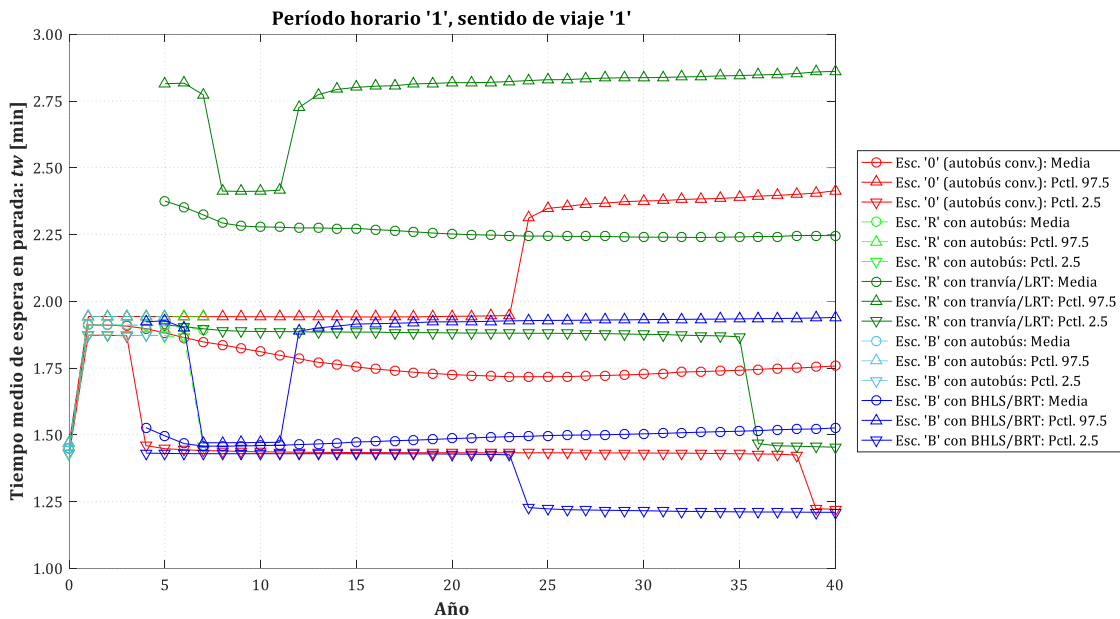
**Figura 9.15.** Histogramas (discretos) de frecuencias relativas del intervalo de operación entre vehículos o unidades de transporte público de la línea objeto de estudio, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R' (metro ligero / tranvía); b) Escenario 'B' (BHLS/BRT).

#### 9.3.2.4. Tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público

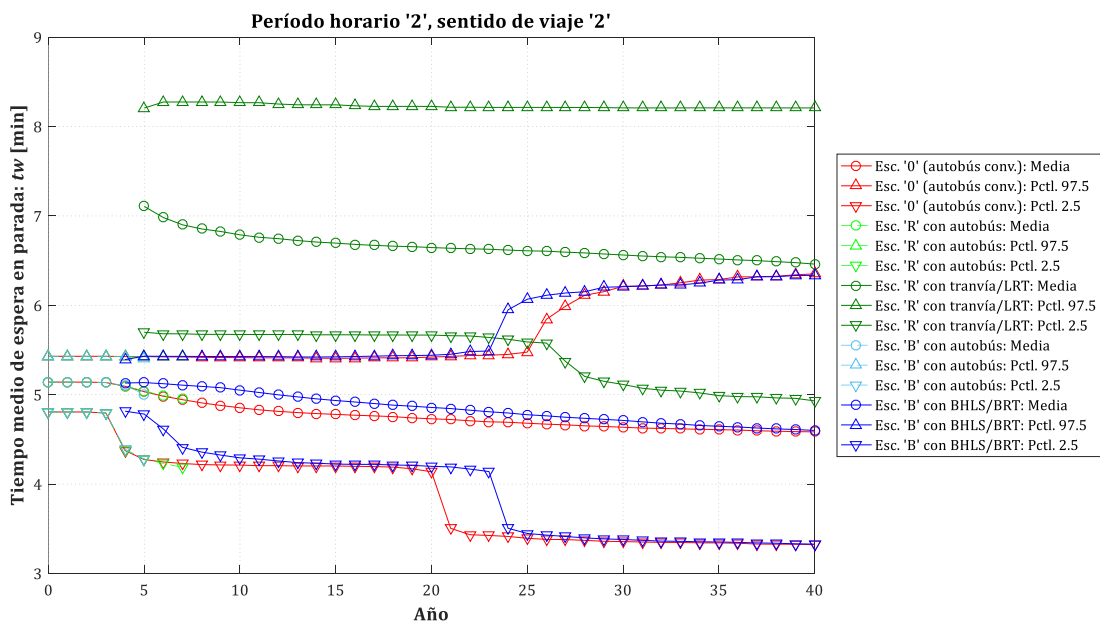
La siguiente cuestión que merece ser analizada, a raíz del intervalo de paso entre vehículos o unidades de transporte público de la línea, es el tiempo medio que los usuarios de esta modalidad de transporte permanecerían esperando en las paradas. Para ello se ha de tomar como variable de estudio  $tw_{ry1jk}^{ms}$  (o su homóloga  $tw_{r1jk}^*$  en el año base), examinándose su comportamiento durante todo el horizonte o período de evaluación contado desde el año base de partida. Obviamente los valores de esta variable están estrechamente vinculados a los intervalos de operación de la línea, por lo que existe una cierta proporcionalidad (no lineal) entre el comportamiento de ambos resultados.

Las Figuras 9.16 y 9.17 presentan por tanto los resultados obtenidos por el modelo para el tiempo promedio de espera en parada asociado a la operación de los distintos tipos de sistemas de transporte

público, mostrándose en las gráficas la media, el percentil 97.5 y el percentil 2.5 como parámetros estadísticos de interés de dicha variable aleatoria. Se mantienen como ejemplos representativos de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje los casos referidos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.16) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.17).



**Figura 9.16.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.17.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo medio de espera en parada para los usuarios del transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Paralelamente a lo observado en las Figuras 9.13 y 9.14 para los intervalos de operación, en las Figuras 9.16 y 9.17 se hace patente que los tiempos medios de espera en parada serán notablemente superiores en el caso del período horario '2' (situación representativa de un período valle) que en el período

horario '1' (condiciones típicas de hora punta), cualquiera que sea el sistema de transporte público con el que se preste el servicio.

Entrando más en detalle, para el período horario '1' con sentido de viaje '1' (Figura 9.16) se obtiene que en el escenario '0', con autobús convencional en tráfico mixto, los valores medios del tiempo de espera en parada durante los sucesivos años del horizonte o período de evaluación se sitúan mayoritariamente entre 1.7 y 1.9 minutos. Esto representa una situación intermedia con respecto a los otros dos posibles sistemas de transporte público. De hecho, para el sistema BHLS o BRT en servicio en el escenario 'B', los valores medios del tiempo de espera estarían siempre en torno a 1.5 minutos, mientras que para el tranvía o metro ligero del escenario 'R' los posibles tiempos de espera en parada conducirían a valores medios entre 2.2 y 2.4 minutos. Nótese, de todos modos, que en las condiciones propias del período punta las posibles diferencias entre los tiempos medios de espera resultantes de utilizar los distintos sistemas de transporte público son de muy pequeña magnitud, por lo que el impacto de este aspecto sobre la mayor o menor conveniencia de uno u otro sistema durante las horas punta sería muy limitado.

Por otra parte, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.17) puede observarse que el servicio de autobús convencional en tráfico mixto (escenario '0') y el de BHLS o BRT (escenario 'B') conllevan tiempos de espera en parada muy próximos entre sí, con valores medios comprendidos aproximadamente entre 4.6 y 5.1 minutos. Mientras, la prestación del servicio mediante tranvía o metro ligero (escenario 'R') implicaría, durante este período horario, tiempos de espera en parada moderadamente superiores, alcanzándose valores medios entre 6.4 y 7.1 minutos. La desventaja comparativa del tranvía o metro ligero en este aspecto es por tanto más apreciable que la existente en el caso que representa al período punta, aunque se mantendría no obstante en unos niveles bastante asumibles.

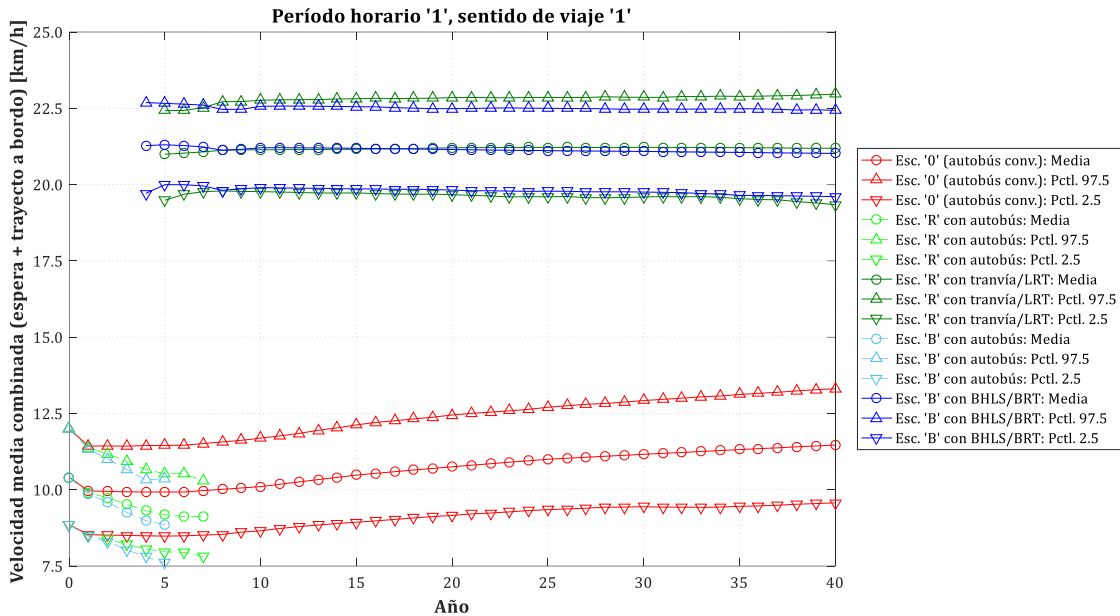
### 9.3.2.5. Velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo

A continuación se estudia el comportamiento de una nueva variable que tenga en cuenta conjuntamente los efectos del tiempo medio de espera en parada y de la velocidad de operación del modo de transporte público, dada una determinada distancia media de desplazamiento (entre la parada o estación de subida y la parada o estación de bajada) de los usuarios de este tipo de transporte. Se define por tanto este nuevo resultado (bajo la denominación de velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo) como la distancia media recorrida por los pasajeros a bordo del vehículo de transporte público (variable  $Ltpb_{1,jk}$ ) dividida entre la suma del tiempo medio de espera en parada (variables  $tw_{ry1jk}^{ms}$  o  $tw_{r1jk}^*$  si se trata del año base) y el tiempo medio invertido por cada pasajero a bordo del vehículo (variables  $tv_{ry1jk}^{ms}$  o  $tv_{r1jk}^*$ )<sup>264</sup>, que a su vez depende de la velocidad de operación y de la propia distancia media de desplazamiento. Así pues, esta velocidad combinada representa, para el potencial usuario, la velocidad media de viaje en aquellas etapas del mismo que están relacionadas más estrechamente con las características de operación de la línea de transporte público (se excluyen las etapas de acceso, de dispersión y, en caso de que existiera, de transbordo a una segunda línea), de modo que solo se refleja la relación entre la distancia que el usuario pretende viajar en el vehículo de transporte público y el tiempo transcurrido desde la llegada del pasajero a la parada de origen hasta su bajada en la parada de destino (todo ello en términos del 'pasajero medio'). No obstante, a pesar del notable interés de esta velocidad combinada como variable de nivel de servicio del transporte público, no debe olvidarse que los tiempos de espera en parada y de viaje a bordo del vehículo son valorados subjetivamente por los viajeros de forma notablemente distinta (en general más negativamente el primero de ellos).

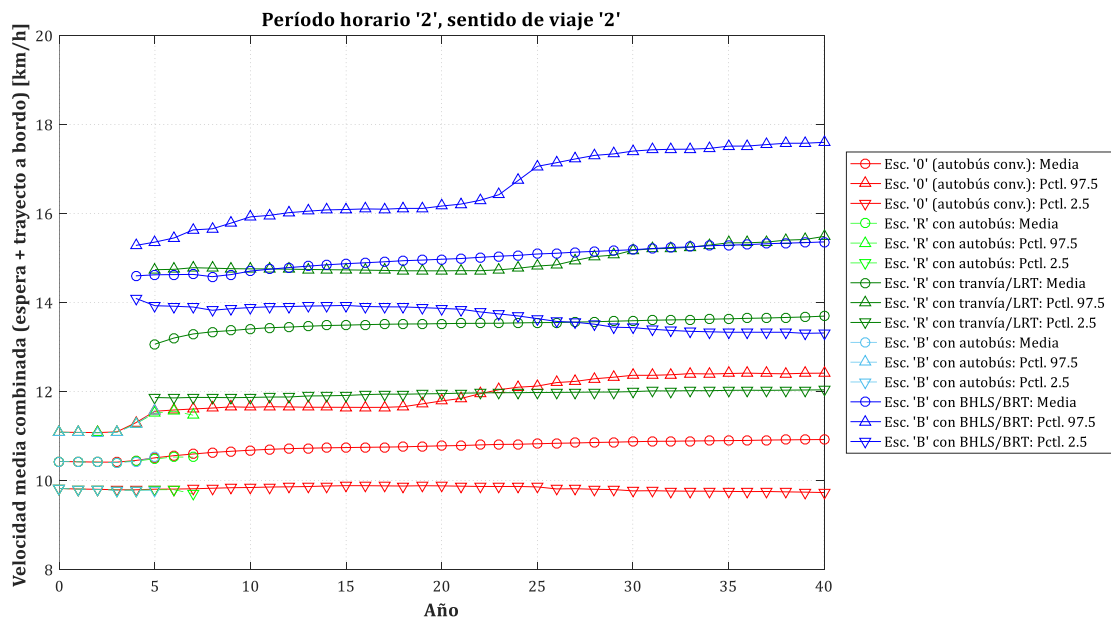
En las Figuras 9.18 y 9.19 se muestran los resultados obtenidos, de acuerdo al modelo empleado, para esta velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo, presentándose su evolución prevista desde el año base de partida (año '0') hasta el final del horizonte o período de evaluación. Como parámetros estadísticos de interés de la correspondiente variable aleatoria se muestran en dichas

<sup>264</sup> Nótese que, con las unidades del modelo, el resultado de este cálculo entre variables debe ser multiplicado por 60 para convertirlo de km/min a km/h.

figuras la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). En consonancia con los análisis anteriores, se toman como ejemplos representativos de distintos tipos de períodos horarios y sentidos de viaje los casos concernientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.18) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.19).



**Figura 9.18.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

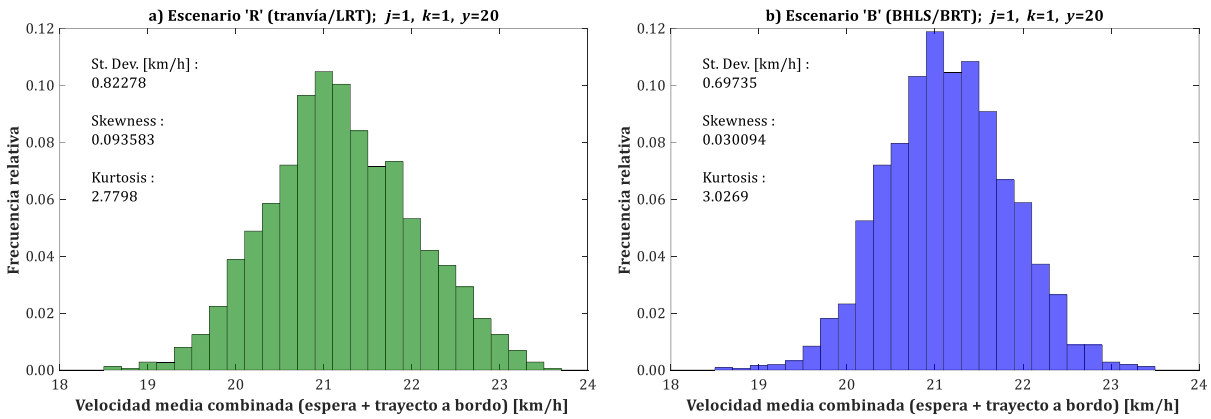


**Figura 9.19.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En referencia a la Figura 9.18 (período horario '1' con sentido de viaje '1', como ejemplo característico de horas punta), una primera y destacada conclusión es que las velocidades combinadas de espera en parada y trayecto a bordo proporcionadas por el servicio de tranvía o metro ligero en el escenario 'R', y por el sistema de BHLS o BRT en el escenario 'B', son prácticamente coincidentes, tanto en sus valores medios (que se enmarcan entre 21.0 y 21.3 km/h) como en los percentiles 97.5 y 2.5. Esta importante similitud se produce porque el ligeramente menor tiempo de espera en parada del sistema BHLS/BRT compensa —en este caso particular de forma casi exacta— la pequeña diferencia de velocidad de operación favorable al tranvía o metro ligero. Por su parte, el servicio de autobús convencional en tráfico mixto existente en el escenario de referencia o escenario '0' solo es capaz de ofrecer velocidades combinadas de espera en parada y trayecto a bordo muy inferiores a las obtenidas por los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica, con unos valores medios para el autobús convencional que se situarían entre 9.9 y 11.5 km/h (si bien es cierto que con una tendencia ligeramente positiva a lo largo del tiempo). Además, puede observarse que esta velocidad combinada resulta incluso inferior para el servicio de autobús convencional todavía operativo en la etapa inicial de los escenarios 'R' y 'B' (es decir, en las fases de implantación de los nuevos modos de transporte público), lo cual es una muestra de los trastornos de movilidad generados por las obras de construcción del nuevo sistema de transporte público, en especial durante los períodos punta.

Para las condiciones del período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.19), representativas de un período valle, se observa sin embargo que la velocidad combinada de espera en parada y trayecto a bordo que es capaz de proporcionar el servicio de BHLS o BRT del escenario 'B' resulta moderadamente superior a la que se obtendría mediante la operación de una línea de tranvía o metro ligero en el escenario 'R', con valores medios entre 14.6 y 15.4 km/h en el primer caso y entre 13.1 y 13.7 km/h en el segundo (no obstante, obsérvese que el percentil 97.5 del tranvía o metro ligero se sitúa por encima del percentil 2.5 del BHLS o BRT, lo que indica que estadísticamente existe cierta probabilidad —aunque baja— de que la comparativa de velocidades combinadas sea favorable al tranvía o metro ligero). Nótese además que para estos dos modos de transporte público la velocidad combinada de espera en parada y trayecto a bordo resulta notablemente más baja en el caso del período valle que en el caso del período punta, debido al elevado peso relativo que tiene el tiempo de espera (derivado del intervalo de operación) en el caso del período valle. Por el contrario, las velocidades combinadas obtenidas por el servicio de autobús convencional del escenario '0' son bastante similares en los casos del período horario '1' con sentido de viaje '1' y del período horario '2' con sentido de viaje '2', compensándose aproximadamente los efectos contrapuestos del tiempo de espera en parada (más breve para el caso  $j=1, k=1$ ) y de la velocidad de operación (superior en el caso  $j=2, k=2$ ). Así pues, los valores medios de la velocidad combinada en las condiciones propias de este segundo caso se situarían, para el autobús convencional, entre 10.4 y 10.9 km/h. En consecuencia, la ventaja comparativa que en este aspecto presentan los sistemas de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica en relación con el autobús convencional se reduce sensiblemente en los períodos valle, en contraste con los períodos punta.

Adicionalmente, la Figura 9.20 se centra en la representación de los histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media combinada de espera en parada y de trayecto a bordo del vehículo de transporte público, tanto para el escenario 'R' (con metro ligero o tranvía) como para el escenario 'B' (con BHLS o BRT). Nótese que los resultados analizados en estas gráficas corresponden a las condiciones representativas de hora punta ( $j=1, k=1$ , es decir, período horario '1' con sentido de viaje '1') y al año '20' ( $y=20$ ) del horizonte o período de evaluación.

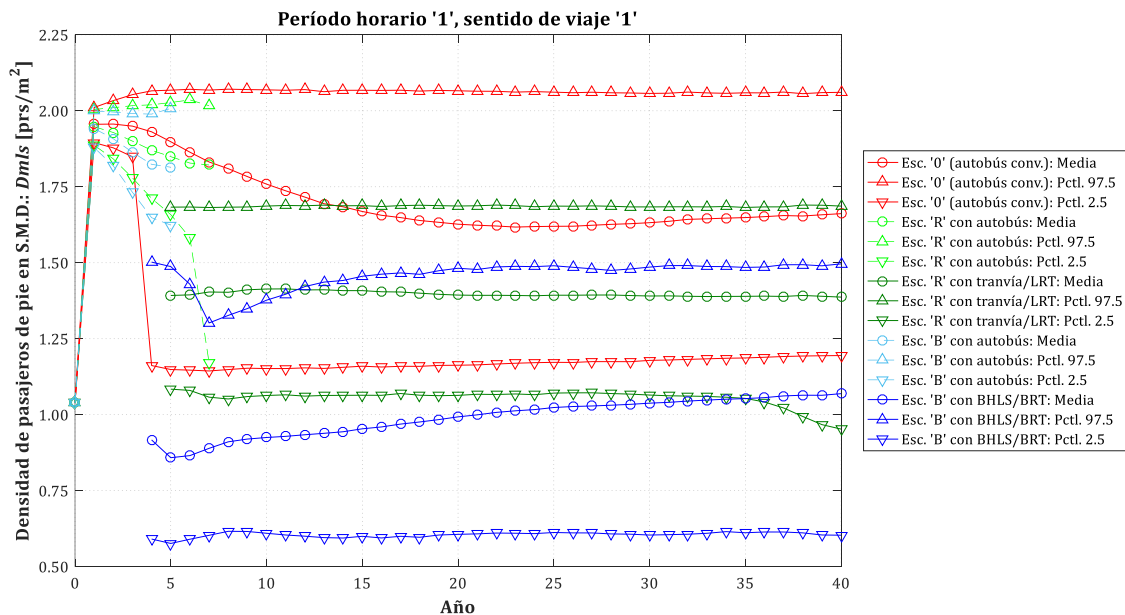


**Figura 9.20.** Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad media combinada de espera en parada y trayecto a bordo del transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R' (metro ligero / tranvía); b) Escenario 'B' (BHLs/BRT).

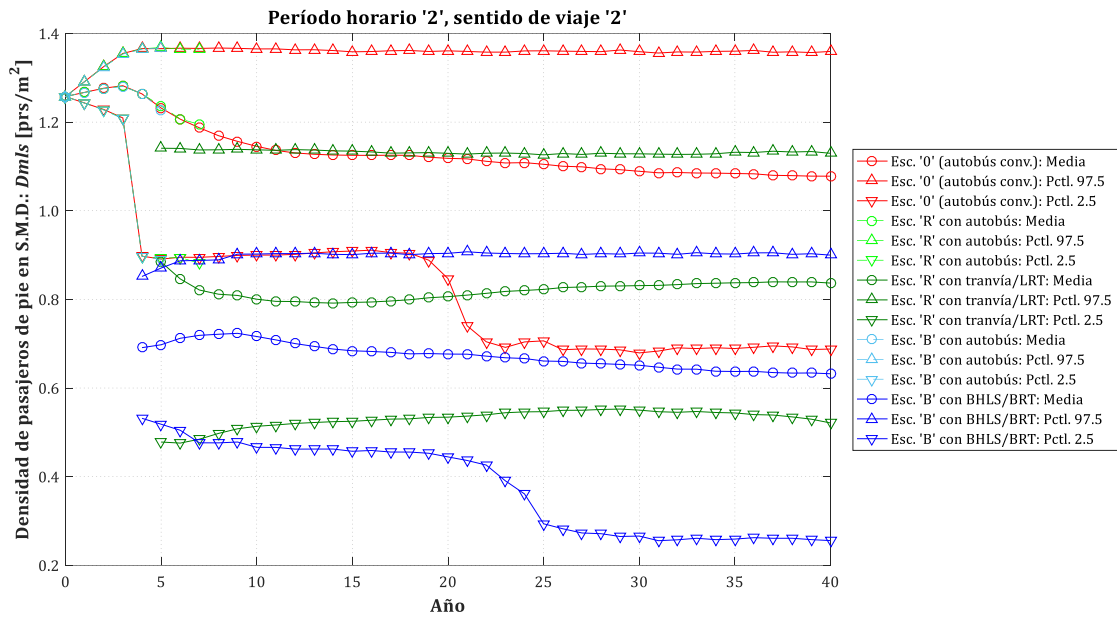
**9.3.2.6. Densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda**

A continuación se afronta el estudio de los resultados relativos a la densidad media de pasajeros de pie prevista por el modelo para la sección de máxima demanda de la línea, la cual constituye por tanto el tramo entre paradas que, dado un determinado período horario y sentido de viaje, presentará una mayor aglomeración de usuarios. Así pues, la variable representada gráficamente en las Figuras 9.21 y 9.22 es  $Dm_{S_{y1jk}}^{ms}$  ( $Dm_{S_{y1jk}}^*$  en el caso del año base o año '0'), estudiándose la evolución de la misma a lo largo de los 40 años que componen el horizonte o período de evaluación.

En relación con el análisis estadístico de la variable aleatoria  $Dm_{S_{y1jk}}^{ms}$  presentado en las Figuras 9.21 y 9.22, se toman nuevamente como parámetros de interés el valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). Por otra parte, como ejemplos representativos de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje, se seleccionan una vez más aquellos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.21) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.22).



**Figura 9.21.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.22.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En la Figura 9.21 puede apreciarse cómo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' (ejemplo de horas punta), la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda en el escenario de referencia o escenario '0' (es decir, manteniendo la operación con autobús convencional en tráfico mixto) presentaría, a lo largo del horizonte o período de evaluación, valores medios que fluctuarían aproximadamente entre 1.6 y 2.0 prs/m<sup>2</sup> (tras un significativo incremento inicial ligado al aumento del intervalo de operación). En el escenario 'B', con la implantación de una línea de tipo BHLS/BRT, el valor medio de la densidad en la sección de máxima demanda se vería reducido a cifras en el entorno de 1 prs/m<sup>2</sup>. Por su parte, la implantación de una línea de tranvía o metro ligero en el escenario 'R' conllevaría densidades en la sección de máxima demanda que, de media, se situarían en torno a 1.4 prs/m<sup>2</sup>. Dado que las unidades de tranvía o metro ligero disponen de una capacidad estática muy superior a la de los vehículos de BHLS o BRT y pueden calificarse por tanto como más espaciales, este resultado (que la densidad de pasajeros de pie pueda ser mayor con el sistema de tranvía o metro ligero que con el de BHLS o BRT) podría parecer, a primera vista, contraintuitivo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las densidades de pasajeros de pie están fuertemente dominadas por la influencia del intervalo de operación, dado que este se reajusta automáticamente en el modelo —al menos mientras no se alcance el límite mínimo— al objeto de que no se sobrepasen en ningún momento unos niveles de ocupación que se hayan establecido como adecuados. En particular, juega un papel importante al respecto el efecto de redondeo inferior que se produce sobre los intervalos de operación (en comparación con el intervalo que sería estrictamente suficiente para satisfacer el volumen de diseño), ya que dicho efecto de redondeo hacia abajo se traduce en un cierto 'exceso' de capacidad programada, lo que a su vez conlleva una menor ocupación media por vehículo o unidad de transporte y por tanto una menor densidad de pasajeros. Este proceso de redondeo inferior de los intervalos tiene un mayor efecto reductor sobre la densidad de pasajeros cuanto menor sea el cociente entre el intervalo redondeado o estandarizado y el estrictamente necesario para atender el volumen de diseño (por ejemplo, un intervalo estrictamente calculado de 3.9 minutos, en caso de quedar reducido en la práctica a 3 minutos, genera un exceso relativo de capacidad programada del 30%).

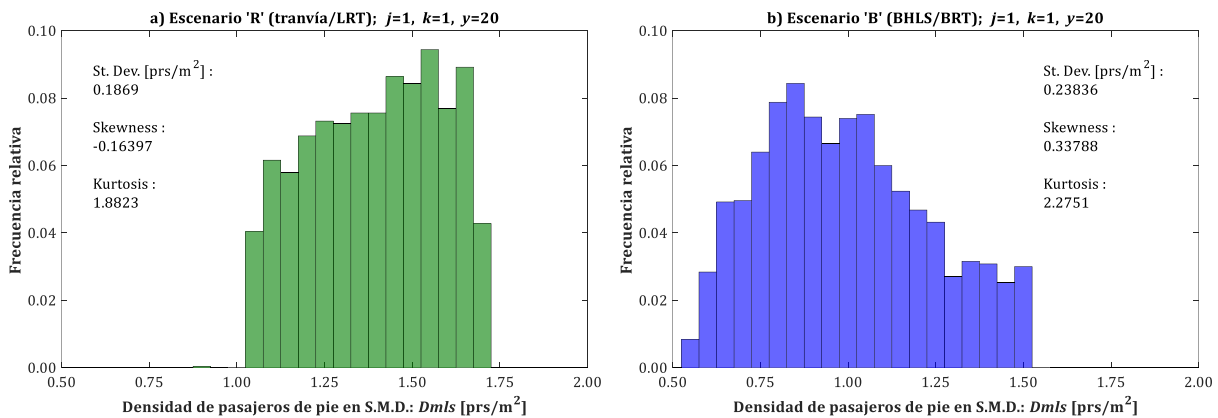
Otro potencial factor que, en general, se debe tener en cuenta en relación con la ocupación media por vehículo o unidad de transporte y, consiguientemente, con la densidad de pasajeros de pie, es la posibilidad de que en líneas convencionales de doble sentido el intervalo de operación (y por tanto la capacidad ofrecida) esté condicionado por los volúmenes de demanda existentes en el sentido opuesto



al analizado. En esos casos, la ocupación media por vehículo y las densidades de pasajeros de pie serán inferiores a las que a ese sentido de operación le correspondería por su propio volumen de diseño. Este hecho podría conducir a ocupaciones anormalmente bajas en uno de los dos sentidos de aquellas líneas que cubran flujos de viaje marcadamente pendulares (viajes de ida y de vuelta concentrados en diferentes períodos del día). No obstante, ese no es el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' en la línea analizada, ya que corresponde a un período y sentido de máxima demanda.

En el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.22), representativo de los períodos valle, las densidades de pasajeros de pie resultantes son inferiores a las obtenidas en el período horario '1', tal como era previsible. Se mantiene de todas formas la circunstancia de que el sistema de tipo BHLS/BRT en servicio en el escenario 'B' proporciona unas densidades de pasajeros de pie (valores medios entre 0.6–0.75 prs/m<sup>2</sup>, aproximadamente) algo menores que el modo tranviario o de metro ligero implantado en el escenario 'R' (en torno a 0.8–0.9 prs/m<sup>2</sup> de valores medios), siendo inferiores en ambos casos a las que se obtendrían con el autobús convencional en tráfico mixto operando en el escenario de referencia o escenario '0' (valores medios aproximadamente entre 1.05–1.3 prs/m<sup>2</sup>).

Para concluir, la Figura 9.23 muestra histogramas de frecuencias relativas de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, dadas las condiciones representativas del período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ ; condiciones propias de hora punta) y las previsiones realizadas para el caso del año '20' ( $y=20$ ). Se analizan al respecto los resultados obtenidos para los escenarios 'R' (con metro ligero o tranvía como modo de transporte público) y 'B' (con BHLS o BRT). Como particularidades, se observan de nuevo, por una parte, los efectos de que esta variable esté relacionada de una forma muy directa con el intervalo redondeado a ciertos valores discretos. Por otra parte, se aprecia en estos histogramas el hecho de que, a efectos prácticos, los niveles de ocupación por vehículo permisibles —y por tanto la densidad de pasajeros de pie resultante— quedan limitados (sobre todo superiormente) a un determinado rango de variación, a través del proceso por el cual se efectúa el dimensionamiento del servicio de transporte público (es decir, la elección del intervalo de operación necesario para cada caso).



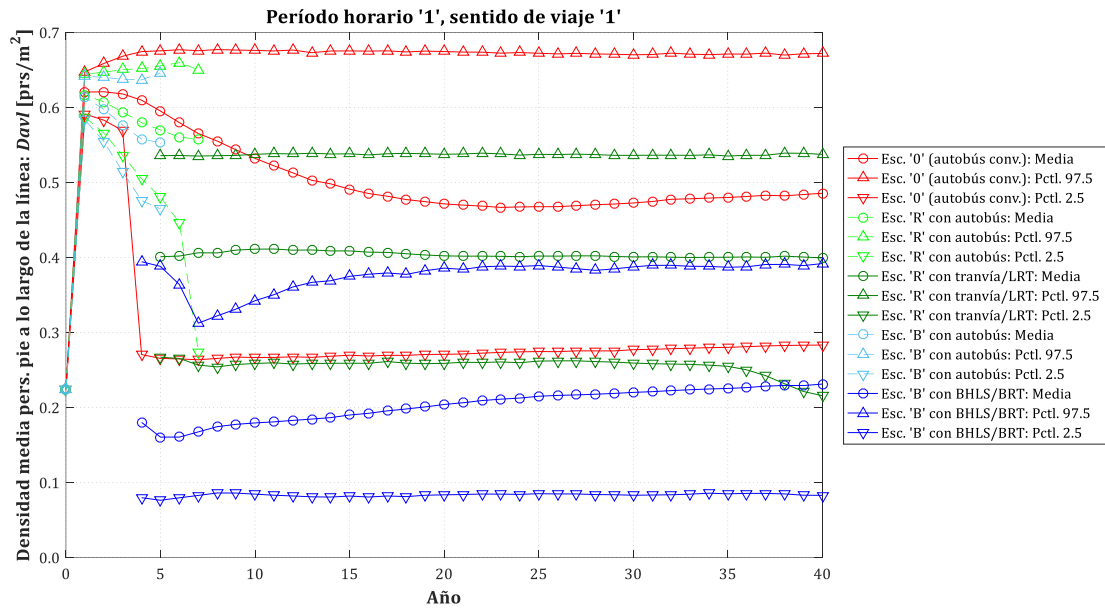
**Figura 9.23.** Histogramas de frecuencias relativas de la densidad de pasajeros de pie en la sección de máxima demanda de la línea, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R' (metro ligero / tranvía); b) Escenario 'B' (BHLS/BRT).

### 9.3.2.7. Densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea

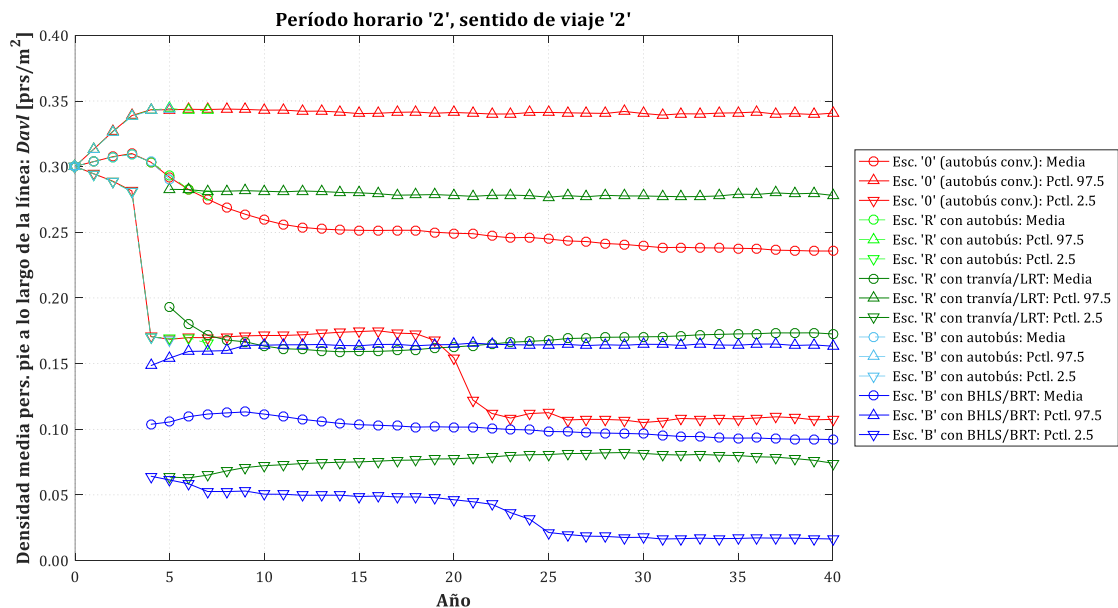
A continuación se resumen gráficamente en las Figuras 9.24 y 9.25 los resultados concernientes a la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo del recorrido de la línea, siendo por tanto en dichas figuras  $DavI_{ry1jk}^{ms}$  ( $DavI_{1jk}^*$  en el año base o año '0') la variable objeto de análisis. Para ello se representa en estos gráficos la evolución prevista a lo largo del horizonte o período de evaluación de los mismos parámetros estadísticos de interés que se vienen considerando en figuras anteriores, es decir, la media de la variable, su percentil 97.5 y el percentil 2.5. Se mantienen también, como situaciones de estudio



que ejemplifican las diferencias entre períodos horarios y sentidos de viaje, los casos relativos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.24) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.25).



**Figura 9.24.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.25.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Para el ejemplo de aplicación cuyos resultados al respecto se presentan en las Figuras 9.24 y 9.25, el comportamiento relativo o comparativo de la densidad de pasajeros de pie promediada a lo largo de la línea en los diferentes escenarios con sus respectivos modos de transporte público (autobús convencional en tráfico mixto, tranvía o metro ligero y BHLs o BRT) no difiere en gran medida del ya observado para la densidad en la sección de máxima demanda, si bien se obtienen, como es lógico, valores notablemente inferiores a aquellos que caracterizaban al tramo o sección que soporta un mayor volumen de pasajeros. Así pues, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', las mayores

densidades de pasajeros de pie promediadas a lo largo de la línea corresponden al escenario de referencia o escenario '0' (autobús convencional), con valores medios que permanecen comprendidos entre 0.45 y 0.65 prs/m<sup>2</sup> durante todo el período u horizonte de evaluación (aprox. 0.23 prs/m<sup>2</sup> en el año base debido a que todavía no se ha producido el salto de intervalo observado en la Figura 9.13). Tanto para el escenario 'R' con metro ligero o tranvía, como para el escenario 'B' con BHLS o BRT, se obtendrían densidades promediadas inferiores a las del autobús convencional en el escenario '0', siendo las menores de todas ellas las correspondientes al sistema de tipo BHLS o BRT (aprox. 0.15–0.25 prs/m<sup>2</sup> como valores medios). Frente a estas, la operación en la línea de un sistema de tranvía o metro ligero conduciría a densidades promediadas cuyo valor medio se situaría en el entorno de 0.4 prs/m<sup>2</sup>.

Por su parte, para el período horario '2' con sentido de viaje '2' se mantiene una tendencia similar en la comparación entre las distintas opciones de transporte público, pero con valores todavía más reducidos: medias en torno a 0.23–0.32 prs/m<sup>2</sup> para el autobús convencional en el escenario '0', 0.15–0.20 prs/m<sup>2</sup> para el tranvía o metro ligero en el escenario 'R', y en torno a 0.1 prs/m<sup>2</sup> para el sistema BHLS/BRT del escenario 'B'.

En cualquiera de los casos, obsérvese que las densidades de pasajeros de pie promediadas a lo largo de toda la línea se mantienen en valores notablemente bajos.

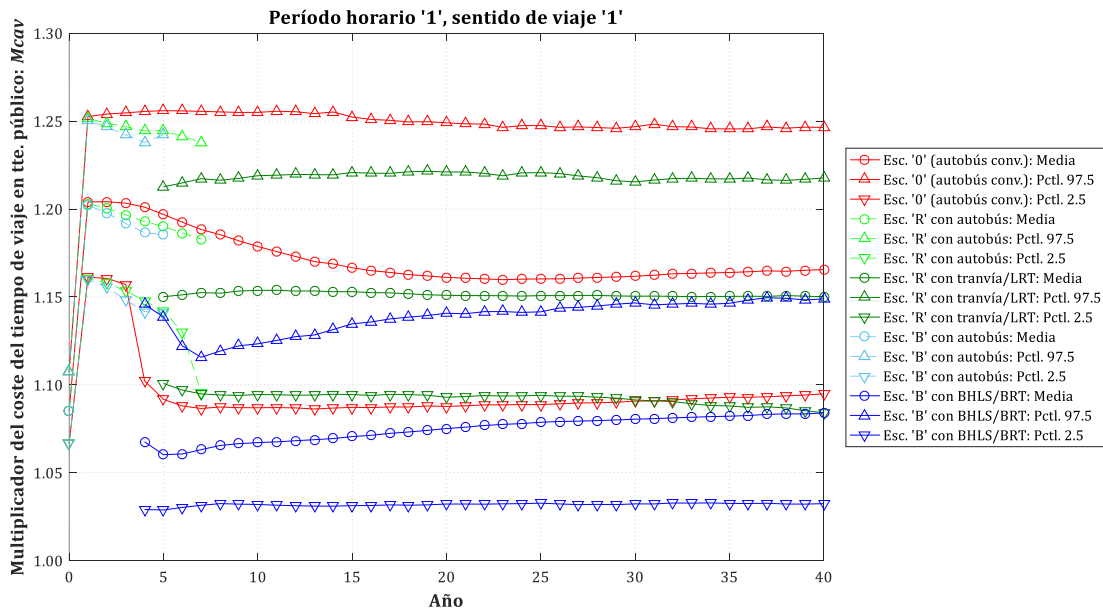
### 9.3.2.8. Multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros

Relacionado con las densidades de pasajeros de pie a bordo de los vehículos de transporte público, y con la propia distribución de los usuarios entre pasajeros con asiento disponible y pasajeros sin él, se estudian a continuación los resultados obtenidos para la variable definida como multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros (variable  $M_{cav}^{ms}_{r1jk}$ , o su homóloga  $M_{cav}^*_{r1jk}$  en el año base). Este multiplicador se puede interpretar como un indicador agregado que sintetiza las condiciones medias de incomodidad experimentadas por el conjunto de usuarios de la línea a consecuencia del mayor o menor nivel de aglomeración de pasajeros que existe en los vehículos durante su recorrido, de forma que valores más bajos indican una mayor disponibilidad de asientos para los viajeros y una menor densidad de pasajeros de pie.

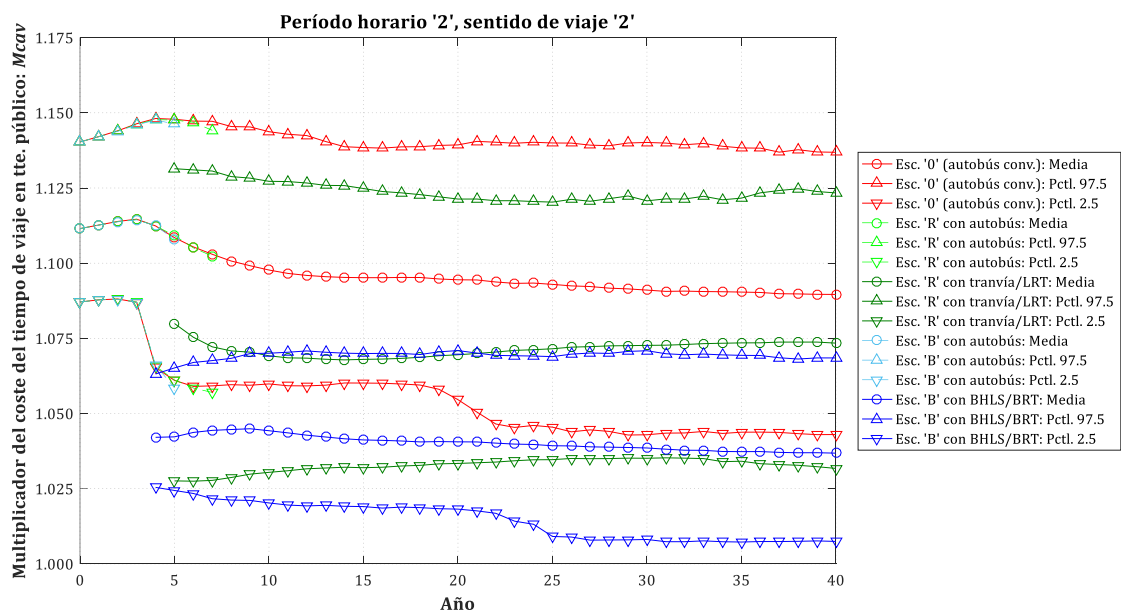
Por consiguiente, en las Figuras 9.26 y 9.27 se muestra la evolución de esta variable aleatoria desde el año base hasta el final del horizonte o período de evaluación a través de parámetros estadísticos tales como su media y sus percentiles 97.5 y 2.5. A tal efecto, los ejemplos representativos de distintos tipos de períodos horarios y sentidos de viaje son los mismos que en casos anteriores, es decir, el período horario '1' con sentido de viaje '1' (representado en la Figura 9.26) y el período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.27).

Por lo que respecta al período horario '1' con sentido de viaje '1', característico de las horas punta, los resultados mostrados en la Figura 9.26 indican que sería el servicio mediante BHLS o BRT (escenario 'B') el que proporcionaría menores valores del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros. Concretamente, los valores medios así obtenidos estarían comprendidos entre 1.06 y 1.09 a lo largo del período de evaluación. Por encima de los valores correspondientes al BHLS o BRT se sitúan tanto el servicio de tranvía o metro ligero (escenario 'R') como el de autobús convencional en tráfico mixto del escenario '0', con una diferencia entre ellos favorable al metro ligero o tranvía, aunque no muy marcada (especialmente tras el primer tercio del horizonte o período de evaluación). Así pues, para el modo tranviario, los valores medios del multiplicador se situarían en torno a 1.15, mientras que en el escenario '0', una vez superado el año base, estarían comprendidos entre 1.16 y 1.21. Los posibles motivos de la limitada magnitud de las diferencias observadas entre los distintos modos de transporte público en lo que concierne a este multiplicador hay que buscarlos de nuevo, por un lado, en el reajuste automático de los intervalos de operación para satisfacer los criterios de dimensionamiento del servicio, junto con el

consiguiente redondeo inferior que, según el caso, puede generar una cierta capacidad 'sobrante' en la programación efectiva de dicho servicio. Por otra parte, debe tenerse en cuenta la influencia que sobre este índice tiene el ratio entre el número de plazas de asiento y el número de plazas de pie de cada tipo de vehículo o unidad de transporte. Así, según los datos propuestos para la aplicación numérica del modelo, este ratio es de 0.47 para las unidades de tranvía o metro ligero, de 0.55 para el autobús convencional, y de 0.59 para los vehículos de BHLS o BRT. Esta mayor proporción relativa de asientos en los vehículos de tipo autobús (ya sea convencional o, sobre todo, BHLS/BRT) contribuiría a explicar los moderados resultados del tranvía o metro ligero en lo que a este índice o multiplicador se refiere.



**Figura 9.26.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.27.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2', mostrado en la Figura 9.27 y representativo de horas valle, la situación comparativa entre los distintos sistemas de transporte público es bastante similar a la descrita para el período horario '1' y sentido de viaje '1', aunque con valores generales del multiplicador que —tal como era de esperar— son en este caso más reducidos. Así, para la operación mediante BHLS o BRT planteada en el escenario 'B', los valores medios del multiplicador se sitúan aproximadamente en 1.04, mientras que para la línea de tranvía o metro ligero implantada en el escenario 'R' dichos valores medios están en torno a 1.07–1.08. Algo mayores —aunque no mucho— resultarían estos índices en caso de mantenerse la operación mediante autobús convencional en tráfico mixto (escenario '0'), alcanzándose de este modo valores medios del multiplicador encuadrados aproximadamente entre 1.09 y 1.11.

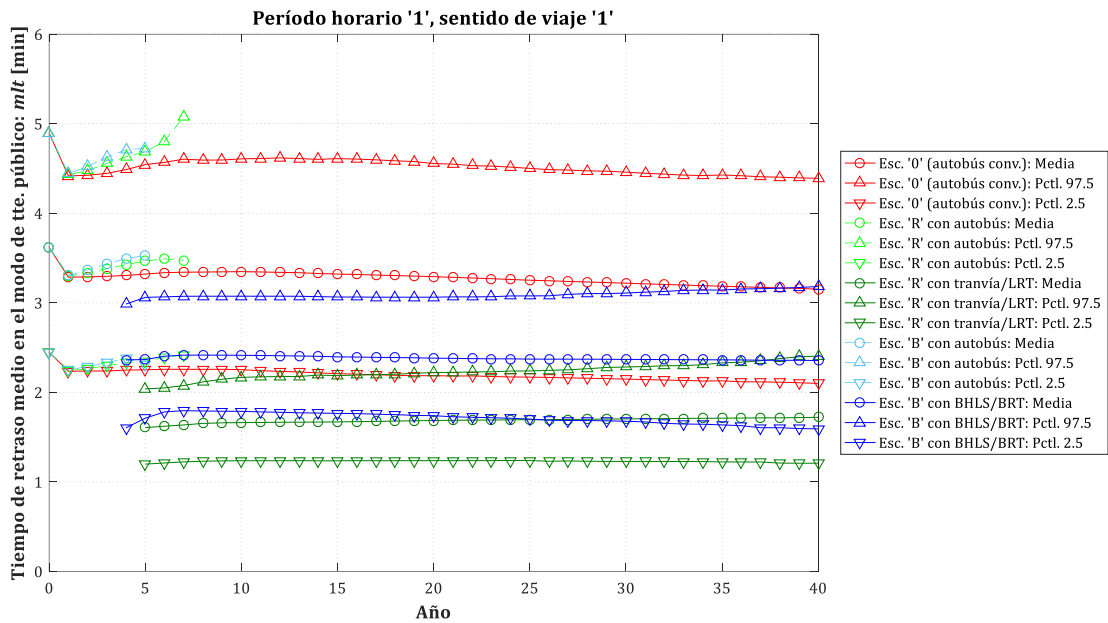
### 9.3.2.9. Tiempo de retraso medio en el modo de transporte público

Para concluir con el estudio de las variables que afectarían más directamente al nivel de servicio del transporte público, se examinan a continuación los resultados relativos al tiempo medio de retraso en el servicio operado mediante cada uno de los modos objeto de análisis. Se recuerda que este tiempo medio de retraso se definía como la esperanza matemática o media de las desviaciones (sin contabilizar los posibles tiempos de adelanto como desviaciones negativas)<sup>265</sup> entre la hora real de partida desde las estaciones y paradas de la línea y el horario previsto, programado o anunciado para cada una de esas salidas. La variable a estudiar en este análisis es por tanto  $mlt_{ry1jk}^{ms}$  (junto con su homóloga  $mlt_{r1jk}^*$  en el año base), representando su cuantía un indicador inversamente proporcional al nivel de fiabilidad de horarios del transporte público.

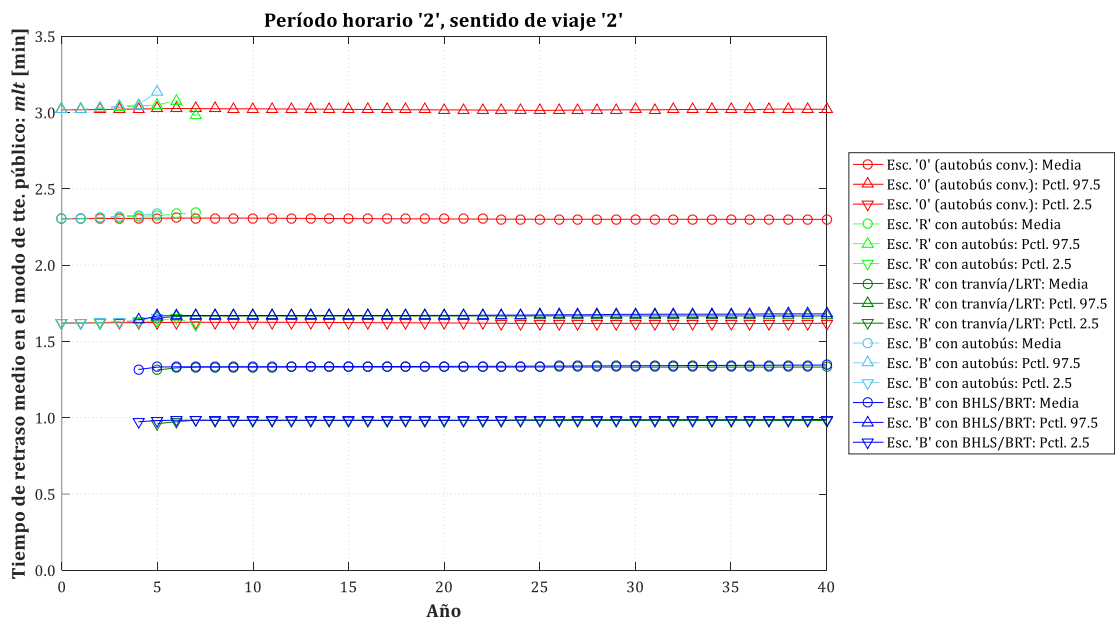
Así pues, en las Figuras 9.28 y 9.29 se presenta la evolución prevista por el modelo —desde el año base de partida (año '0') hasta el final del horizonte o período de evaluación— para los parámetros estadísticos de interés (media, percentil 97.5 y percentil 2.5) aplicados sobre las variables aleatorias  $mlt_{r1jk}^*$  y  $mlt_{ry1jk}^{ms}$ . Siguiendo el criterio establecido, se seleccionan como ejemplos representativos de los diferentes períodos horarios y sentidos de viaje los casos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.28) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.29).

En la Figura 9.28 puede apreciarse que, en las condiciones del período horario '1' con sentido de viaje '1' (representativas de horas punta), el sistema de tranvía o metro ligero del escenario 'R' proporciona las mejores prestaciones en cuestión de fiabilidad horaria, con valores centrales del tiempo de retraso medio en torno a 1.6–1.7 minutos. Algo mayores serían los tiempos medios de retraso en el supuesto de operación del servicio mediante una línea de BHLS o BRT dentro del escenario 'B', en cuyo caso los valores medios se situarían en aproximadamente 2.4 minutos. Frente a estos dos modos con plataforma reservada y priorización semafórica, el escenario de referencia o escenario '0', en el que la operación de la línea con autobús convencional en tráfico mixto se prolonga indefinidamente, conduce a los resultados más desfavorables en términos de fiabilidad horaria, ya que en este caso los valores medios del tiempo de retraso computados a lo largo del horizonte o período de evaluación estarían comprendidos entre 3.15 y 3.35 minutos (aproximadamente el doble que con tranvía o metro ligero). Aunque estas diferencias pueden parecer en principio bastante modestas, ha de tenerse en cuenta al respecto la alta valoración relativa del tiempo de retraso en proporción al tiempo medio de viaje (esperado, sin retrasos) a bordo del vehículo y en condiciones base o estándar (con un factor de proporcionalidad dado por la variable  $LR_{r1jk}$ ).

<sup>265</sup> Nótese que a estos efectos los posibles adelantos (desviaciones negativas) son tratados de forma neutra, de tal modo que en el cálculo del tiempo medio de retraso se computan como si se tratase de servicios puntuales en lugar de contabilizarlos como 'retrasos de signo negativo' (es decir, los retrasos no son potencialmente compensables por posibles adelantos).



**Figura 9.28.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo de retraso medio en los modos de transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.29.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del tiempo de retraso medio en los modos de transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2' (situación prototípica de horas valle), la Figura 9.29 muestra que los tiempos de retraso medio vinculados a la operación del servicio con tranvía o metro ligero (en el escenario 'R') y con BHLS o BRT (en el escenario 'B') son prácticamente coincidentes (de hecho las series referidas a estos dos modos en la Figura 9.29 se superponen casi totalmente). Así pues, los valores medios de esta variable se sitúan en uno u otro caso en torno a 1.3 minutos. Por su parte, la operación de la línea con autobús convencional en tráfico mixto en el escenario '0' acarrearía, para estas condiciones, valores medios del tiempo de retraso de aproximadamente 2.3 minutos. En general, se observa —de acuerdo a las Figuras 9.28 y 9.29— que la fiabilidad horaria del transporte público tiende a ser inferior en las horas punta (mayores tiempos medios de retraso), y que dichas

condiciones de hora punta afectan en mayor medida a los modos basados en el uso de autobuses que al sistema de tranvía o metro ligero (por la dotación de plataforma reservada y priorización semafórica en contraposición al autobús convencional en tráfico mixto y por la menor utilización de la capacidad máxima de la línea —para el mismo o similar volumen de demanda— en la comparación con BHLS o BRT).

### 9.3.3. Resultados relacionados con las condiciones de circulación en vehículo motorizado privado

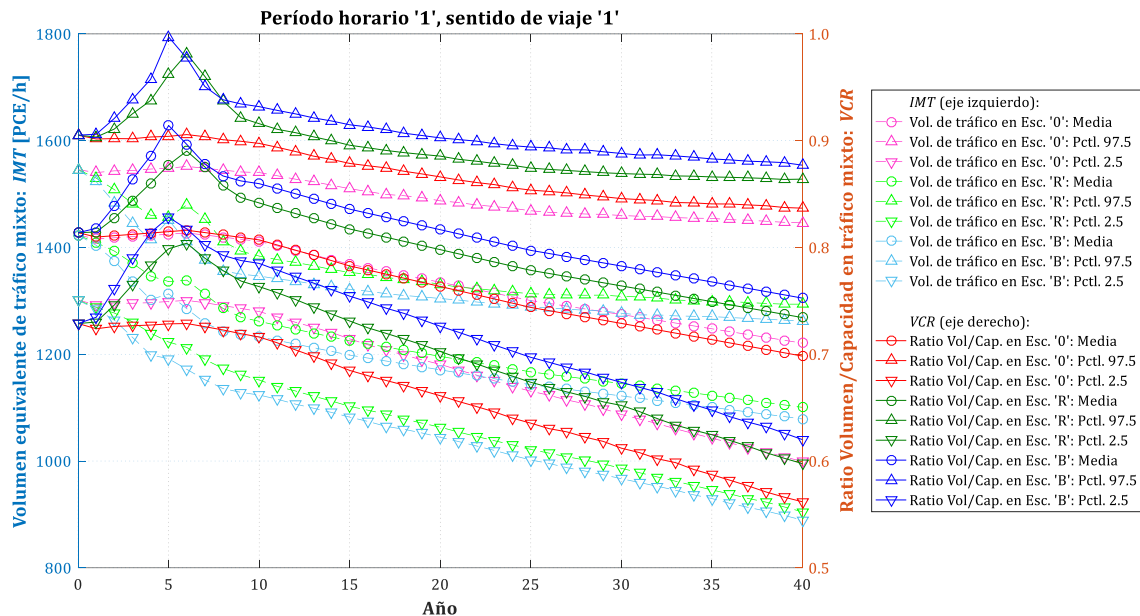
#### 9.3.3.1. Volumen de tráfico mixto expresado en automóviles ligeros equivalentes y correspondiente ratio Volumen/Capacidad

Se da inicio al estudio de los resultados relacionados con las condiciones de circulación en vehículo motorizado privado mediante el análisis conjunto del volumen de tráfico mixto, cuantificado en automóviles ligeros equivalentes por hora (PCE/h), y del correspondiente ratio Volumen/Capacidad, pues ambas variables están directamente interrelacionadas. El ratio Volumen/Capacidad constituye un indicador cuantitativo del grado de congestión existente en los viales objeto de estudio para la circulación de vehículos en tráfico mixto (automóviles, motos y ciclomotores, autobuses convencionales sin carril-bus ni plataforma reservada, otros vehículos de reparto o de transporte de mercancías, etc.). Además, tiene una influencia capital sobre otras variables que se analizarán a continuación, como la velocidad de trayecto en vehículo motorizado privado y, consecuentemente, sobre los consumos de combustible y la variabilidad del tiempo de trayecto en este tipo de vehículos.

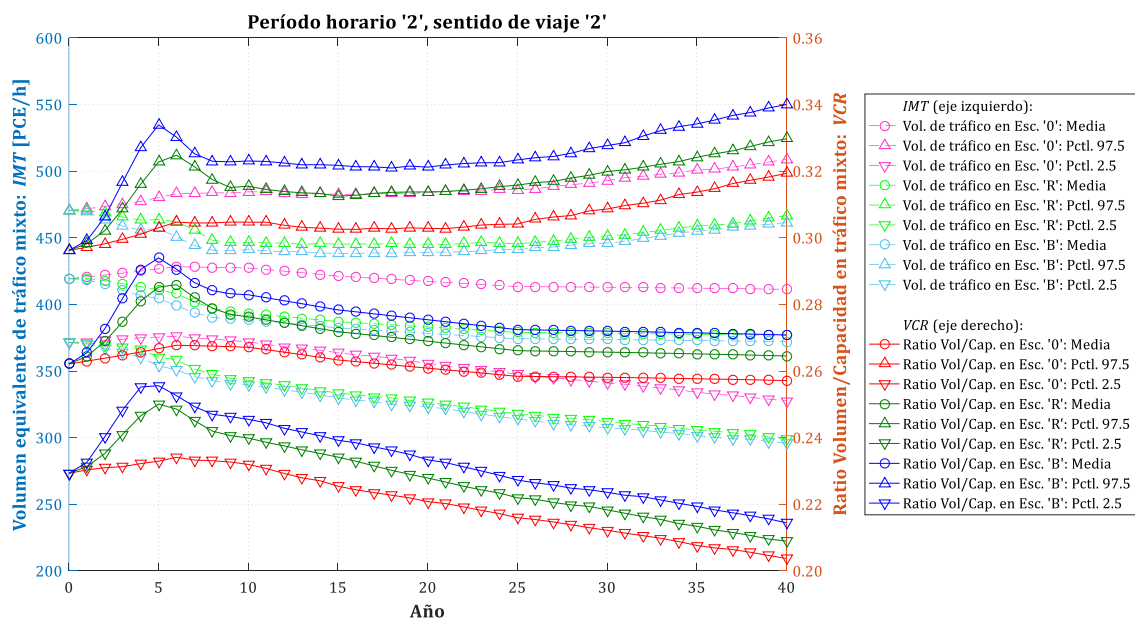
Por consiguiente, corresponde analizar en este epígrafe el comportamiento (desde el año base o año '0' y hasta el final del horizonte de evaluación) de las variables  $IMT_{ry1jk}^s$  (o su homóloga  $IMT_{r1jk}^*$  cuando se trata del año base) para el caso del volumen de tráfico mixto expresado en automóviles ligeros equivalentes, y de  $VCR_{ry1jk}^s$  (o  $VCR_{r1jk}^*$  en el año base) para el estudio del ratio Volumen/Capacidad. El análisis del comportamiento matemático de estas variables aleatorias se realiza nuevamente a través de varios parámetros estadísticos de interés, siendo estos la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). Así pues, los valores que estos parámetros estadísticos toman para una y otra variable en cada uno de los tres escenarios ('0', 'R' y 'B') constituyen las series representadas en las Figuras 9.30 y 9.31. En relación con la diversidad de períodos horarios y sentidos de viaje potencialmente examinados, se seleccionan —en concordancia con los análisis efectuados sobre otras variables— los casos pertenecientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (representado en la Figura 9.30) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.31). Nótese que en estas dos gráficas la graduación de las series de datos relativas al volumen de tráfico mixto en PCE/h hace referencia al eje vertical izquierdo, mientras que las series alusivas al ratio Volumen/Capacidad (adimensional) se gradúan mediante el eje vertical derecho (sin que exista una correspondencia entre los valores de ambos ejes).

En la Figura 9.30, correspondiente al período horario '1' con sentido de viaje '1' en representación de las condiciones características de las horas punta, se observa que el mayor volumen de tráfico mixto se produciría en el escenario '0', con unos valores medios que, tras una fase inicial en la que se sitúan en torno a 1,420 PCE/h, caerían progresivamente hasta 1,220 PCE/h al final del horizonte de evaluación. A este escenario le corresponden unos ratios Volumen/Capacidad que, en valores medios, descienden desde aproximadamente 0.81 hasta 0.70 (estos descensos se deben principalmente a factores no directamente relacionados con el servicio de transporte público). Los escenarios 'R' y 'B' presentan unos volúmenes de tráfico mixto moderadamente inferiores a los del escenario '0', con unos valores medios que, al final del horizonte de evaluación, se situarían en 1,100 PCE/h para el escenario 'R' y en aproximadamente 1,080 PCE/h para el caso del escenario 'B'. Sin embargo, son estos dos nuevos escenarios los que comportarían mayores ratios Volumen/Capacidad, debido a la sensible reducción de capacidad viaria para tráfico general que —según los datos introducidos al modelo— lleva aparejada la inserción de los nuevos sistemas de transporte público en plataforma reservada. Así, estos ratios

experimentan un brusco ascenso durante la fase de implantación de los nuevos modos (en la que se modeliza la progresiva disminución de la capacidad viaria) hasta alcanzar picos de los valores medios de 0.89 en el caso del escenario 'R' y de 0.91 en el escenario 'B'. A partir de ahí, y con la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público, se pasa a un período de reducción de la congestión viaria, obteniéndose al final del horizonte de evaluación valores medios del ratio Volumen/Capacidad de 0.73 en el escenario 'R' y de 0.75 en el escenario 'B' (es decir, solo levemente mayores que en el escenario '0', a pesar de la menor capacidad viaria).



**Figura 9.30.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de tráfico mixto cuantificado en automóviles ligeros equivalentes y de su correspondiente ratio Volumen/Capacidad, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.31.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de tráfico mixto cuantificado en automóviles ligeros equivalentes y de su correspondiente ratio Volumen/Capacidad, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.



En el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.31), al ser representativo de las condiciones de horas valle, los volúmenes de tráfico mixto y los ratios Volumen/Capacidad son muy inferiores a los observados en la Figura 9.30. El mayor volumen de tráfico mixto corresponde de nuevo al escenario '0', con valores medios comprendidos entre aproximadamente 410 y 430 PCE/h. Las medias de los ratios Volumen/Capacidad en el escenario '0' se sitúan ahora en torno a 0.26. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' conllevan volúmenes de tráfico muy similares entre sí y ligeramente menores a los del escenario '0', presentando valores medios que evolucionan desde 419 hasta alrededor de 375 PCE/h. Los resultantes ratios Volumen/Capacidad también son bastante similares en estos dos nuevos escenarios, aunque ligeramente mayores para el escenario 'B' que para el 'R' (y ambos solo un poco superiores a los del escenario '0'). Se observa nuevamente una etapa inicial de incremento relativamente rápido, originada por la reducción de capacidad viaria aplicada durante la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público. Se alcanzan así picos máximos en torno a 0.29 para los valores medios del ratio. Tras ello, con la puesta en servicio de los nuevos modos de transporte público —y ya con la capacidad viaria constante— se da paso a una etapa de valores medios ligeramente decrecientes, que se estabilizan hacia el final del período de evaluación en torno a 0.27. En general, puede concluirse que —de acuerdo a lo esperado— la incidencia de la hipotética reducción de capacidad viaria sobre el volumen de tráfico mixto (o, en última instancia, sobre el volumen de demanda de viajes en vehículo motorizado privado) y sobre el nivel de congestión de aquel (determinante de los atributos de la oferta y por tanto de su atractivo) es mucho menor en las condiciones típicas de las horas valle que en las condiciones propias de las horas punta.

### 9.3.3.2. Velocidad promedio de trayecto en vehículo motorizado privado

A continuación se procede al análisis de los resultados relativos a la velocidad promedio de trayecto en los viajes efectuados en vehículo motorizado privado, examinándose su evolución desde el año base o año '0' hasta el final del horizonte o período de evaluación. Al respecto, es preciso distinguir entre la velocidad de trayecto en automóvil particular (reproducida en las Figuras 9.32, 9.33 y 9.34) y la velocidad de trayecto en moto o ciclomotor, que se representará en las Figuras 9.35 y 9.36.

En uno u otro caso, el comportamiento de las velocidades promedio de trayecto a lo largo del horizonte o período de evaluación —como variable aleatoria que es— se analiza mediante los valores que los consabidos parámetros estadísticos de interés (media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5) toman en cada uno de los tres escenarios ('0', 'R' y 'B'). Además, atendiendo a la representatividad de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje, se adoptan nuevamente como ejemplos de estudio los casos referidos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (característico de horas punta matinales en día laborable) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (representativo de horas valle).

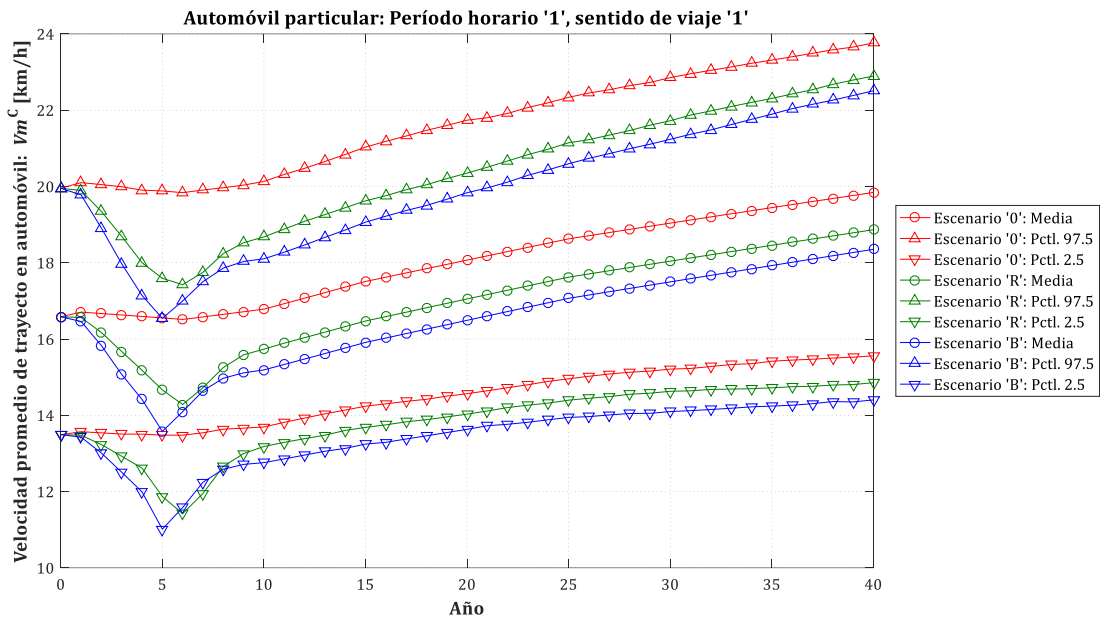
#### 9.3.3.2.a. Automóvil particular

En relación con la velocidad promedio de trayecto en automóvil privado, se representa en las Figuras 9.32 y 9.33 la evolución prevista por el modelo para los parámetros estadísticos de interés aplicados sobre la variable aleatoria  $Vm_{ry1jk}^{Cs}$  ( $Vm_{r1jk}^{*C}$  en el año base). En particular, se exponen en dichas figuras los casos  $j=1, k=1$  (Figura 9.32) y  $j=2, k=2$  (Figura 9.33).

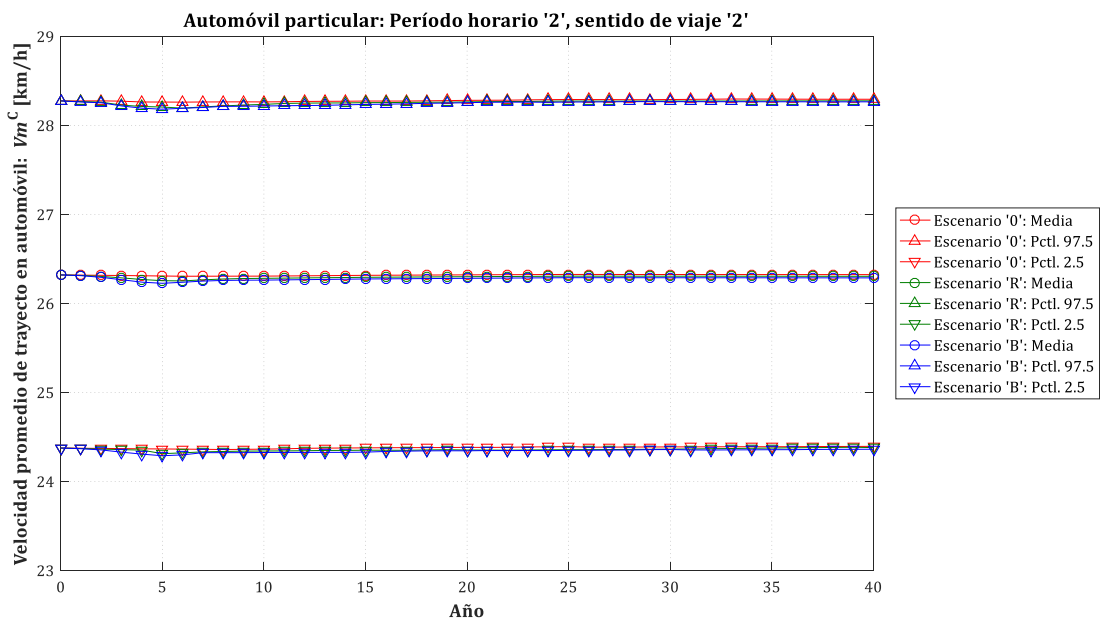
En lo concerniente al período horario '1' con sentido de viaje '1', representativo de las condiciones de horas punta, la Figura 9.32 pone de manifiesto que las velocidades de trayecto en automóvil particular más elevadas se dan con mayor probabilidad en el escenario '0', debido fundamentalmente a que en este no se producen las reducciones de capacidad viaria para tráfico mixto que sí se han aplicado en los escenarios 'R' y 'B', con lo cual los ratios Volumen/Capacidad se mantienen más bajos en el escenario '0' (a pesar de su volumen de tráfico más elevado), y ello permite una mayor velocidad de trayecto. Así pues, en el escenario '0' los valores medios de la velocidad de trayecto en automóvil comienzan situándose en torno a 16.6 km/h durante los años iniciales, para a continuación ascender progresivamente con el transcurrir del tiempo hasta alcanzar los 19.8 km/h al final del horizonte de evaluación. Entre los escenarios 'R' y 'B', el primero de ellos permitiría velocidades promedio de trayecto en



automóvil ligeramente mayores, aunque en ambos casos se sigue un patrón similar de evolución con respecto al tiempo, con una primera etapa de caída de la velocidad de trayecto, que corresponde a la progresiva reducción de la capacidad viaria (fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público), y un segundo período —ya con capacidad viaria constante— en el que se produce un incremento (más rápido al principio, tras la puesta en servicio de los nuevos sistemas) de dicha velocidad. Así, al final de la primera etapa los valores medios de la velocidad de trayecto alcanzarían picos mínimos de 14.3 km/h en el escenario 'R' y de 13.6 km/h en el escenario 'B'. Por el contrario, al final del horizonte de evaluación los valores medios de estas velocidades ascenderían a 18.9 y 18.4 km/h, respectivamente.



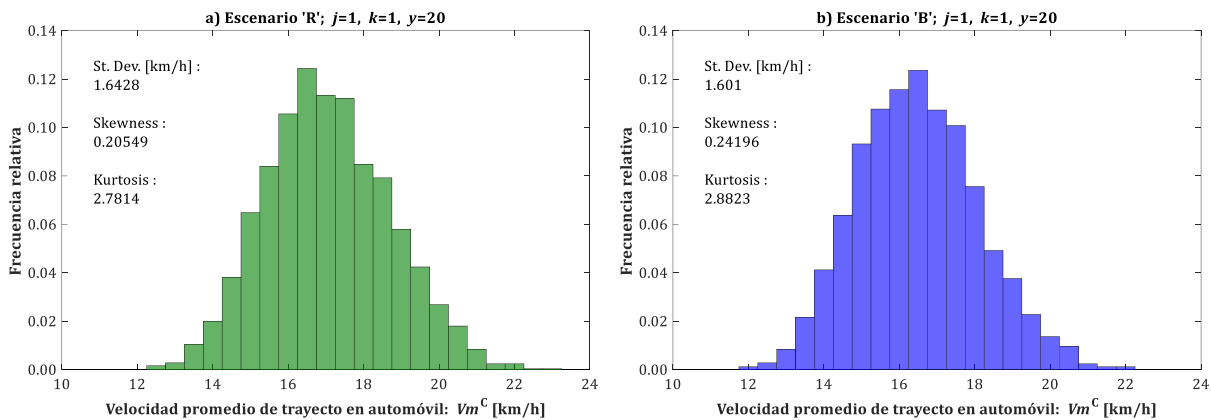
**Figura 9.32.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.33.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2', típico de las condiciones de horas valle, la Figura 9.33 muestra que las velocidades promedio de trayecto en automóvil particular son prácticamente coincidentes en los tres escenarios, así como que se mantienen aproximadamente constantes en el tiempo (con valores medios en torno a 26.3 km/h). Esta coincidencia de velocidades entre los tres escenarios se produce en parte a causa de la menor diferencia de ratios Volumen/Capacidad que existe en estas condiciones, pero sobre todo debido a que, cuando dichos ratios son bajos, una determinada variación en los mismos tiene muy poco efecto relativo sobre la velocidad de trayecto (es decir, la derivada de la curva de velocidad en función del ratio Volumen/Capacidad es muy cercana a cero en ese rango de valores). De este modo, la influencia de la reducción de capacidad viaria que se aplica sobre los escenarios 'R' y 'B' es, en estas condiciones, prácticamente nula.

De forma complementaria, la Figura 9.34 muestra sendos histogramas de frecuencias relativas de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular para los escenarios 'R' y 'B'. Nótese que estos ejemplos de histogramas están particularizados en ambos casos para el período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ , es decir, condiciones representativas de hora punta) y para el año '20' del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ).



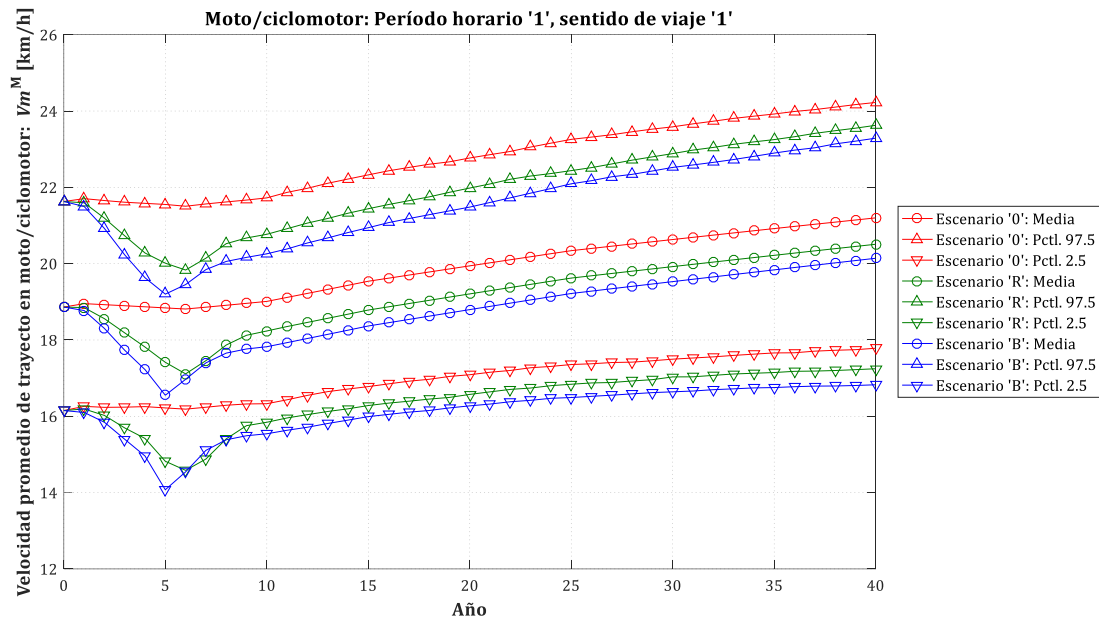
**Figura 9.34.** Histogramas de frecuencias relativas de la velocidad promedio de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

**9.3.3.2.b. Moto/ciclomotor**

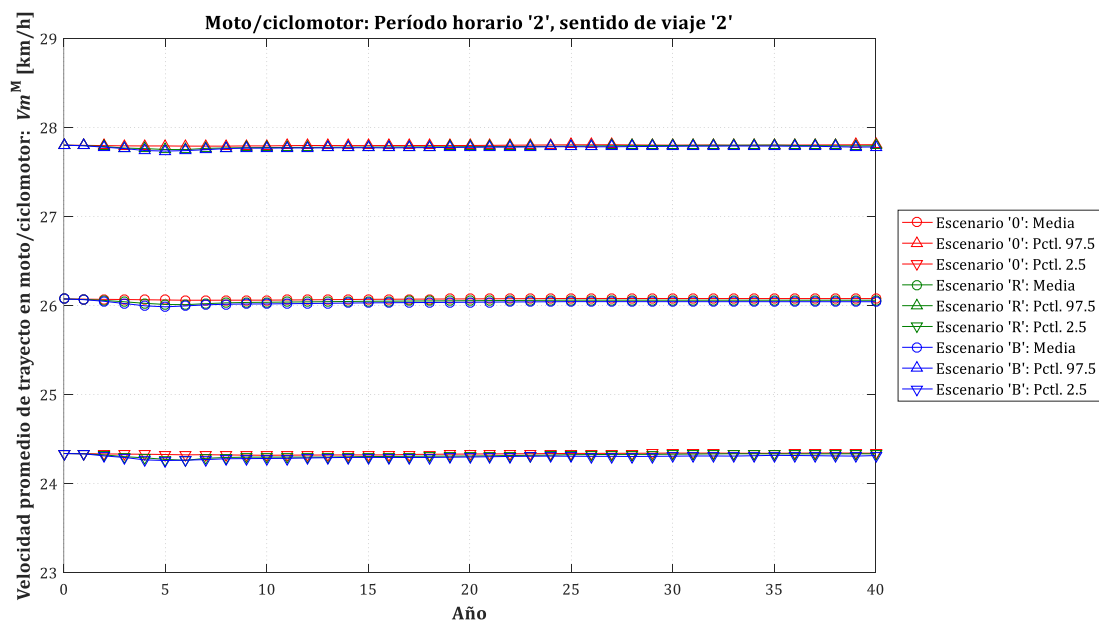
Para el caso de la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor se especifica la variable de análisis como  $Vm_{ry1jk}^{Ms}$  ( $Vm_{r1jk}^{*M}$  en el año base), representándose sus parámetros estadísticos de interés en las Figuras 9.35 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.36 (caso  $j=2, k=2$ ).

Por lo que respecta al período horario '1' con sentido de viaje '1' (caso característico de las condiciones de hora punta), la Figura 9.35 revela en general que la situación comparativa entre escenarios para la velocidad de trayecto en moto o ciclomotor es muy similar a la mostrada anteriormente en la Figura 9.32 para el automóvil particular, siendo aplicables las mismas consideraciones en cuanto a la influencia de la reducción de capacidad viaria en los ratios Volumen/Capacidad de cada escenario y, por consiguiente, en la velocidad de trayecto. No obstante, los valores generales de las velocidades de trayecto son, bajo estas condiciones de congestión relativamente elevada, más altos para los vehículos motorizados de dos ruedas (moto o ciclomotor) que para los automóviles particulares, ya que típicamente estos últimos se ven más condicionados por los altos niveles de congestión del tráfico que los vehículos de dos ruedas. Así, en el escenario '0' los valores medios de la velocidad de trayecto en moto o ciclomotor evolucionan desde 18.9 km/h en el año base hasta 21.2 km/h al final del horizonte o período de evaluación. Por su parte, en los escenarios 'R' y 'B' los picos mínimos del valor medio (situados al final de las pertinentes fases de implantación de los nuevos sistemas de transporte público)

alcanzan 17.1 y 16.6 km/h, respectivamente. A su vez, al final del horizonte de evaluación estos valores medios se situarían en 20.5 km/h para el escenario 'R' y en 20.1 km/h para el 'B'.



**Figura 9.35.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.36.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad promedio de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2', representativo de las horas valle, los valores obtenidos para la velocidad de trayecto en moto o ciclomotor (véase Figura 9.36) son muy parecidos a los que corresponden al automóvil particular (Figura 9.33), caracterizándose por ser aproximadamente iguales en los tres escenarios y prácticamente constantes a lo largo del tiempo. Los valores medios de la velocidad de trayecto se situarían en este caso alrededor de 26.0–26.1 km/h.

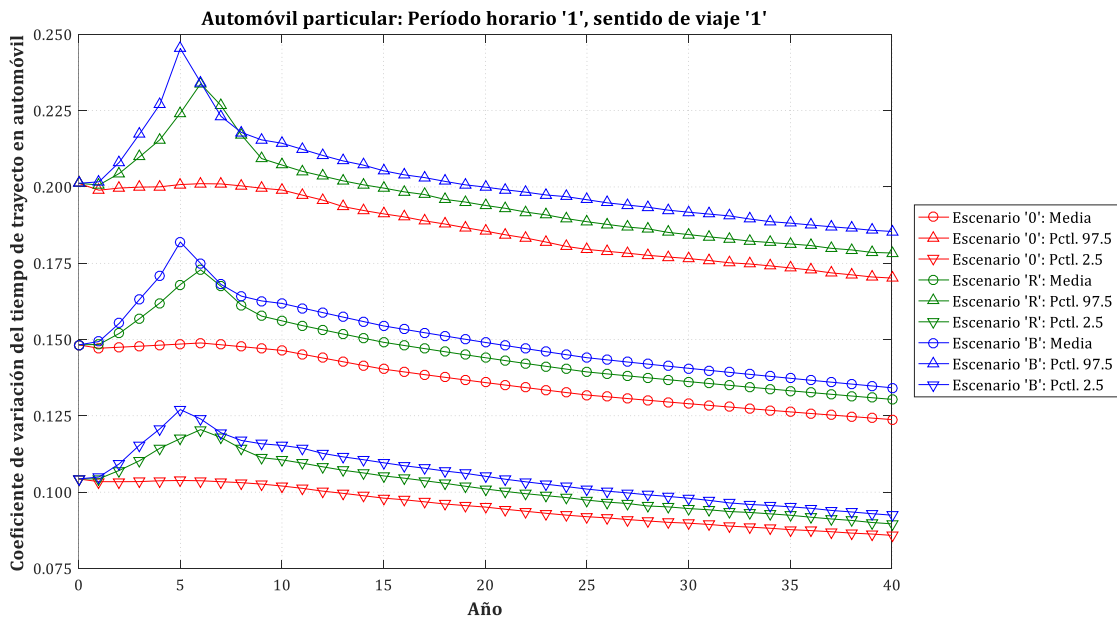
### 9.3.3.3. Variabilidad del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado

El siguiente análisis se centra en estudiar los resultados concernientes a la variabilidad del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado, para lo cual se adopta, como indicador más significativo, el coeficiente de variación de dicho tiempo (en lugar de tomar directamente su desviación típica), ya que de esta forma se aminora sustancialmente la influencia de la distancia de viaje. Así pues, la nueva variable de análisis (coeficiente de variación) debe ser calculada en función de los resultados proporcionados por el modelo mediante la expresión  $\sigma_{tm_{ry1jk}^{ms}} \cdot (Vm_{ry1jk}^{ms}/60) / Ltpr_{r1jk}$  (particularizada en el caso del año base como  $\sigma_{tm_{r1jk}^{*m}} \cdot (Vm_{r1jk}^{*m}/60) / Ltpr_{r1jk}$ ). Se distinguen al respecto los resultados relativos al automóvil particular (con  $m=C$ ), mostrados en las Figuras 9.37 y 9.38, y los pertenecientes a motocicletas y ciclomotores (con  $m=M$ ), que se representan en las Figuras 9.39 y 9.40.

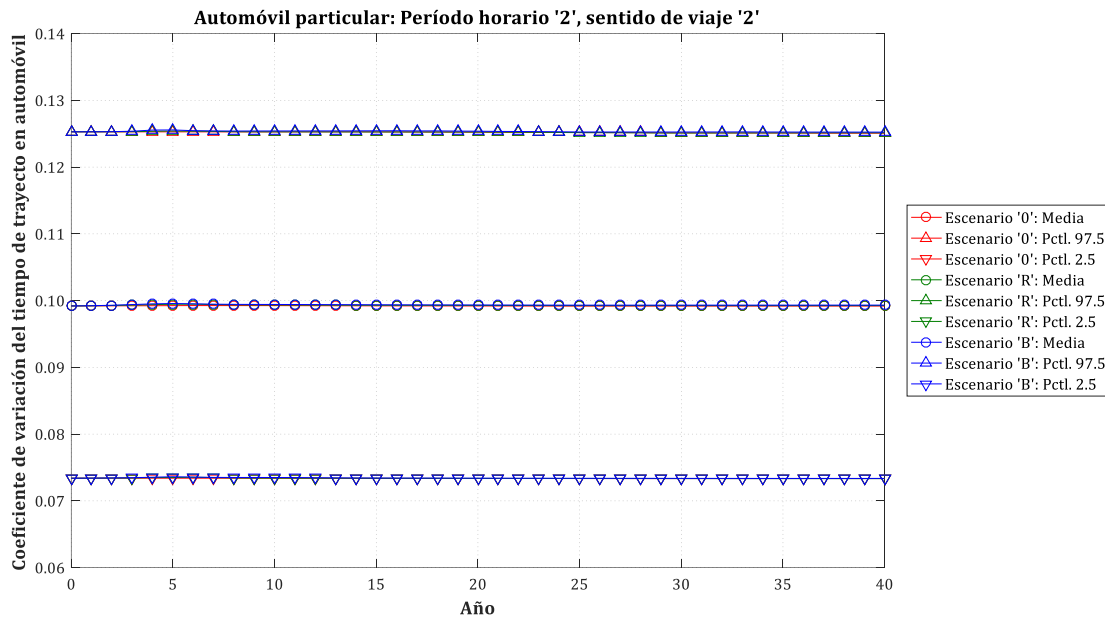
El comportamiento como variable aleatoria de estos coeficientes de variación del tiempo de trayecto en vehículo motorizado privado es examinado —en cada uno de los tres escenarios y desde el año base o año '0' hasta el final del horizonte de evaluación— a través de los valores obtenidos para sus tres parámetros estadísticos de interés (media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5). Por otra parte, se mantienen como ejemplos de estudio de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje los casos relativos al período horario '1' en el sentido '1' (representativo de horas punta) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (característico de horas valle).

#### 9.3.3.3.a. Automóvil particular

En las Figuras 9.37 y 9.38 se representa la evolución prevista por el modelo para los parámetros estadísticos de interés del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular, tanto para el caso  $j=1, k=1$  (Figura 9.37) como para  $j=2, k=2$  (Figura 9.38).



**Figura 9.37.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.38.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

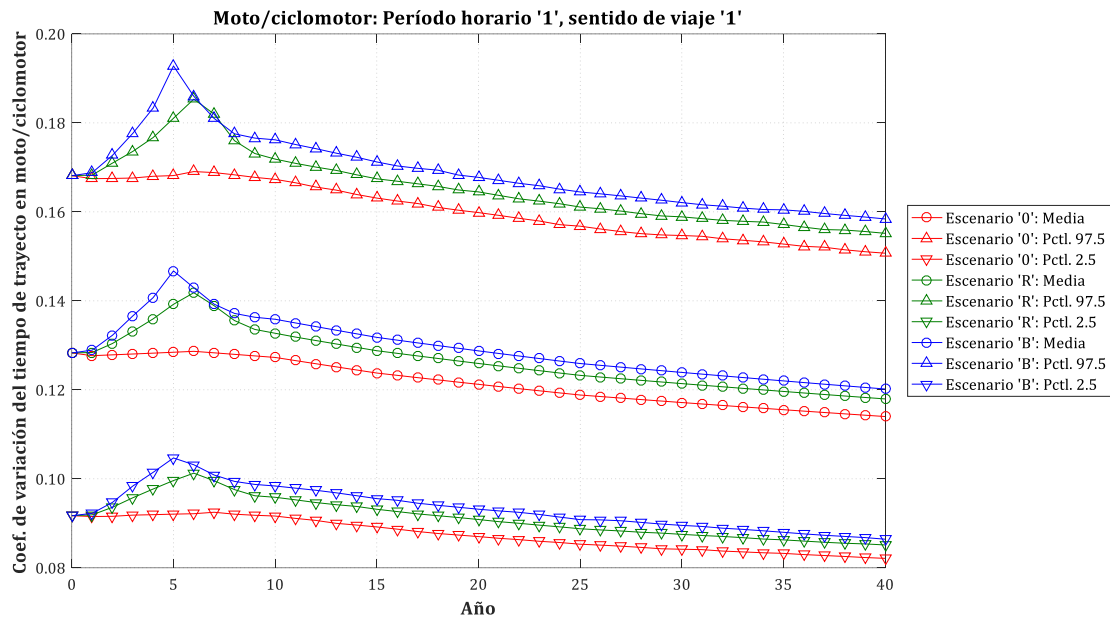
Por lo que respecta al período horario '1' con sentido de viaje '1' (condiciones características de hora punta), se observa en la Figura 9.37 que los menores coeficientes de variación del tiempo de trayecto en automóvil particular se darían con mayor probabilidad en el escenario '0', aunque las diferencias entre escenarios en este aspecto son bastante reducidas (especialmente a partir del comienzo de la fase de madurez del nuevo servicio de transporte público). Este mejor rendimiento del escenario '0' se explica de nuevo por las reducciones de capacidad viaria para tráfico mixto implantadas en los escenarios 'R' y 'B' (que no son aplicables en cambio al escenario '0'), que provocan que los ratios Volumen/Capacidad sean algo más elevados en los escenarios en los que se implementan los nuevos sistemas de transporte público en plataforma reservada, conllevando un mayor tiempo medio de trayecto en automóvil (traducido matemáticamente en un mayor índice de congestión) y, con ello, un mayor coeficiente de variación de los tiempos (recuérdese la ecuación 8.50). Cuantitativamente, en el escenario '0' los valores medios del coeficiente de variación del tiempo de trayecto comienzan situándose alrededor de 0.148 durante los primeros años, iniciándose a continuación un ligero descenso que conduce a un valor medio de 0.124 en el último año del horizonte o período de evaluación. En cuanto a los escenarios 'R' y 'B', es el escenario 'R' el que proporciona menores valores medios del coeficiente de variación, aunque con diferencias muy pequeñas entre uno y otro. Existe en ambos casos una primera etapa de aumento relativamente rápido del coeficiente de variación, relacionada con la progresiva reducción de la capacidad viaria en la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público. Se llega así a picos máximos del valor medio cifrados en 0.173 para el escenario 'R' y 0.182 para el escenario 'B'. A continuación se da paso a una segunda etapa (con la capacidad viaria ya constante) durante la que tiene lugar una disminución (más rápida al principio, más atenuada hacia el final) del coeficiente de variación de los tiempos de trayecto. De esta forma se alcanzan al final del horizonte de evaluación valores medios del coeficiente de variación de 0.130 en el escenario 'R' y de 0.134 en el escenario 'B'.

En lo concerniente al período horario '2' con sentido de viaje '2', representativo de las condiciones de horas valle, la Figura 9.38 pone de relieve que los coeficientes de variación de los tiempos de trayecto son prácticamente coincidentes para los tres escenarios, manteniéndose además aproximadamente constantes a lo largo del tiempo. Los valores medios se sitúan, en cualquiera de los escenarios, en torno a 0.099. Nótese que, bajo las condiciones típicas de hora valle, la incidencia de la reducción de capacidad viaria aplicada sobre los escenarios 'R' y 'B' es prácticamente inexistente. En las horas valle los ratios Volumen/Capacidad son notablemente bajos, con lo que una cierta variación en los mismos tiene un

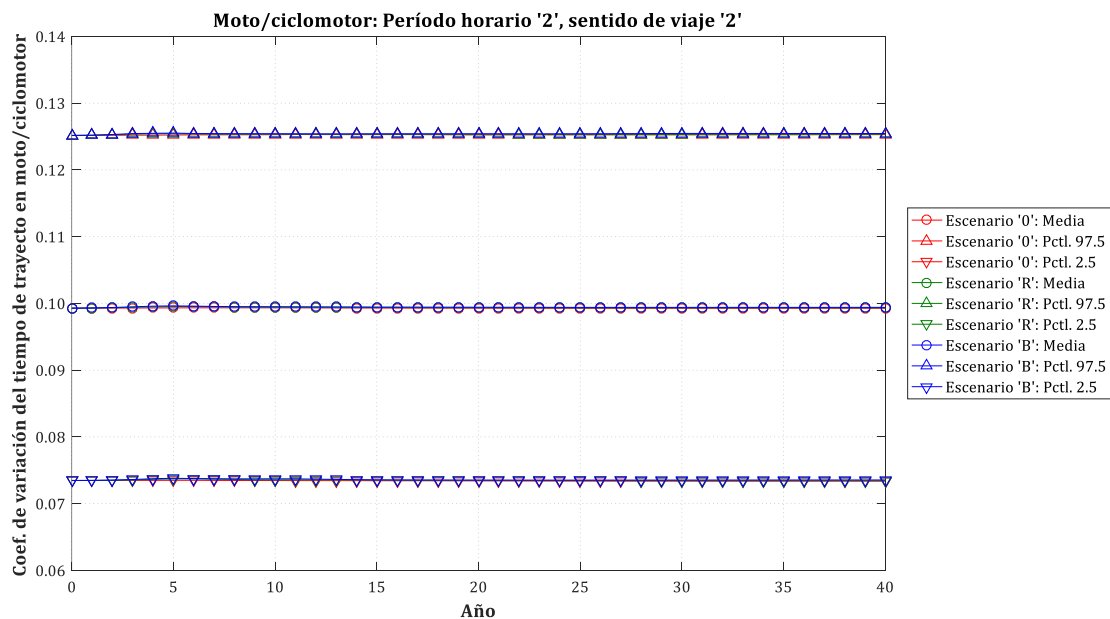
efecto muy escaso sobre la velocidad de trayecto (y consecuentemente sobre el índice de congestión interviniente en la ecuación 8.50), de modo que dicha variación apenas tiene consecuencias sobre el coeficiente de variación de los tiempos de trayecto.

**9.3.3.3.b. Moto/ciclomotor**

Para el caso del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en los viajes en moto o ciclomotor, se representa gráficamente la evolución de sus parámetros estadísticos de interés en las Figuras 9.39 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.40 (caso  $j=2, k=2$ ).



**Figura 9.39.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.40.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso característico de las condiciones de hora punta (período horario '1' con sentido de viaje '1'), la Figura 9.39 muestra, a grandes rasgos, que la situación comparativa entre escenarios para el coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor es análoga a la observada en el caso del automóvil particular (Figura 9.37), aunque con valores generales algo más bajos para los vehículos motorizados de dos ruedas que para los de cuatro. Así, en el escenario '0' los valores medios del coeficiente de variación en moto o ciclomotor progresarían desde cuantías iniciales en torno a 0.128 hasta alcanzar 0.114 al final del horizonte o período de evaluación. En el caso de los escenarios 'R' y 'B', son aplicables las mismas observaciones sobre la influencia de la reducción de capacidad viaria en los coeficientes de variación del tiempo de trayecto, presentándose las mismas etapas de evolución en el tiempo (una inicial claramente creciente, y otra a medio/largo plazo de tendencia decreciente). Los picos máximos del valor medio en los escenarios 'R' y 'B' alcanzan, en el caso de los viajes en moto o ciclomotor, cuantías respectivas de 0.142 y 0.147. En el extremo opuesto, al final del horizonte o período de evaluación estos valores medios se reducirían a 0.118 para el escenario 'R' y a 0.120 para el 'B'.

Por su parte, la Figura 9.40 (alusiva al período horario '2' con sentido de viaje '2' en representación de las condiciones de horas valle) revela que los valores obtenidos para el coeficiente de variación del tiempo de trayecto en moto o ciclomotor son prácticamente idénticos a los valores homólogos del automóvil particular (Figura 9.38), de tal modo que resultan aproximadamente iguales para los tres escenarios y prácticamente constantes en el tiempo. Los valores medios de dicho coeficiente de variación se sitúan por tanto en torno a 0.099.

#### 9.3.3.4. Consumo promedio de combustible por unidad de distancia recorrida en vehículo motorizado privado

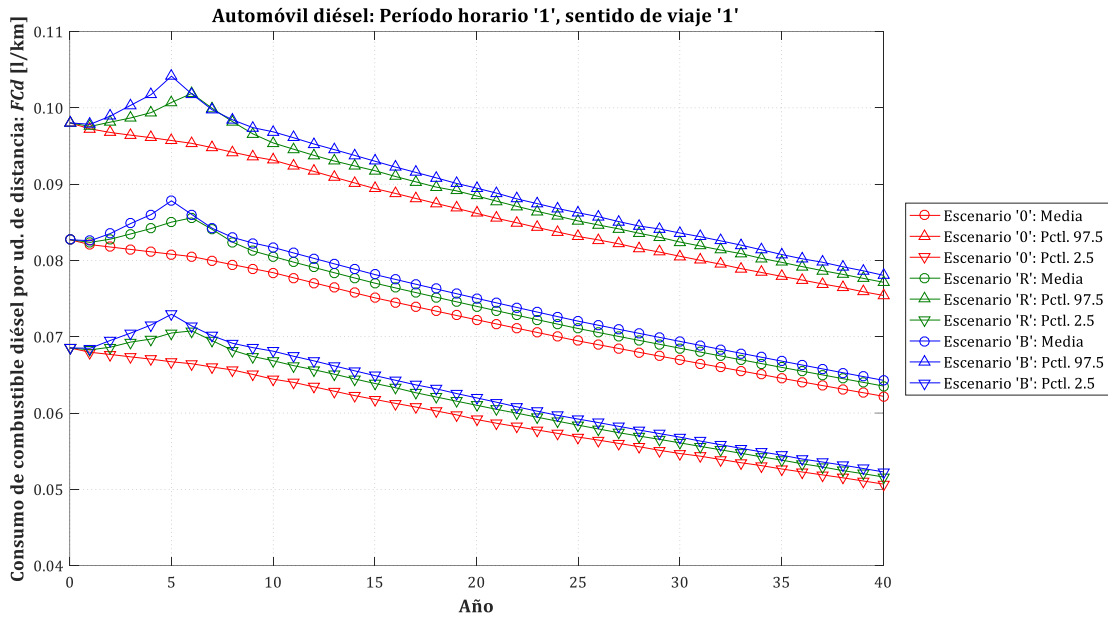
A continuación se aborda el estudio de aquellos resultados que hacen referencia al consumo de combustible (promediado por unidad de distancia recorrida) en las diferentes categorías de vehículos motorizados privados que utilizan motores de combustión interna. Se debe distinguir, por tanto, entre el consumo de combustible diésel en automóviles de dicha clase (representado en las Figuras 9.41 y 9.42), el consumo de gasolina en automóviles que emplean este segundo tipo de combustible (tratado en las Figuras 9.43 y 9.44), y el consumo de gasolina en motos y ciclomotores (Figuras 9.45 y 9.46). Se excluye de este punto el consumo de energía eléctrica en vehículos movidos mediante el uso de electricidad tomada de la red (ya sean automóviles o motos/ciclomotores), ya que, de acuerdo a las limitaciones metodológicas del modelo, su consumo por unidad de distancia recorrida es tratado como una magnitud independiente de las condiciones de circulación de los vehículos en tráfico mixto (en concreto, se desprecia en este caso la posible influencia de pequeñas variaciones de la velocidad media).

En cualquiera de las tres categorías de vehículos contempladas, el consumo promedio de combustible es examinado evolutivamente a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación (desde el año base o año '0' hasta el final de aquel), analizándose su comportamiento como variable aleatoria a través de los valores de los ya habituales parámetros estadísticos de interés (media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5) en cada uno de los tres escenarios ('0', 'R' y 'B'). En cuanto a la representación de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje, se mantienen como ejemplos de estudio los casos pertenecientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (característico de la hora punta matinal en día laborable) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (típico de horas valle).

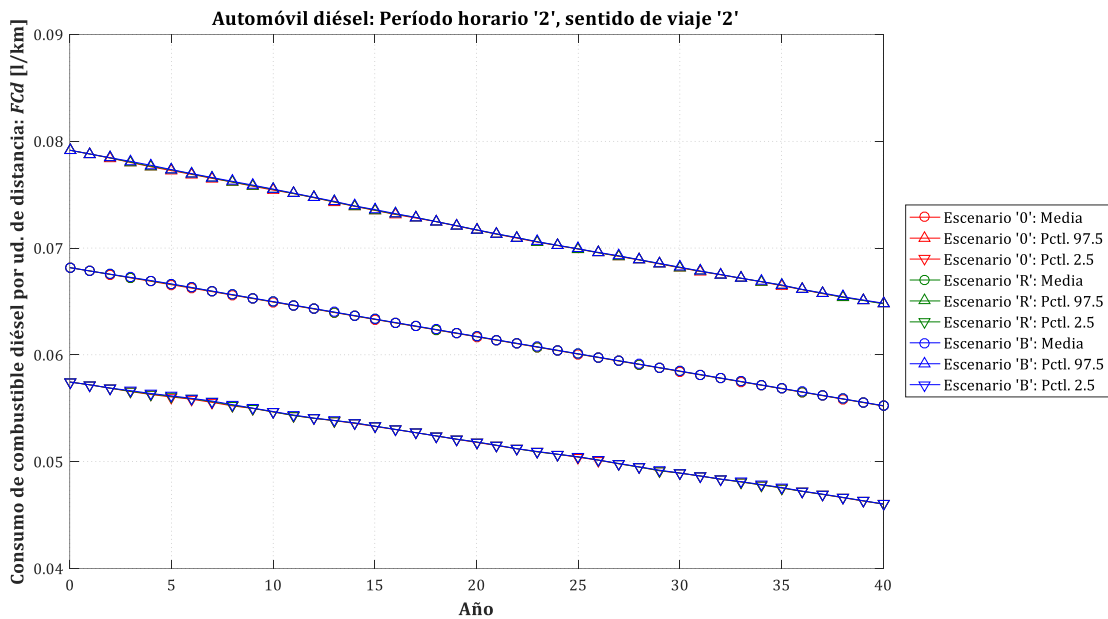
##### 9.3.3.4.a. Automóviles diésel

En relación con el consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles diésel, se muestra en las Figuras 9.41 y 9.42 la evolución prevista por el modelo para los parámetros estadísticos de interés de la variable aleatoria  $FCD_{r1jk}^s$  (especificada como  $FCD_{r1jk}^*$  en el año base). Particularmente, se representan en dichas figuras los resultados obtenidos para los casos  $j=1, k=1$  (Figura 9.41) y  $j=2, k=2$  (Figura 9.42).





**Figura 9.41.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles diésel, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.42.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles diésel, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En lo concerniente al período horario '1' con sentido de viaje '1' (representativo de las condiciones de horas punta), se aprecia en la Figura 9.41 que es el escenario '0' el que tiende a presentar un menor consumo promedio de combustible diésel por unidad de distancia recorrida, si bien es cierto que las diferencias entre los distintos escenarios no son muy destacables (sobre todo si se exceptúan la parte final de la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público y el inicio de la fase de introducción y consolidación de estos). El origen de esta pequeña ventaja parcial del escenario '0' hay que buscarlo de nuevo en las reducciones de capacidad viaria para tráfico mixto aplicadas en los escenarios 'R' y 'B', que repercuten en valores del ratio Volumen/Capacidad algo más elevados, en velocidades medias de trayecto un poco menores y, a su vez, en consumos de combustible algo más altos

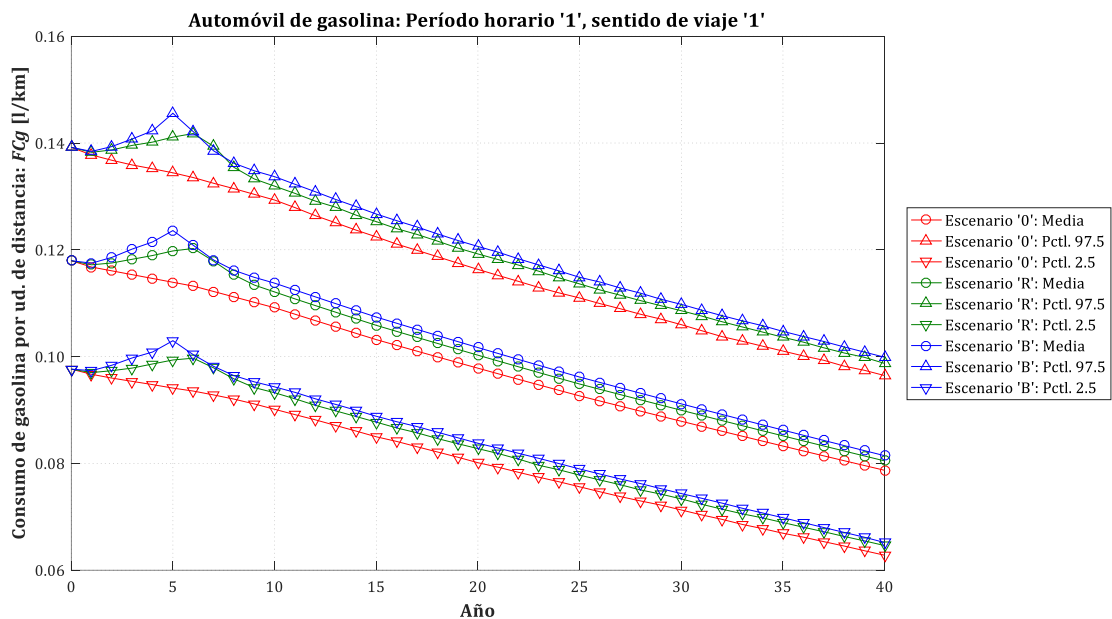


(recuérdese que para un rango de velocidades relativamente bajas —como las habituales en tráfico urbano— el consumo aumenta al reducirse la velocidad de trayecto). En el escenario '0', los valores medios de consumo de combustible diésel evolucionan progresivamente desde  $8.3 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $6.2 \cdot 10^{-2}$  l/km en el último año del horizonte o período de evaluación. Aparte de por el aumento paulatino de la velocidad promedio de trayecto, esta tendencia decreciente del consumo se explica por la introducción en el modelo y en los datos aplicados de las previsibles —y deseables— mejoras de la eficiencia energética de los motores de combustión interna con el avance de los años, que se trasladarían a una reducción del consumo promedio de estos vehículos. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' proporcionan resultados muy similares en esta materia, aunque con un consumo por unidad de distancia recorrida ligeramente mayor en el caso del escenario 'B'. Se observan en ambos escenarios dos etapas diferenciadas: una primera de aumento del consumo (vinculada a la progresiva reducción de la capacidad viaria en la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público) y otra posterior caracterizada por la disminución paulatina de dicho consumo, una vez que la capacidad viaria ha pasado a mantenerse constante. Así, al final de la primera etapa, los valores medios del consumo de combustible diésel alcanzarían picos máximos de  $8.6 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'R' y de  $8.8 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'B'. En cambio, al final del horizonte de evaluación, los valores medios de estos consumos descenderían hasta  $6.35 \cdot 10^{-2}$  l/km y  $6.43 \cdot 10^{-2}$  l/km, respectivamente.

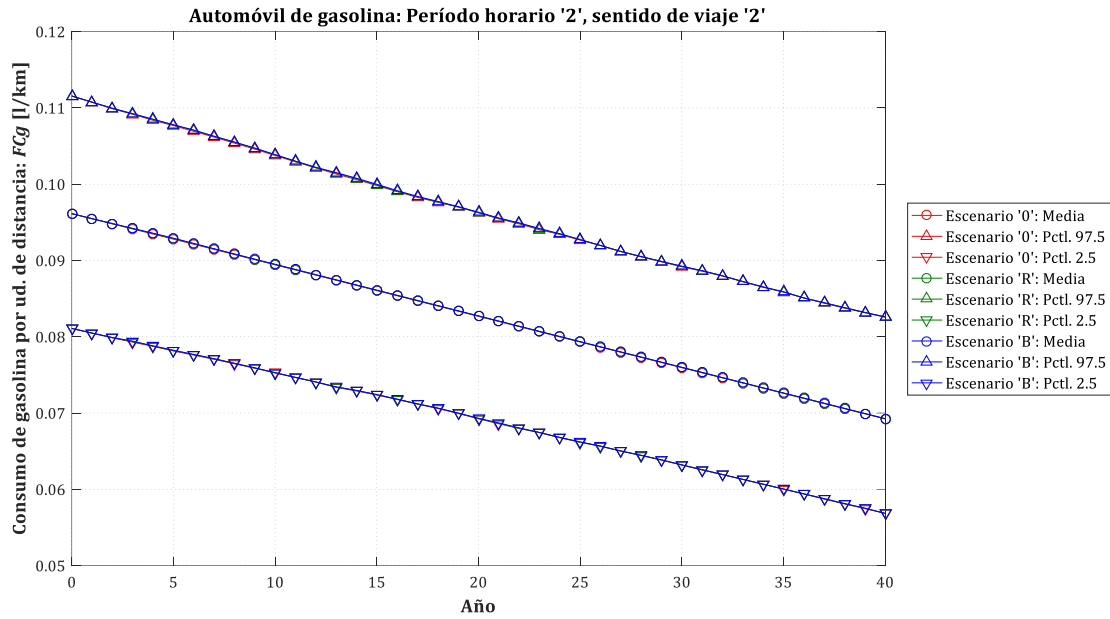
En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2' (condiciones de horas valle), se observa en la Figura 9.42 una igualdad prácticamente total entre los valores de consumo de los tres escenarios, al ser coincidentes también las velocidades promedio de trayecto (véase Figura 9.33). Los consumos de combustible en estas condiciones son sensiblemente menores que en las situaciones de hora punta, con valores medios que se reducen progresivamente desde  $6.8 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $5.5 \cdot 10^{-2}$  l/km al final del horizonte o período de evaluación.

#### 9.3.3.4.b. Automóviles de gasolina

Para el consumo promedio de combustible por parte del conjunto de automóviles de gasolina, las Figuras 9.43 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.44 (caso  $j=2, k=2$ ) son las encargadas de mostrar gráficamente la evolución de los parámetros estadísticos de interés a lo largo del horizonte o período de evaluación, siendo ahora la variable de análisis  $FCg_{ry1jk}^s$  ( $FCg_{r1jk}^*$  en el año base).



**Figura 9.43.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles de gasolina, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



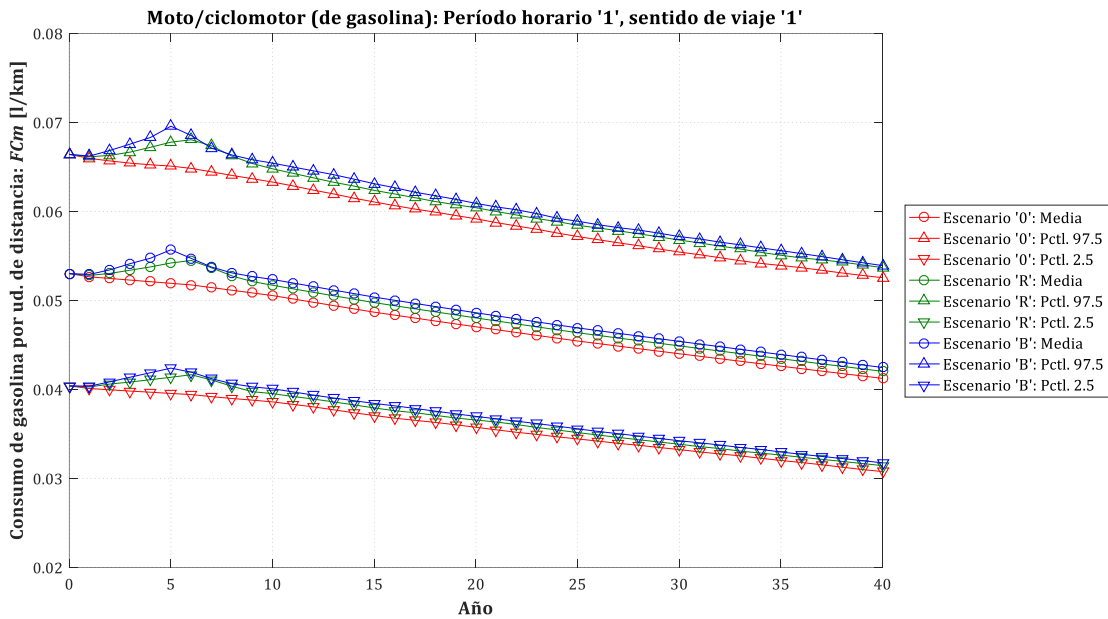
**Figura 9.44.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en automóviles de gasolina, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', característico de las condiciones de hora punta, la Figura 9.43 refleja, a nivel general, que la comparación relativa entre escenarios referida al consumo de gasolina en automóviles es muy similar a la obtenida para el combustible diésel (Figura 9.41), pero con cifras de consumo considerablemente más altas para los automóviles de gasolina que para los diésel. De hecho, en el escenario '0' los valores medios del consumo de gasolina por unidad de distancia recorrida evolucionarían desde  $11.8 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $7.9 \cdot 10^{-2}$  l/km en el último año del horizonte o período de evaluación. Por lo que se refiere a los escenarios 'R' y 'B', están afectados por las mismas consideraciones en cuanto a la influencia de la reducción de capacidad viaria que en el caso de los vehículos diésel, dando lugar también a un mismo patrón de evolución con respecto al tiempo. Así, los picos máximos del valor medio del consumo de gasolina en automóviles alcanzan cifras de  $12.0 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'R' y de  $12.4 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'B'. Al final del horizonte o período de evaluación estos valores medios habrían descendido a  $8.0 \cdot 10^{-2}$  l/km en el caso del escenario 'R' y a  $8.1 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'B'.

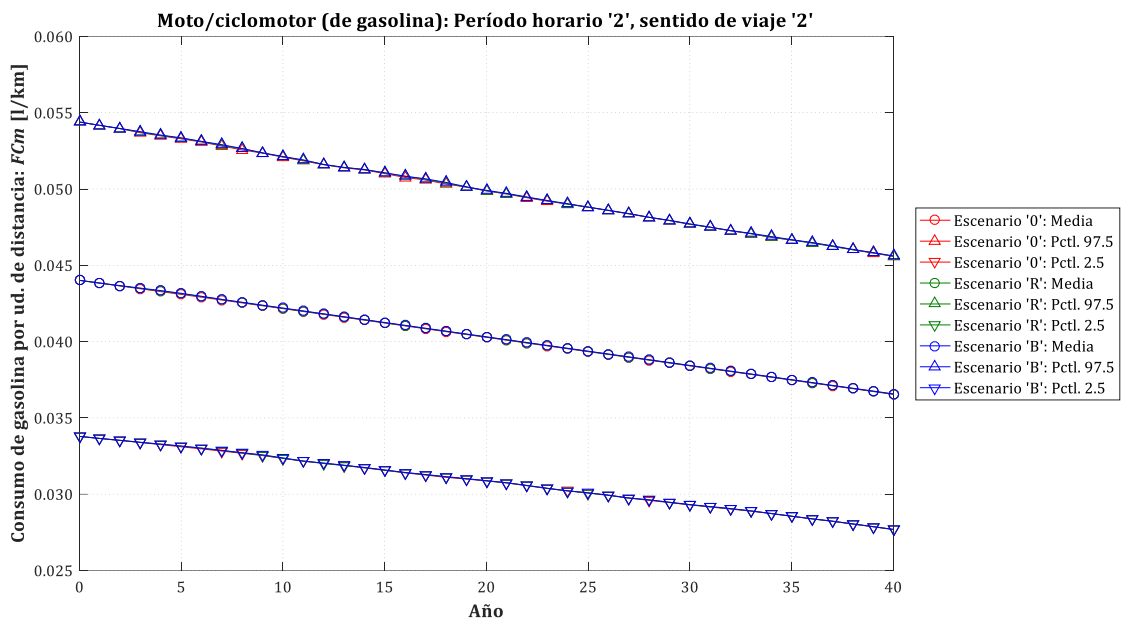
Para el período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.44), típico de las condiciones de hora valle, se vuelve a observar una total coincidencia entre los valores de consumo de los tres escenarios, al igual que sucedía en el caso del combustible diésel. Además, los consumos de gasolina en las condiciones de hora valle resultan apreciablemente menores que en las horas punta. Los valores medios de dicho consumo se reducen con el transcurso de los años, desde  $9.6 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $6.9 \cdot 10^{-2}$  l/km al final del horizonte de evaluación.

**9.3.3.4.c. Motos y ciclomotores de gasolina**

En el caso del consumo promedio de gasolina en motos y ciclomotores se establece como variable de análisis  $FCm_{rj1jk}^s$  ( $FCm_{r1jk}^*$  en el año base), representándose sus parámetros estadísticos de interés en las Figuras 9.45 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.46 (caso  $j=2, k=2$ ).



**Figura 9.45.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en motos y ciclomotores de gasolina, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.46.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del consumo promedio de combustible (por unidad de distancia recorrida) en motos y ciclomotores de gasolina, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En referencia al período horario '1' con sentido de viaje '1' (representativo de las condiciones de hora punta), la Figura 9.45 vuelve a mostrar que la situación comparativa entre escenarios concerniente al consumo de gasolina en motos y ciclomotores es muy semejante a las obtenidas previamente para el consumo de combustible en automóviles (ya sean diésel o de gasolina), pero con niveles de consumo notablemente más reducidos en el caso de los vehículos motorizados de dos ruedas, debido a las características propias de estos últimos. Así pues, en el escenario '0' los valores medios del consumo de gasolina de motos y ciclomotores por unidad de distancia recorrida variarían con el tiempo desde  $5.30 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $4.13 \cdot 10^{-2}$  l/km en el último año del horizonte o período de evaluación. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' están ligeramente afectados por la reducción de

capacidad viaria, observándose las mismas etapas de evolución en el tiempo que para el consumo de los automóviles. En este caso, los picos máximos del valor medio del consumo de gasolina de motos y ciclomotores se sitúan en  $5.45 \cdot 10^{-2}$  l/km en el escenario 'R', y en  $5.57 \cdot 10^{-2}$  l/km en el 'B'. Al final del horizonte o período de evaluación los valores medios de consumo habrían disminuido hasta  $4.21 \cdot 10^{-2}$  l/km para el escenario 'R' y hasta  $4.25 \cdot 10^{-2}$  l/km para el escenario 'B'.

El período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.46), representativo de las horas valle, se caracteriza de nuevo por una igualdad prácticamente absoluta entre los valores de consumo de los tres escenarios. En este caso los valores medios del consumo de gasolina se reducen progresivamente desde  $4.40 \cdot 10^{-2}$  l/km en el año base hasta  $3.66 \cdot 10^{-2}$  l/km al final del horizonte o período de evaluación.

### 9.3.4. Resultados relacionados con los costes generalizados, los volúmenes de viajes y el reparto modal

#### 9.3.4.1. Diferencias de coste generalizado por viaje medio entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia

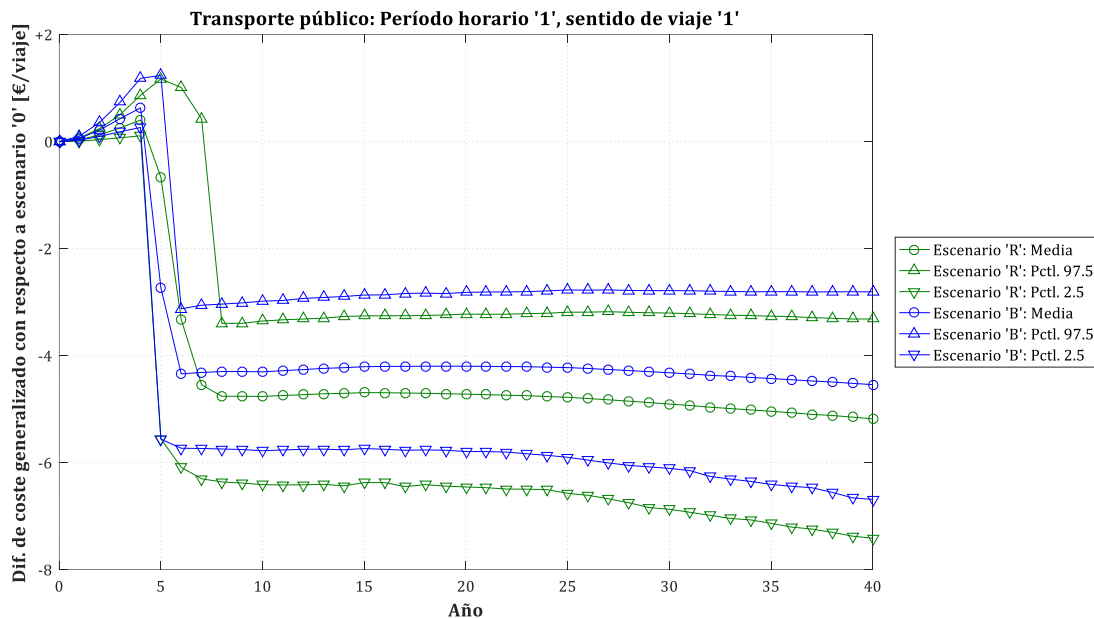
Para dar inicio a esta parte del análisis de resultados en la que se estudian aquellas variables de cálculo dotadas de un carácter más integral o sistémico (frente a las anteriores, más centradas en aspectos de detalle), se examinan, en primer lugar, las diferencias de coste generalizado por viaje medio que, según las previsiones del modelo, existirían entre los nuevos escenarios en los que se implantan sistemas de transporte público en plataforma reservada y con priorización semafórica (escenarios 'R' y 'B') y el escenario de referencia o escenario base (escenario '0'), en el que se mantiene a lo largo de todo el horizonte de evaluación la operación del transporte público mediante autobús convencional en tráfico mixto. Recuérdese que el coste generalizado de viaje representa un indicador que aglutina o combina, en una sola medida (cuantificada en este caso en unidades monetarias), las valoraciones de los principales atributos —normalmente de distinta naturaleza y por tanto medidos en diferentes unidades— que contribuyen a conformar la desutilidad total (combinación del conjunto de desincentivos) experimentada o percibida por el viajero al desplazarse entre dos puntos de origen y destino mediante un determinado modo de transporte (o, si fuese el caso, mediante una combinación de varios). Se trata de una valoración de costes de tipo predominantemente privado o individual y de naturaleza notablemente subjetiva.

Estas diferencias de coste generalizado de viaje se van a evaluar explícitamente para la opción modal de transporte público (Figuras 9.47, 9.48 y 9.49), para la opción de automóvil particular (Figuras 9.50 y 9.51) y para la opción de moto o ciclomotor (Figuras 9.52 y 9.53). En el caso de las opciones modales no motorizadas y de 'micromovilidad' (bicicleta o vehículo de movilidad personal, y desplazamiento peatonal), debido al propio diseño del modelo (guiado por la neutralidad), las variaciones de coste generalizado de viaje son las mismas para los tres escenarios, estando determinadas dichas variaciones únicamente por la evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo. Así pues, dado que para este tipo de modos la diferencia de coste generalizado entre escenarios es siempre nula, se prescinde de su representación gráfica.

El estudio estadístico de la evolución, a lo largo del horizonte o período de evaluación, de las diferencias de coste generalizado de viaje entre los distintos escenarios se sintetiza por medio de los parámetros estadísticos de interés que vienen siendo comúnmente utilizados en las restantes secciones del análisis de resultados: la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo). Igualmente, se mantienen como ejemplos significativos entre la potencial diversidad de períodos horarios y sentidos de viaje los casos relativos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ ) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' ( $j=2, k=2$ ).

### 9.3.4.1.a. Opción de transporte público

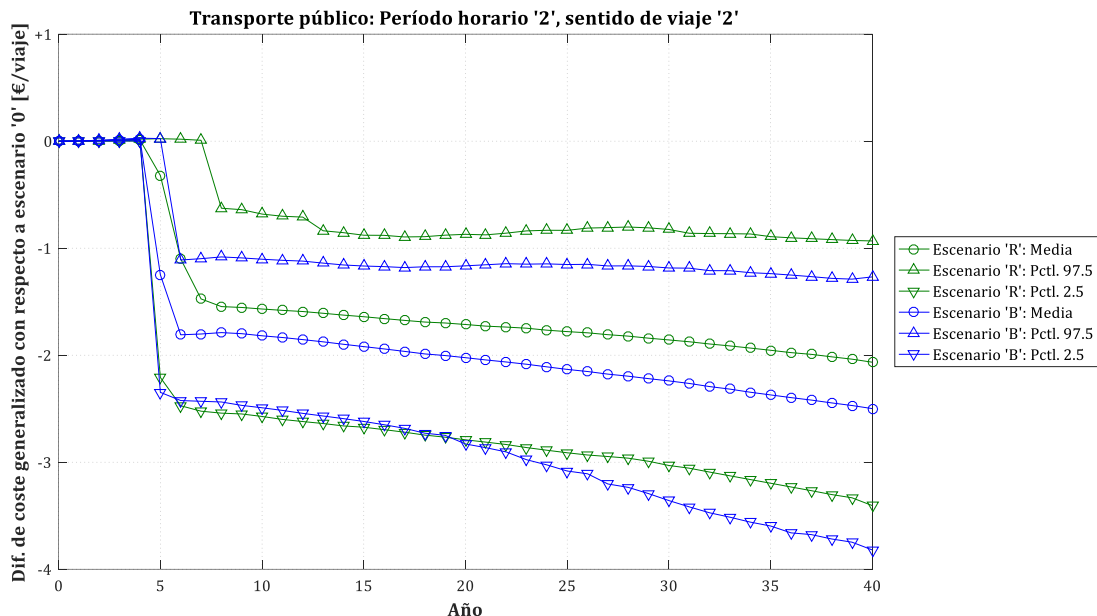
Se representa en las Figuras 9.47 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.48 (caso  $j=2, k=2$ ) la evolución prevista por el modelo para los parámetros estadísticos de interés de la diferencia de coste generalizado por viaje medio existente entre las opciones modales de transporte público disponibles en los distintos escenarios, tomando como referencia de la comparación el escenario '0', en el que se mantendría indefinidamente la operación del servicio de transporte público mediante autobús convencional en tráfico mixto. Nótese al respecto que los escenarios alternativos 'R' y 'B' incorporan, según el año del horizonte o período de evaluación, resultados correspondientes a diferentes modos de transporte público: autobús convencional en los años iniciales de implantación del nuevo sistema; tranvía o metro ligero y BHLS/BRT (respectivamente) una vez que estos han sido implantados y entran en servicio; e incluso una agregación estadística de uno u otro —según la simulación aleatoria en cuestión— para aquellos años de transición comprendidos entre la más temprana posible y la más tardía posible entrada en servicio del nuevo sistema de transporte público que corresponda a cada uno de estos dos escenarios.



**Figura 9.47.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

En la Figura 9.47 puede apreciarse que, para las condiciones representativas de horas punta (caso  $j=1, k=1$ ), la plena entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada y con priorización semafórica (tranvía o metro ligero y BHLS o BRT) conlleva un recorte muy sustancial del coste generalizado del viaje medio en transporte público en relación con el escenario de referencia, siendo este recorte algo superior en el caso del tranvía o metro ligero (escenario 'R') que en el del sistema de BHLS o BRT (escenario 'B'). En valores medios, este ahorro de coste generalizado por viaje se sitúa aproximadamente entre 4.69 y 5.18 €/viaje en el escenario 'R' y entre 4.20 y 4.54 €/viaje para el caso del escenario 'B'. Por el contrario, durante los primeros años del horizonte o período de evaluación (correspondientes a la fase de implantación del nuevo modo de transporte público), los escenarios alternativos 'R' y 'B' producen un incremento —no muy elevado pero sí apreciable— del coste generalizado de viaje en transporte público. Recuérdese que durante estos años, aun tratándose de los escenarios 'R' y 'B', el servicio de transporte público tendría que seguir siendo prestado mediante

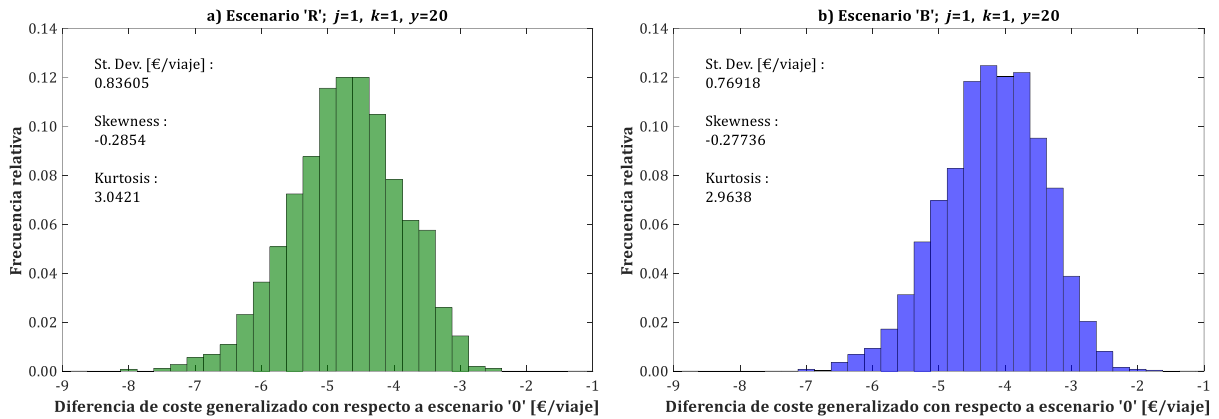
autobús convencional en tráfico mixto, pero disponiendo de una capacidad viaria para su circulación más reducida que en el escenario '0'. Los valores medios de este aumento de coste generalizado alcanzarían picos máximos de 0.40 €/viaje en el escenario 'R' y de 0.63 €/viaje en el caso del escenario 'B' (el percentil 97.5 podría llegar, en uno u otro caso, a valores máximos en torno a 1.20 €/viaje).



**Figura 9.48.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Por su parte, en las condiciones típicas de horas valle (caso  $j=2, k=2$ , representado en la Figura 9.48) se observa que la disminución del coste generalizado de viaje en transporte público ocasionado por la puesta en servicio de los nuevos modos en plataforma reservada y con priorización semafórica es muy inferior a la que se obtenía en el caso representativo de la hora punta, aunque aun así sigue siendo bastante notable. A diferencia del caso  $j=1, k=1$ , en las condiciones definidas para el caso  $j=2, k=2$  la reducción de coste generalizado —con respecto al escenario '0'— propiciada por la entrada en servicio de una línea de BHLS/BRT sería un poco mayor que la generada por un sistema tranviario o de metro ligero. Así, en términos de valores medios, la disminución de coste generalizado por viaje estaría aproximadamente comprendida entre 1.55 y 2.07 €/viaje en el escenario 'R' y entre 1.79 y 2.50 €/viaje en el escenario 'B'. Además, bajo estas condiciones características de hora valle, el incremento de coste generalizado de viaje en transporte público experimentado durante los primeros años del horizonte o período de evaluación en los escenarios 'R' y 'B' es prácticamente inapreciable (valores medios del orden de 1 o 2 céntimos de euro, respectivamente).

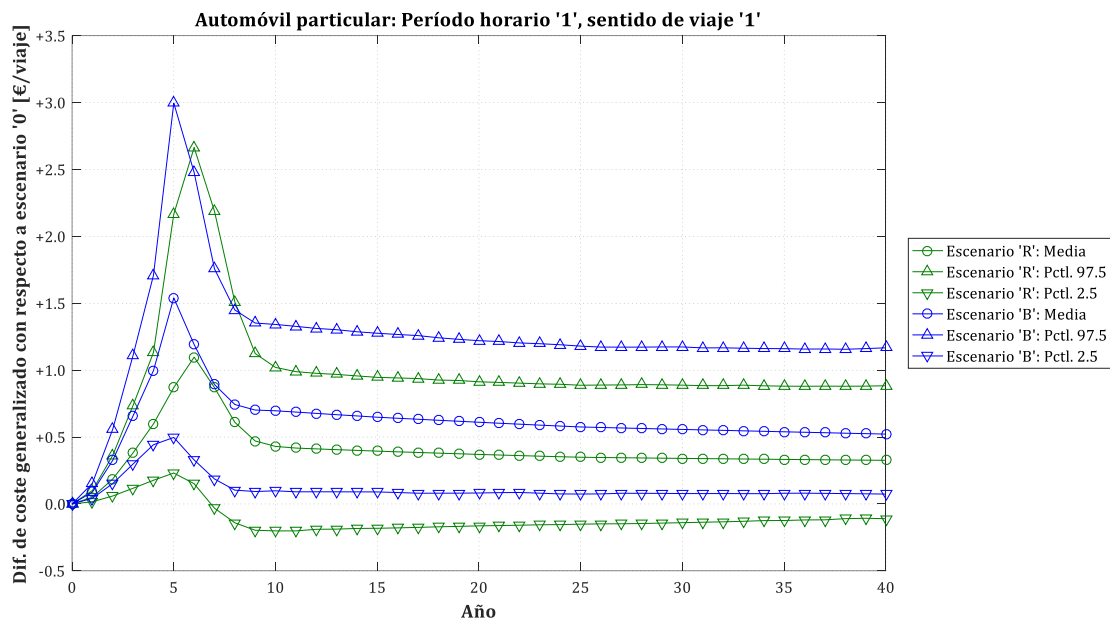
Adicionalmente, se incluyen en la Figura 9.49 los respectivos histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste generalizado entre los dos escenarios 'R' y 'B' y el escenario de referencia (escenario '0') para el viaje medio en transporte público. Dichos histogramas se refieren específicamente a las condiciones del período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ , como representación de horas punta) y al año '20' o año central del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ).



**Figura 9.49.** Histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

### 9.3.4.1.b. Opción de automóvil particular

En las Figuras 9.50 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.51 (caso  $j=2, k=2$ ) se muestra gráficamente la evolución de los parámetros estadísticos de interés relativos a la diferencia de coste generalizado prevista entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el tipo de desplazamiento medio realizado por los viajeros que utilicen la opción modal del automóvil particular.

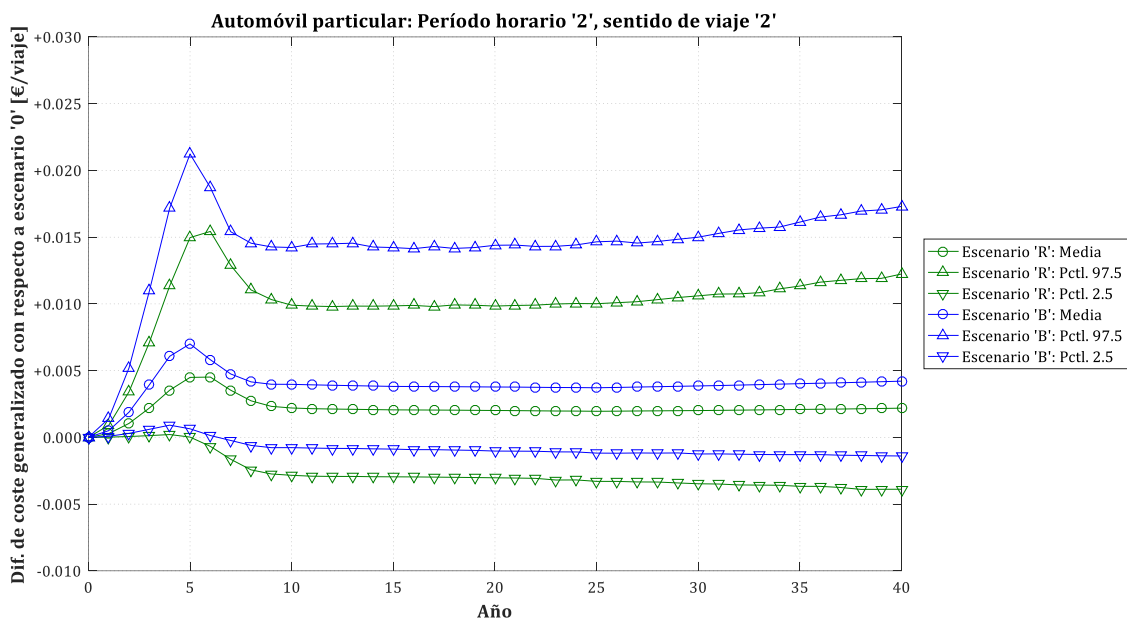


**Figura 9.50.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

Para el caso característico de las condiciones de hora punta (caso  $j=1, k=1$  en la Figura 9.50), es muy destacable la existencia de una etapa inicial de unos 5–6 años de duración (pertenecientes a la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público) en la que se produce, para los escenarios 'R' y 'B' en comparación con el escenario '0', un acusado aumento progresivo del coste generalizado de viaje en automóvil particular. Los valores medios de este incremento alcanzarían, al final de las correspondientes etapas iniciales, cuantías pico de 1.10 €/viaje para el escenario 'R' y de 1.54 €/viaje para el escenario 'B' (si bien los percentiles 97.5 podrían llegar a cotas máximas de 2.66 y 3.00 €/viaje,



respectivamente). El principal origen de este aumento de coste generalizado en la opción de automóvil particular hay que buscarlo, de nuevo, en la sensible reducción de capacidad viaria para tráfico general que —de acuerdo a los datos introducidos al modelo— llevaría aparejada la inserción de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada. Una vez superada esta etapa inicial de crecimiento —y con la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público— se produce una notable disminución del perjuicio causado por los escenarios ‘R’ y ‘B’ a los viajeros que sigan haciendo uso de la opción modal del automóvil particular. Tras este decrecimiento se da paso a una etapa de bastante estabilidad (a partir de aproximadamente el noveno o décimo año), en la que el exceso de coste generalizado de viaje en automóvil particular con respecto al escenario de referencia sigue siendo algo mayor para el escenario ‘B’ que para el escenario ‘R’. En el primer caso, los valores medios de la diferencia descienden suavemente desde 0.70 €/viaje (año ‘9’) hasta 0.52 €/viaje (final del horizonte de evaluación). En el segundo caso (escenario ‘R’), dichos valores medios evolucionarían desde 0.47 €/viaje (año ‘9’) hasta 0.33 €/viaje (último año del período de evaluación).



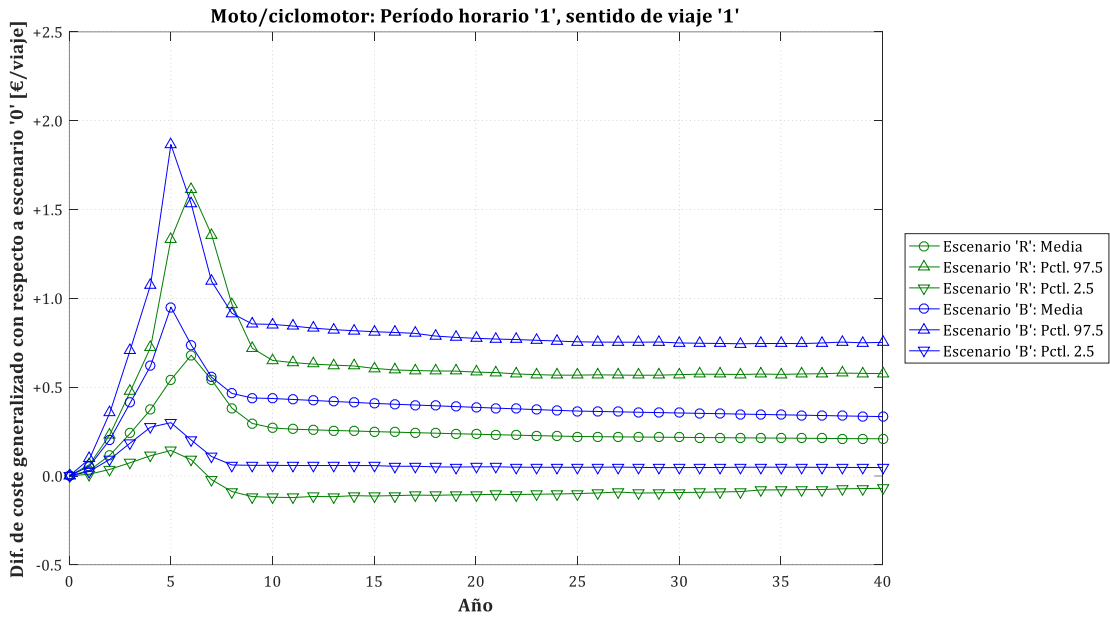
**Figura 9.51.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en automóvil particular, en el caso del período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’.

En contraste con las importantes diferencias obtenidas para las condiciones de hora punta, la Figura 9.51 (correspondiente al caso  $j=2, k=2$ , representativo de las situaciones de hora valle) pone de manifiesto que apenas existirían diferencias relevantes en el coste generalizado de la opción modal de automóvil particular entre los tres escenarios durante aquellos períodos horarios en los que el ratio Volumen/Capacidad de la circulación en tráfico general o mixto se mantiene en niveles bajos o moderados (nótese que el eje vertical de la Figura 9.51 está graduado a una escala que podría calificarse como ‘microscópica’).

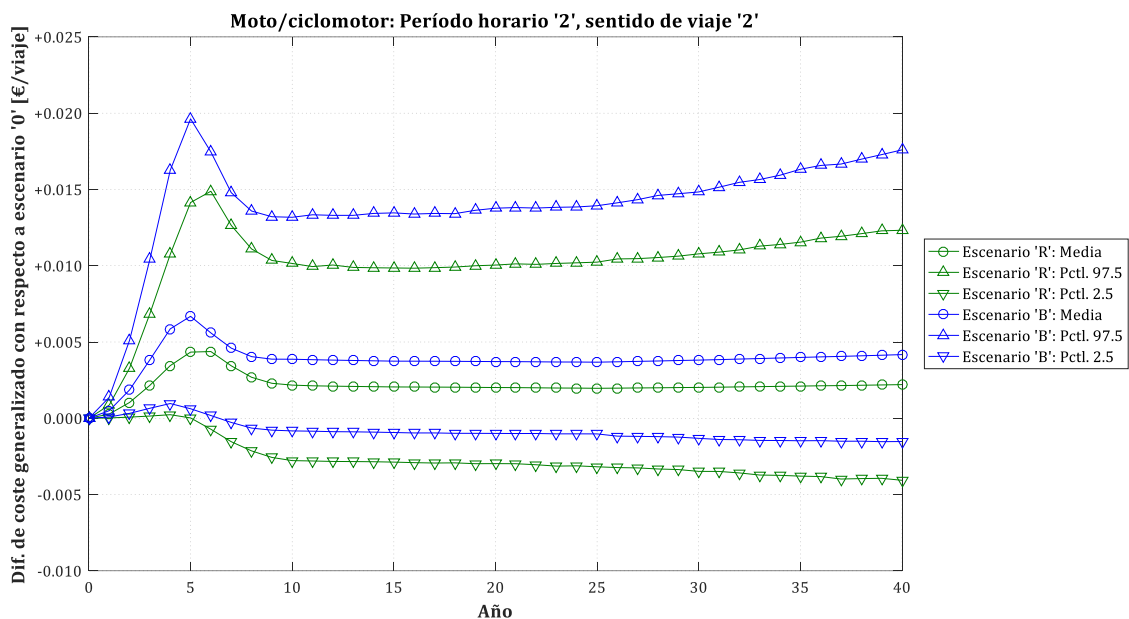
**9.3.4.1.c. Opción de moto o ciclomotor**

En relación con la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio efectuado en la opción modal de moto o ciclomotor, las Figuras 9.52 y 9.53 están destinadas a exponer gráficamente la evolución, a lo largo del horizonte o período de evaluación, de los parámetros estadísticos de interés de dicha diferencia. En concreto, se representan en estas figuras los resultados obtenidos para los casos  $j=1, k=1$  (Figura 9.52) y  $j=2, k=2$  (Figura 9.53).





**Figura 9.52.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.53.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia para el viaje medio en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Por lo que respecta a la situación representativa de las horas punta (caso  $j=1, k=1$ , mostrado en la Figura 9.52), el comportamiento cualitativo de la diferencia de coste generalizado entre escenarios para el viaje en moto o ciclomotor es bastante similar al observado anteriormente para el automóvil particular, aunque con unos incrementos de coste generalizado en los escenarios 'R' y 'B' de magnitud algo más reducida que en el caso del automóvil. Similarmente, los aumentos de coste generalizado del viaje en moto o ciclomotor ocasionados en el escenario 'R' tienden a ser un poco inferiores a los que se generarían en el escenario 'B'. Así, al final de una etapa inicial de incremento de unos 5–6 años de

duración, que se corresponde con la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público, se alcanzarían picos máximos del valor medio del aumento de coste generalizado en los nuevos escenarios cifrados en 0.68 €/viaje en el caso del escenario 'R' y en 0.95 €/viaje en el escenario 'B' (con cotas máximas de los percentiles 97.5 de 1.61 €/viaje y de 1.87 €/viaje, respectivamente). A continuación, tras una pequeña etapa de decrecimiento del exceso de coste generalizado ocasionado por los nuevos escenarios a los usuarios de la opción modal de moto o ciclomotor (la cual se inicia con la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público), se alcanza una nueva fase (aproximadamente a partir del octavo o noveno año) caracterizada por una notable estabilización de las diferencias de coste generalizado entre escenarios. Durante esta etapa, los valores medios de la diferencia disminuyen progresivamente desde 0.30 €/viaje (año '9') hasta 0.21 €/viaje (final del horizonte de evaluación) en el caso del escenario 'R'. Por su parte, en el escenario 'B' estos valores medios de la diferencia van cayendo suavemente desde 0.44 €/viaje (año '9') hasta 0.33 €/viaje (año final del período de evaluación).

Por el contrario, en el caso característico de las condiciones de hora valle (período horario '2' con sentido de viaje '2', representado en la Figura 9.53) se observa —al igual que para el automóvil particular— que las diferencias entre escenarios en el coste generalizado del viaje en moto o ciclomotor son prácticamente nulas (el valor medio de dichas diferencias en ningún momento llega a superar el céntimo de euro, e incluso el percentil 97.5 del escenario 'B' no sobrepasa un máximo de 2 céntimos).

#### **9.3.4.2. Diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular**

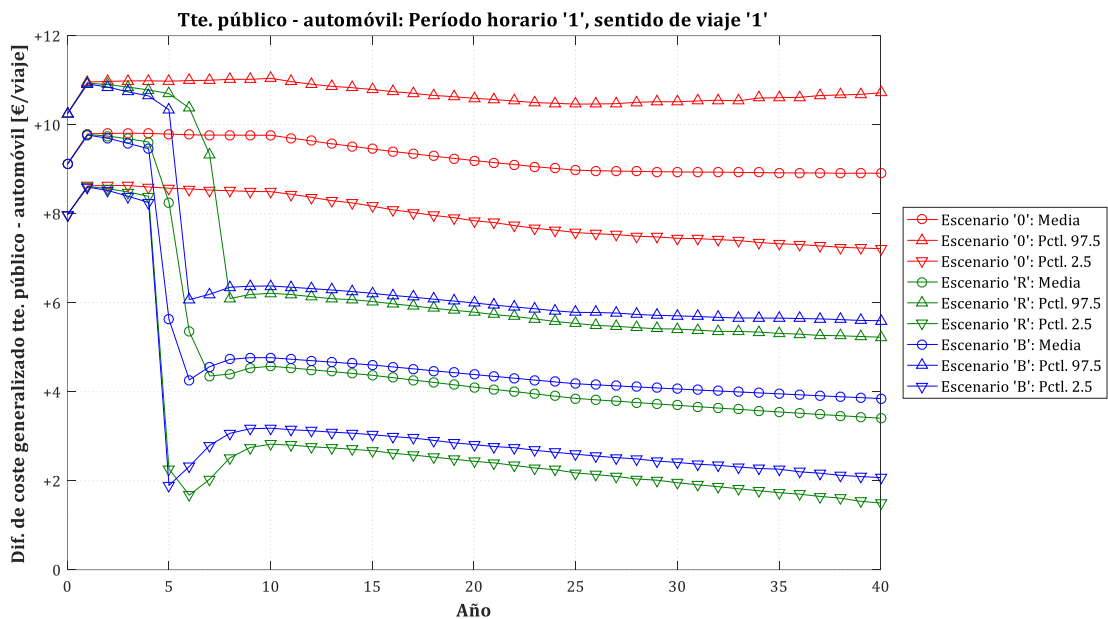
A continuación se afronta el estudio analítico de las diferencias de coste generalizado que, para el correspondiente viaje medio, existirían dentro de cada escenario entre la opción modal de transporte público (ya sea esta autobús convencional, tranvía o metro ligero, o BHLS/BRT) y la opción predominante en el transporte motorizado privado (automóvil particular). Por tanto, esta diferencia entre el coste generalizado de viaje en distintas opciones modales se examina para cada uno de los escenarios posibles ('0', 'R' y 'B'), teniendo una importancia capital en la evolución comparativa de las cuotas de reparto modal de cada una de estas dos opciones de movilidad.

En relación con el coste generalizado de viaje en transporte público, recuérdese que los escenarios 'R' y 'B' pueden incorporar e incluso combinar estadísticamente, según el año del horizonte o período de evaluación, resultados correspondientes a distintos modos de transporte público.

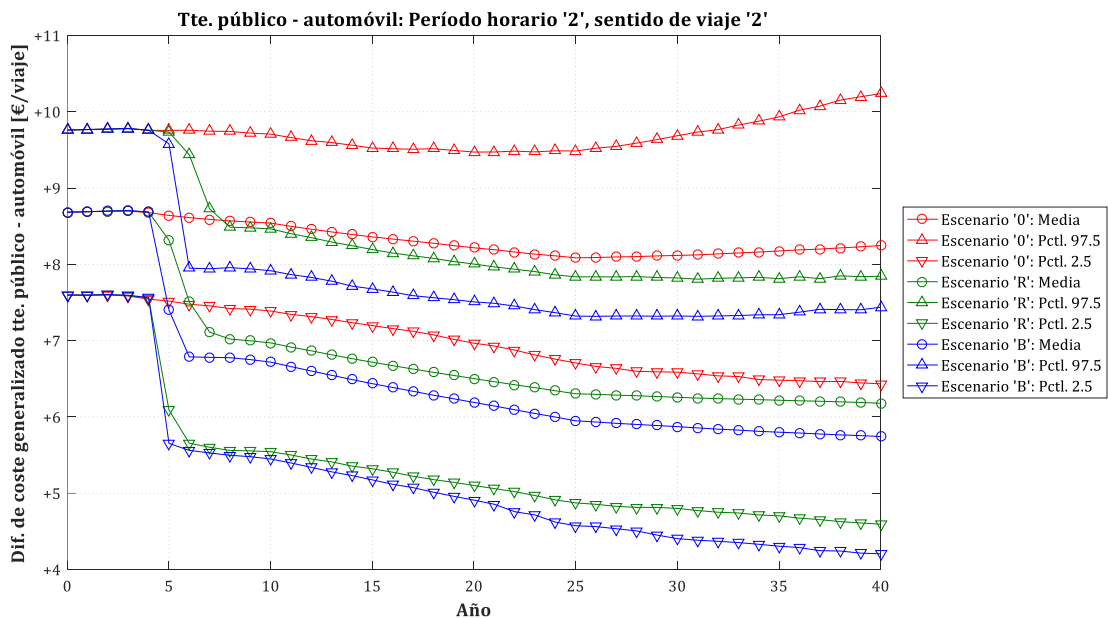
Por otra parte, el estudio estadístico, a lo largo del horizonte o período de evaluación, de las diferencias de coste generalizado de viaje entre transporte público y automóvil particular se va a materializar a través de los parámetros estadísticos de interés asiduamente propuestos (media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5). Paralelamente, se utilizan como ejemplos representativos de diferentes períodos horarios y sentidos de viaje los casos concernientes al período horario '1' con sentido de viaje '1' (Figura 9.54) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.55).

En el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', típico de las condiciones de hora punta, la Figura 9.54 muestra claramente cómo la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada y con priorización semafórica, en los escenarios 'R' y 'B', consigue reducir muy notablemente la brecha de coste generalizado percibido entre la opción de transporte público y el automóvil particular, favoreciendo por tanto el posible trasvase modal desde este último hacia el transporte colectivo. Así, en el escenario de referencia o escenario '0' los valores medios de la diferencia de coste generalizado de viaje entre transporte público y automóvil particular se mantienen relativamente estables dentro de un rango comprendido entre 8.91 y 9.81 €/viaje. Entre los escenarios 'R' y 'B', el primero de ellos (tranvía o metro ligero) consigue como tónica predominante una mayor reducción de la brecha de coste generalizado entre transporte público y automóvil particular, pero con unas diferencias bastante leves con respecto al escenario 'B' (BHLS o BRT). Durante la etapa inicial de estos dos escenarios (primeros años, correspondientes a la fase de implantación) la brecha de costes generalizados se mantiene bastante similar a la del escenario '0'. Sin embargo, según se va produciendo

la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público en las diferentes simulaciones, la brecha de costes generalizados disminuye drásticamente, hasta alcanzar a continuación una etapa definitiva de bastante estabilidad (aunque con una tendencia general ligeramente decreciente). Durante esta prolongada etapa (a partir del año '7') los valores medios de la diferencia de coste generalizado entre transporte público y automóvil particular son siempre mayores en el escenario 'B' que en el 'R', aunque con una distancia bastante pequeña entre ambos. En el escenario 'R' los valores medios de la brecha de costes generalizados se situarían durante esta etapa entre 3.41 y 4.57 €/viaje. Mientras, en el escenario 'B' dichas diferencias medias estarían comprendidas entre 3.85 y 4.77 €/viaje.



**Figura 9.54.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.55.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste generalizado por viaje medio entre transporte público y automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2', representativo de las condiciones de horas valle y mostrado en la Figura 9.55, cabe destacar que la reducción de la brecha de coste generalizado entre la opción de transporte público y el automóvil particular conseguida en los escenarios 'R' y 'B' es mucho menos acusada que en la situación característica de la hora punta. Además, en este caso es el sistema de tipo BHLS o BRT implantado en el escenario 'B' el que, por término medio, conduciría a un mayor acortamiento de dicha brecha (si bien de nuevo con una diferencia bastante ligera). Por su parte, en el escenario de referencia o escenario '0' los valores medios de la diferencia de coste generalizado de viaje entre transporte público y automóvil particular quedarían comprendidos entre 8.09 y 8.70 €/viaje (brecha algo inferior a la de la hora punta). En el caso de los escenarios 'R' y 'B', durante su etapa inicial (equivalente a grandes rasgos a la fase de implantación) las diferencias de coste generalizado entre transporte público y automóvil privado son prácticamente coincidentes con la existente en el escenario '0'. Con la puesta en servicio de los nuevos sistemas de transporte público se produce la previsible reducción de la brecha de coste generalizado entre la opción de transporte público y el automóvil particular, pero esta reducción presenta un tamaño muy inferior a la obtenida en el caso representativo de la hora punta. A continuación se llega a una extensa etapa de relativa estabilidad, aunque con una suave tendencia decreciente como tónica general (este decrecimiento es algo más marcado entre los años '10' y '25'). Durante esta etapa los valores medios de la diferencia de coste generalizado entre transporte público y automóvil particular se mueven entre 6.18 y 7.11 €/viaje en el caso del escenario 'R', mientras que son algo más reducidos en el caso del escenario 'B' (con valores medios entre 5.74 y 6.78 €/viaje).

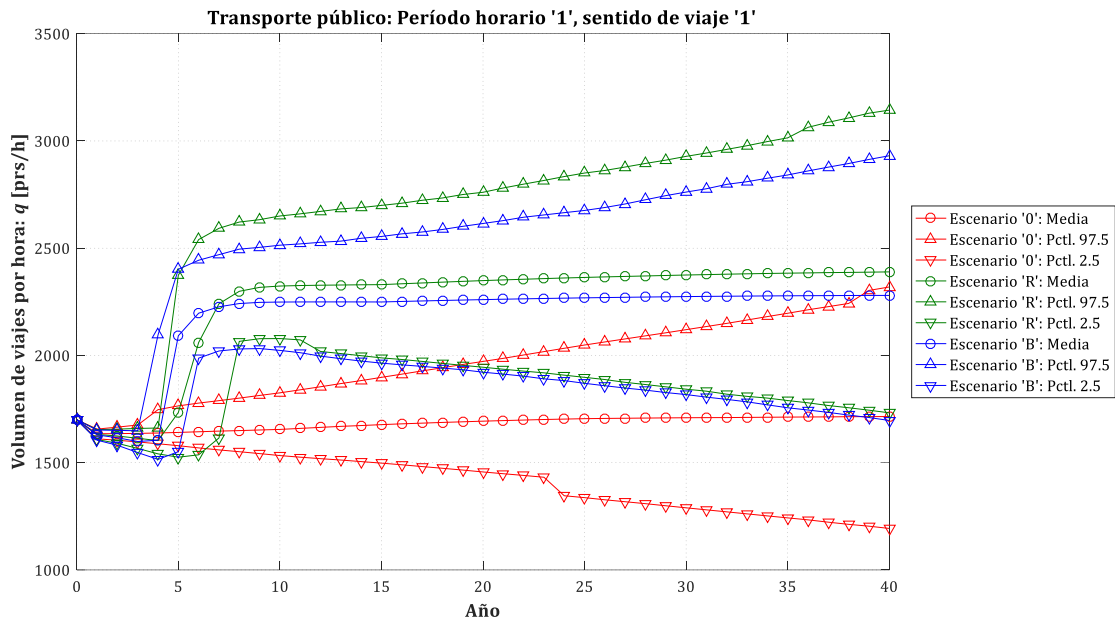
#### 9.3.4.3. Volumen de viajes por hora en las modalidades de transporte público y de transporte motorizado privado

Se examinan a continuación los resultados relativos al volumen de viajes por hora que, según las previsiones del modelo, serían efectuados en cada escenario mediante la opción de transporte público disponible y mediante cada uno de los dos modos de transporte motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor). Estos volúmenes de viajes se obtienen por tanto mediante el análisis de la variable del modelo  $q_{ry1jk}^{ms}$  (o su homóloga  $q_{1jk}^{*m}$  en el año base). En lo concerniente a la opción genérica de transporte público, téngase presente que en los escenarios 'R' y 'B' contiene, e incluso combina estadísticamente (según el año del horizonte o período de evaluación), resultados que pueden hacer referencia a distintos modos de transporte público.

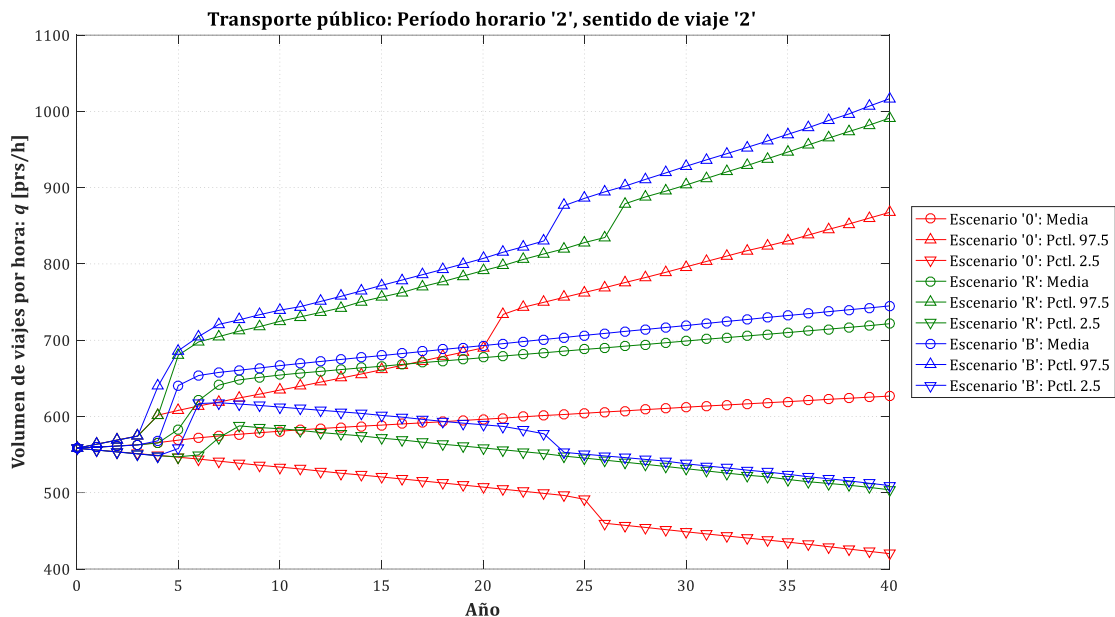
Por lo demás, el estudio estadístico de la evolución, durante el horizonte o período de evaluación, de los volúmenes de viajes por hora en estas modalidades de transporte queda concretado mediante los valores de los mismos parámetros estadísticos de interés que se vienen empleando profusamente en el análisis de resultados: la media o valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5. De la misma forma, se conservan como ejemplos representativos de las diferencias entre períodos horarios y entre sentidos de viaje los casos correspondientes al período horario '1' en el sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ ) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' ( $j=2, k=2$ ).

##### 9.3.4.3.a. Transporte público

Se representa gráficamente en las Figuras 9.56 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.57 (caso  $j=2, k=2$ ) la evolución en el tiempo, a lo largo del horizonte o período de evaluación, de los parámetros estadísticos de interés aplicados al volumen de viajes por hora efectuados mediante la opción modal de transporte público disponible en los distintos escenarios.



**Figura 9.56.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.57.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

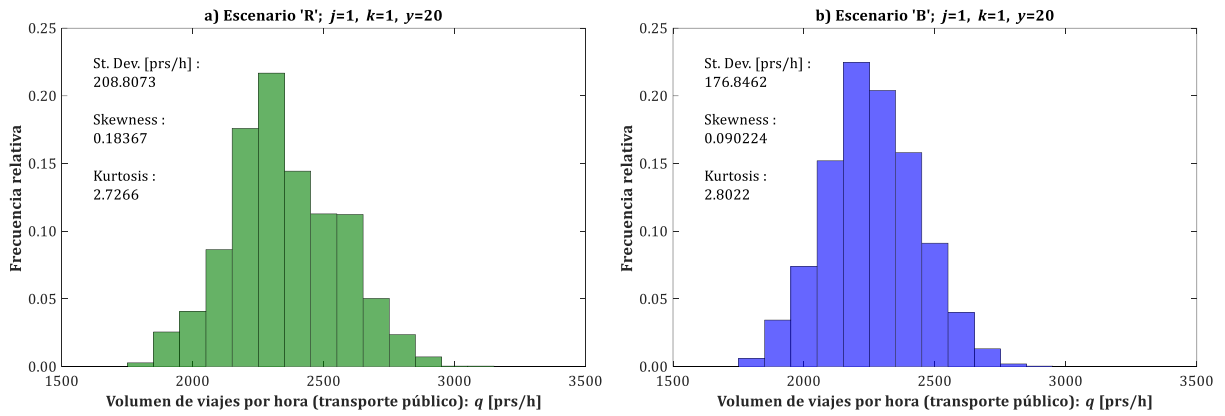
En referencia al período horario '1' con sentido de viaje '1', representativo de las condiciones de horas punta, la Figura 9.56 pone de manifiesto, como resultado fundamental, el importante aumento que el volumen de viajes por hora realizados en transporte público experimentaría al ser puestos en servicio los nuevos modos con plataforma reservada y priorización semafórica. Así, en caso de prolongarse durante todo el horizonte de evaluación la prestación del servicio mediante autobús convencional en tráfico mixto (escenario '0'), los valores medios del volumen de viajes en transporte público tan solo seguirían una tendencia general muy ligeramente creciente, sin apenas ganar pasajeros. Estos valores medios quedarían comprendidos a lo largo de los años entre 1,635 y 1,715 prs/h. Nótese, no obstante, que la amplitud del intervalo entre los percentiles 97.5 y 2.5 (por tanto, el nivel de incertidumbre sobre

los resultados) va aumentando con el transcurrir de los años, lo cual es lógico al incrementarse el plazo de las predicciones (este tipo de comportamiento es extensible también a los escenarios 'R' y 'B'). Por su parte, en los escenarios alternativos el volumen de viajes en transporte público es inicialmente (durante la fase de implantación, con servicio de autobús convencional) muy similar al del escenario '0', incluso ligeramente inferior. Sin embargo, según se va alcanzando en las simulaciones aleatorias el año de entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público, se aprecia un salto muy destacable en el número de pasajeros. Una vez que se llega a una etapa mucho más estable (que podría identificarse con la fase de madurez, situándose aproximadamente a partir del año '8'), se observa que el escenario 'R' (tranvía o metro ligero) tiende a proporcionar unos volúmenes de viajes en transporte público algo superiores a los del escenario 'B' (BHLS o BRT). En concreto, los valores medios del volumen de viajes en transporte público en el escenario 'R' se situarían, durante esta etapa, entre 2,299 y 2,390 prs/h, mientras que en el escenario 'B' dichos valores medios se moverían entre 2,242 y 2,280 prs/h. Por tanto, si se toman como referencia los valores medios, la ganancia de pasajeros de los nuevos modos de transporte público con respecto al escenario '0' se situaría, durante toda esta extensa etapa, alrededor de 650–675 prs/h en el caso del tranvía o metro ligero y en torno a 560–590 prs/h para el sistema de BHLS o BRT.

En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2', característico de las condiciones de horas valle, se aprecia en la Figura 9.57 que también se produce en los escenarios 'R' y 'B' un sensible incremento en el volumen de viajes por hora en transporte público, pero de una cuantía mucho más modesta que en la situación típica de hora punta. Los valores medios del volumen de viajes en transporte público en el escenario '0' se situarían, en este caso, entre 558 y 627 prs/h (con una tendencia en el tiempo ligeramente creciente). En los escenarios 'R' y 'B' el volumen de viajes en transporte público comienza siendo prácticamente idéntico al del escenario '0' (etapa inicial, fase de implantación), pero con la entrada en servicio de los nuevos modos se observa de nuevo un apreciable aumento del número de pasajeros. En este caso es el escenario 'B' (BHLS o BRT) el que tendería a aportar un mayor volumen de viajes en transporte público que el escenario 'R' (tranvía o metro ligero), aunque con diferencias bastante exiguas. Así, una vez alcanzada la etapa de estabilización de tendencias, los valores medios del volumen de viajes en transporte público evolucionarían desde aproximadamente 661 hasta 745 prs/h en el caso del escenario 'B', mientras que en el escenario 'R' esta misma evolución iría desde 648 hasta 722 prs/h. Esto implicaría que, en valores medios, la ganancia de pasajeros de los nuevos modos de transporte público con respecto al escenario '0' se quedaría, en este caso, en torno a 85–120 prs/h para el sistema de BHLS o BRT, y alrededor de 70–95 prs/h para el tranvía o metro ligero.

Por otra parte, nótese que los aparentes 'saltos' o escalones que pueden observarse en determinados puntos de las series de percentiles 97.5 y 2.5 en las Figuras 9.56 y 9.57 coinciden con los mismos años en los que se produce un salto de intervalo de operación de los modos de transporte público en las series de percentiles 2.5 y 97.5 (respectivamente) de las Figuras 9.13 y 9.14. Por tanto, los saltos puntuales observados en los percentiles extremos de las Figuras 9.56 y 9.57 estarían reflejando los efectos sobre la demanda o volumen de usuarios de los cambios de intervalo de operación (con discontinuidades entre distintos intervalos redondeados), con la consiguiente repercusión de estos cambios discretos sobre la frecuencia del servicio, sobre los tiempos medios de espera en parada, y, en último término, sobre el nivel de servicio y atractivo ofrecidos a los potenciales usuarios.

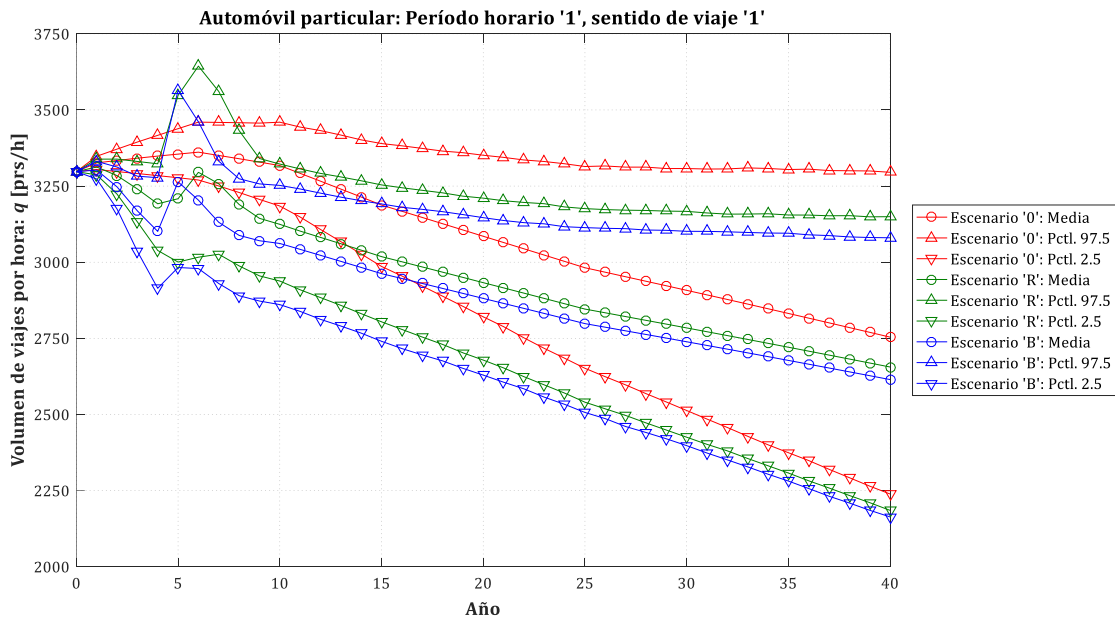
De manera complementaria, para los resultados de la variable analizada (volumen de viajes por hora en la opción modal de transporte público) se incorporan también en la Figura 9.58 sendos ejemplos de histogramas de frecuencias relativas, correspondientes a los escenarios 'R' (metro ligero o tranvía) y 'B' (BHLS o BRT). Los histogramas representados están centrados en el análisis de las condiciones representativas de hora punta ( $j=1, k=1$ , es decir, período horario '1' con sentido de viaje '1'), con el marco temporal de las previsiones específicas para el año '20' ( $y=20$ ).



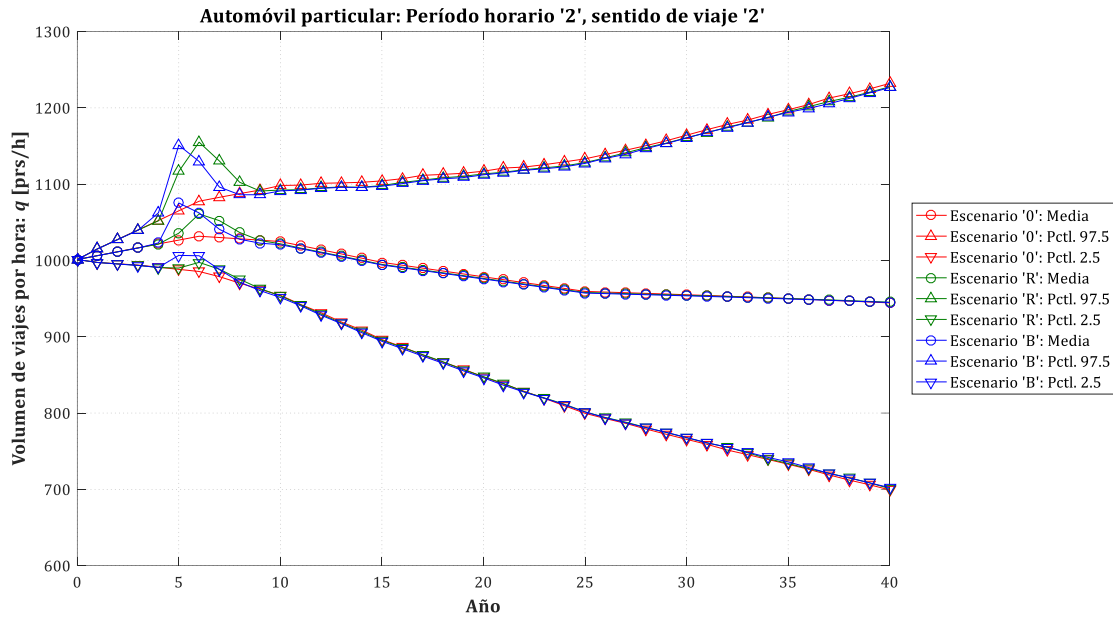
**Figura 9.58.** Histogramas de frecuencias relativas del volumen de viajes por hora en la opción de transporte público, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

### 9.3.4.3.b. Automóvil particular

En relación con la opción modal de automóvil particular, las Figuras 9.59 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.60 (caso  $j=2, k=2$ ) muestran gráficamente la evolución pronosticada por el modelo, a lo largo del horizonte o período de evaluación, para los parámetros estadísticos de interés del volumen de viajes por hora efectuados mediante dicho modo de transporte. Téngase presente al respecto que no se incluyen en estos volúmenes los posibles viajes pasantes (*through trips*) o viajes E-E (exterior-exterior), ya que estos son tratados por el modelo como un componente fundamentalmente exógeno (véase epígrafe 5.10.2).



**Figura 9.59.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en automóvil particular, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.60.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en automóvil particular, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', típico de las condiciones de hora punta, la Figura 9.59 refleja una situación en la que predomina, como tónica general común a los distintos escenarios, una tendencia decreciente en el volumen de viajes por hora realizados en automóvil particular (esta tendencia está sensiblemente condicionada por los datos introducidos en el apartado de evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo). No obstante, son los escenarios 'R' y 'B' (este último en algo de mayor medida) los que conducirían a un menor volumen de viajes en automóvil. Así, en el caso del escenario '0' se aprecian unos años iniciales en los que predominaría un ligero incremento (con valores medios entre 3,297 y 3,361 prs/h), para a continuación entrar en una fase descendente que llevaría a un valor medio de 2,754 prs/h al final del horizonte de evaluación. Los escenarios 'R' y 'B' presentan una etapa inicial (aproximadamente coincidente con la fase de implantación) en la que se aprecia un descenso bastante acusado del volumen de viajes en automóvil particular. Este descenso está relacionado con la progresiva reducción de capacidad viaria para tráfico mixto que va asociada a la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público. No obstante, una vez que estos nuevos modos se encuentran plenamente en servicio —y ya con capacidad viaria constante para el tráfico mixto— se vuelve a dar lugar a una etapa —ya definitiva— de tendencia claramente decreciente, aunque algo menos acusada que la inicial (con la posible excepción de los primeros años de esta nueva etapa). Durante esta última etapa, en el escenario 'R' los valores medios del volumen de viajes en automóvil particular descenderían desde un pico de 3,295 prs/h (año '6') hasta 2,656 prs/h (último año del período de evaluación). En el caso del escenario 'B', los valores medios disminuirían desde un pico de 3,264 prs/h (año '5') hasta 2,615 prs/h (año final del horizonte de evaluación). Nótese que en la transición entre las dos etapas de tendencia decreciente se observa un sensible repunte del volumen de viajes en automóvil, aproximadamente coincidente con la finalización de la etapa de reducción progresiva de la capacidad viaria para tráfico mixto (conclusión de las obras de implantación de los nuevos sistemas de transporte público). Este repunte está vinculado a un puntual incremento del volumen total de viajes en el conjunto de modos de transporte (como se verá posteriormente en la Figura 9.66) en vez de a un aumento de la cuota modal del automóvil particular.

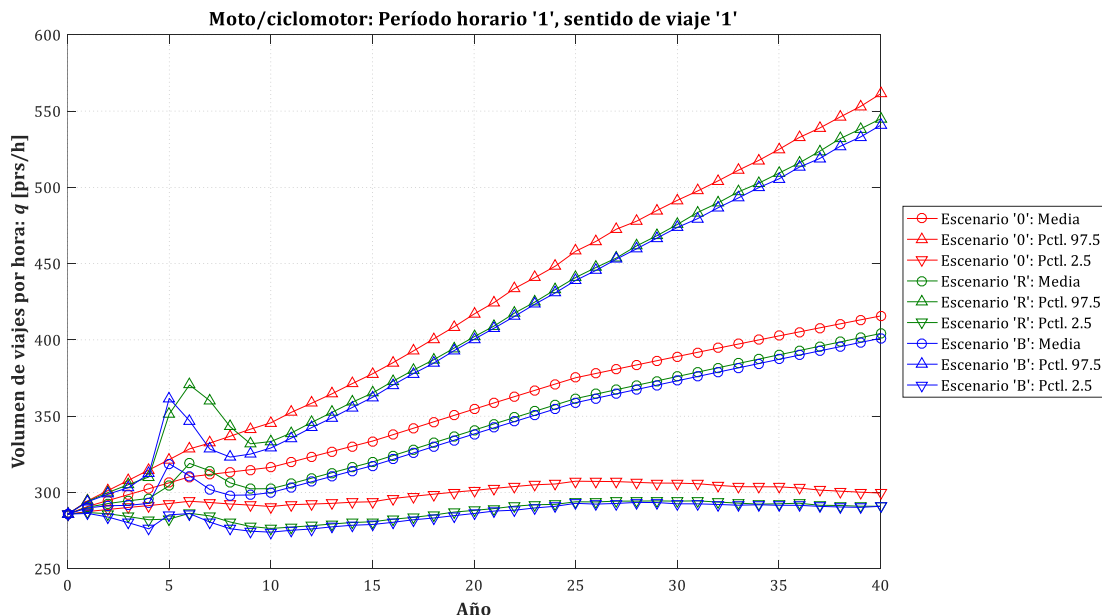
Por lo que respecta al período horario '2' con sentido de viaje '2', representativo de las condiciones de horas valle, la Figura 9.60 revela que, salvo para un pequeño número de años que se ven afectados por un cierto repunte en los escenarios 'R' y 'B', los volúmenes de viajes por hora en automóvil particular resultarían prácticamente coincidentes en los tres escenarios. Así, en el escenario '0' los valores medios



estarían comprendidos, a lo largo del horizonte o período de evaluación, entre 944 prs/h (año final) y 1,032 prs/h (año '6'). Los escenarios 'R' y 'B' comparten prácticamente el mismo valor medio que el '0' para el último año del período de evaluación (y en general durante cualquier año a partir de aproximadamente el noveno), pero presentan picos máximos durante el repunte de 1,061 prs/h en el caso del escenario 'R' y de 1,075 prs/h en el escenario 'B'. De nuevo se incide en que este pequeño repunte concuerda con un aumento del volumen total de viajes en el conjunto de modos de transporte, y no con un crecimiento de la cuota modal del automóvil. Por otra parte, la tendencia general común a los tres escenarios es levemente decreciente (al menos en lo que a valores medios y percentiles inferiores al 50 se refiere), estando esta tendencia un tanto influenciada por los datos introducidos relativos a la evolución futura de otros costes modales que se aplican de forma exógena al modelo.

### 9.3.4.3.c. Moto y ciclomotor

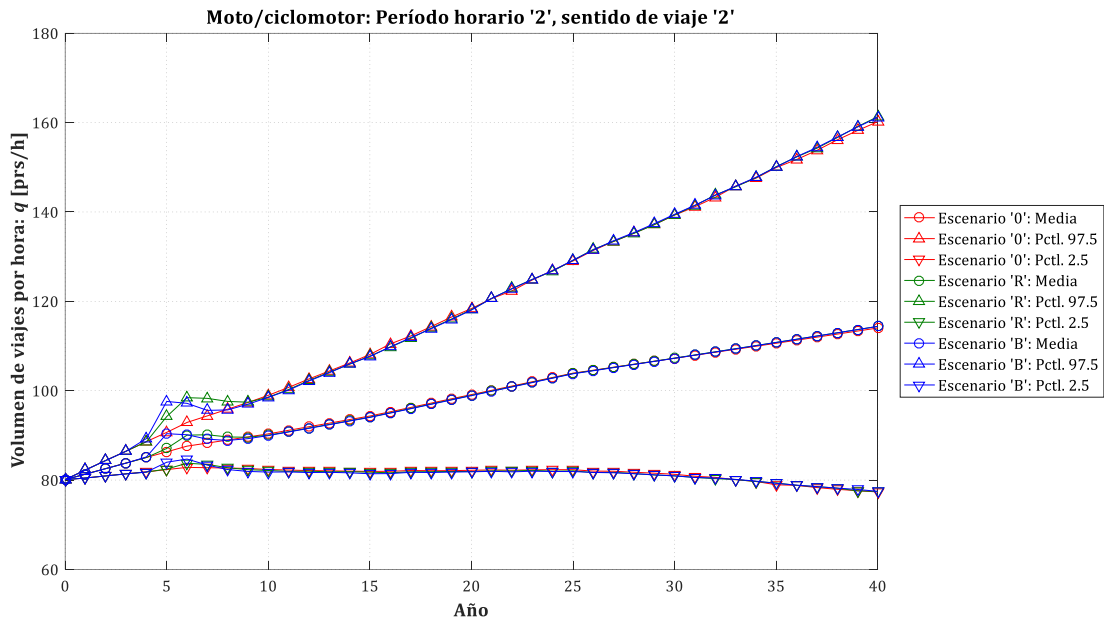
En las Figuras 9.61 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.62 (caso  $j=2, k=2$ ) se representa gráficamente la evolución prevista por el modelo para los parámetros estadísticos de interés del volumen de viajes por hora efectuados mediante vehículos motorizados de dos ruedas (motos y ciclomotores). Se incide de nuevo en que los volúmenes de viajes que son objeto de estudio en este punto no incluyen posibles viajes pasantes (*through trips*) o E-E (exterior-exterior).



**Figura 9.61.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

Para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', representativo de las condiciones de horas punta, se observa globalmente en la Figura 9.61 que prevalece, como característica común a los tres escenarios, una tendencia general creciente en el volumen de viajes por hora efectuados en motos y ciclomotores. Esta tendencia general está de nuevo parcialmente condicionada por los datos introducidos en el apartado de evolución futura de otros costes modales aplicados de forma exógena al modelo. Se aprecia, por otra parte, que durante la gran mayoría del horizonte o período de evaluación serían los escenarios 'R' y 'B' los que implicarían un volumen más reducido de viajes en vehículos motorizados de dos ruedas, con muy escasas diferencias entre ellos dos y sin apartarse tampoco mucho de los resultados del escenario '0'. De hecho, en dicho escenario '0' los valores medios del volumen de viajes por hora en moto o ciclomotor evolucionarían desde 286 prs/h (año base) hasta 416 prs/h (último año del período de evaluación). Por su parte, los escenarios 'R' y 'B', partiendo del mismo valor inicial en el año base, llegarían al final del horizonte de evaluación a valores medios de 404 y 401 prs/h, respectiva-

mente. En estos dos escenarios puede apreciarse nuevamente la previsión de un cierto repunte del volumen de viajes en moto o ciclomotor en torno a la finalización de la etapa de reducción progresiva de la capacidad viaria para tráfico mixto (aproximadamente coincidente por tanto con la conclusión de las obras de implantación de los nuevos sistemas de transporte público). Este repunte se basa, en todo caso, en un incremento del volumen total de viajes en el conjunto de modos de transporte, y no tanto en un aumento de la cuota modal de la moto o ciclomotor.



**Figura 9.62.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen de viajes por hora en moto o ciclomotor, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

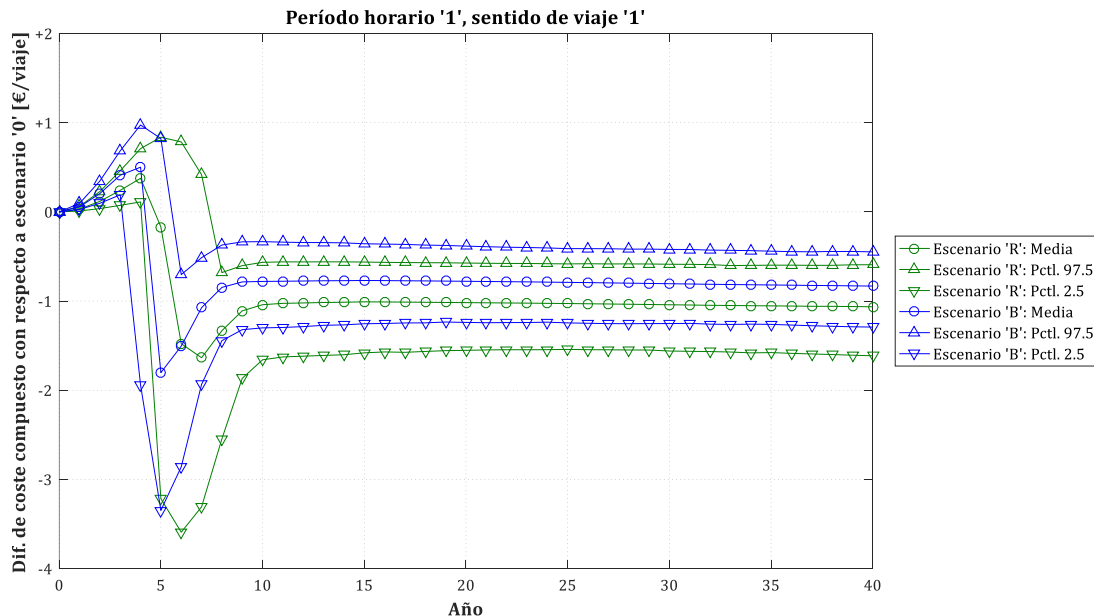
En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2', característico de las condiciones de horas valle, el resultado más destacable de la Figura 9.62 es que durante la casi totalidad del horizonte o período de evaluación los tres escenarios conducirían prácticamente a los mismos volúmenes de viajes por hora en vehículos motorizados de dos ruedas. La tendencia general predominante es, como en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', de signo creciente. Así, los valores medios evolucionarían, en cualquiera de los tres escenarios, desde 80 prs/h (año base) hasta 114 prs/h (año final del horizonte de evaluación). No obstante, se aprecia de nuevo en los escenarios 'R' y 'B' un ligero repunte localizado en torno a la conclusión de la fase de reducción progresiva de la capacidad viaria para tráfico mixto.

**9.3.4.4. Diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia**

A continuación se procede al análisis de las diferencias de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado entre viajeros con capacidad efectiva de elección modal y viajeros cautivos de algún modo de transporte) que, de acuerdo a las previsiones del modelo, se producirían entre los nuevos escenarios con implantación de sistemas de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (escenarios 'R' y 'B') y el escenario de referencia o escenario base (escenario '0'). Estas diferencias de coste compuesto entre escenarios se determinan a partir de los valores de la variable  $\Delta Kw_{ry1,jk}^s$ . Se recuerda que el coste compuesto de viaje representa una medida combinada de la desutilidad (cuantificada en unidades monetarias como los costes generalizados) asociada a todo un determinado conjunto de opciones o alternativas modales (en este caso transporte público, automóvil particular, moto o ciclomotor, bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viaje a pie), donde cada una de ellas presenta a su vez su propia desutilidad o coste generalizado. Por tanto, permite comparar cuán

favorable o desfavorable resulta para el potencial viajero el conjunto de opciones modales bajo las circunstancias propias de cada escenario.

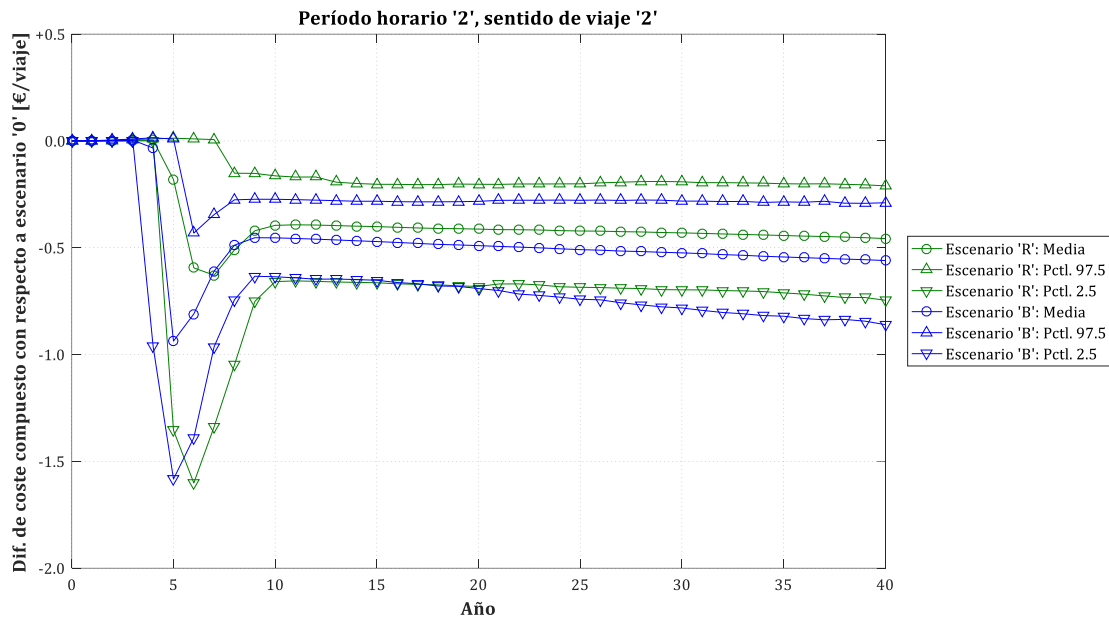
La posible evolución, a lo largo del horizonte o período de evaluación, de las diferencias de coste compuesto de viaje entre los distintos escenarios se representa estadísticamente por medio de los mismos parámetros de interés que se han considerado en las demás secciones del análisis de resultados, es decir, media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5. Además, como ejemplos representativos de la disparidad de períodos horarios y sentidos de viaje, se mantienen los casos relativos al período horario '1' con sentido de viaje '1' (mostrado en la Figura 9.63) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' (Figura 9.64).



**Figura 9.63.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

Para las condiciones típicas de horas punta (caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'), la Figura 9.63 pone de relieve que la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (tranvía o metro ligero y BHLS o BRT) sería capaz de generar una disminución sustancial del coste compuesto de viaje con respecto al escenario de referencia, siendo esta disminución generalmente mayor en el escenario 'R' que en el escenario 'B' (aunque con una diferencia entre ellos relativamente moderada). Es necesario distinguir, no obstante, diferentes etapas a lo largo del horizonte o período de evaluación. Así, en una pequeña etapa inicial que está vinculada a la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público, los escenarios 'R' y 'B' (todavía con servicio de autobús convencional y con progresiva limitación de la capacidad viaria) conllevan de hecho un aumento del coste compuesto en relación al escenario '0'. Los valores medios de este aumento llegarían a picos máximos de 0.38 €/viaje en el caso del escenario 'R' y de 0.50 €/viaje en el escenario 'B' (por su parte, los percentiles 97.5 podrían alcanzar registros máximos de 0.84 y 0.97 €/viaje, respectivamente). Por el contrario, durante la fase de madurez de los nuevos modos de transporte público (aproximadamente tres últimos cuartos del horizonte o período de evaluación) se produce una etapa de notable estabilidad en la que los escenarios 'R' y 'B' conllevan una clara reducción del coste compuesto de viaje en comparación al escenario '0'. Los valores medios de esta disminución se situarían, a lo largo de esta etapa, en torno a 1.01–1.06 €/viaje en el caso del escenario 'R', y alrededor de 0.77–0.83 €/viaje en el caso del escenario 'B'. En la transición entre una y otra etapa (coincidiendo aproximadamente con la fase de introducción de los nuevos servicios de transporte público) se aprecia durante un breve período una abrupta disminución del coste compuesto con respecto al escenario '0'.

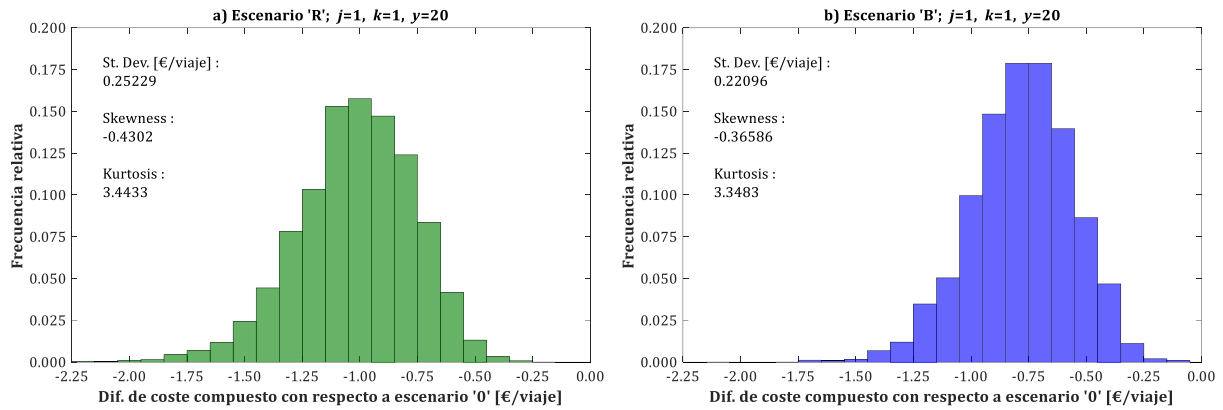
Durante esta pequeña etapa de transición se detectan valores medios de la reducción de coste compuesto que alcanzarían picos puntuales de 1.64 €/viaje en el escenario 'R' y de 1.80 €/viaje en el escenario 'B'.



**Figura 9.64.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En el caso representativo de las condiciones de hora valle (período horario '2' con sentido de viaje '2'), la Figura 9.64 muestra también que la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público (tranvía o metro ligero y BHLs o BRT) originaría una reducción del coste compuesto de viaje con respecto al escenario de referencia, pero a diferencia del caso anterior esta disminución es ligeramente mayor en el escenario 'B' que en el escenario 'R'. Además, en uno u otro caso, la cuantía de estas reducciones resulta notablemente menor que en las condiciones típicas de hora punta. También de nuevo se pueden distinguir varias etapas a lo largo del horizonte o período de evaluación. En la breve etapa inicial ligada a la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público se produce ahora una diferencia prácticamente nula en el coste compuesto de viaje de los tres escenarios. Por otra parte, en la fase de madurez de los nuevos sistemas de transporte público se observan tendencias notablemente estables en el tiempo (a partir de aproximadamente el noveno o décimo año), con una reducción consolidada del coste compuesto de viaje de los nuevos escenarios con respecto al escenario '0'. Así, durante esta etapa los valores medios de esta reducción se situarían alrededor de 0.39–0.46 €/viaje en el caso del escenario 'R', y en torno a 0.45–0.56 €/viaje en el caso del escenario 'B' (a muy grandes rasgos, el nivel general de estas reducciones es aproximadamente la mitad que en el período horario '1' con sentido de viaje '1'). En la transición entre estas dos etapas se observa también una disminución bastante brusca del coste compuesto con respecto al escenario '0', concurrente más o menos con la fase de introducción de los nuevos servicios de transporte público. En este breve período de transición los picos máximos de la reducción de coste compuesto alcanzarían, en valores medios, 0.63 €/viaje en el escenario 'R' y 0.94 €/viaje en el 'B'.

Por último, se ofrecen en la Figura 9.65 dos histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste generalizado de viaje (promediado o ponderado) prevista entre los respectivos escenarios alternativos 'R' y 'B' y el escenario de referencia o escenario '0'. Nótese que las condiciones específicas analizadas en dichos histogramas corresponden al período horario '1' con sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ , es decir, condiciones representativas de hora punta) y al año '20' del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ).

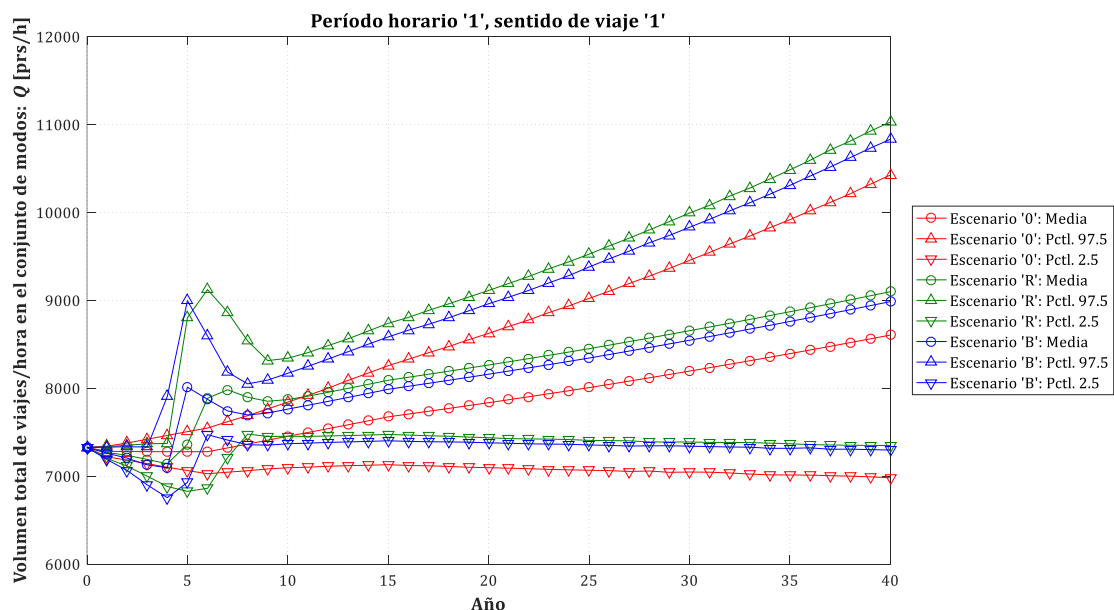


**Figura 9.65.** Histogramas de frecuencias relativas de la diferencia de coste compuesto de viaje (promediado o ponderado) entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

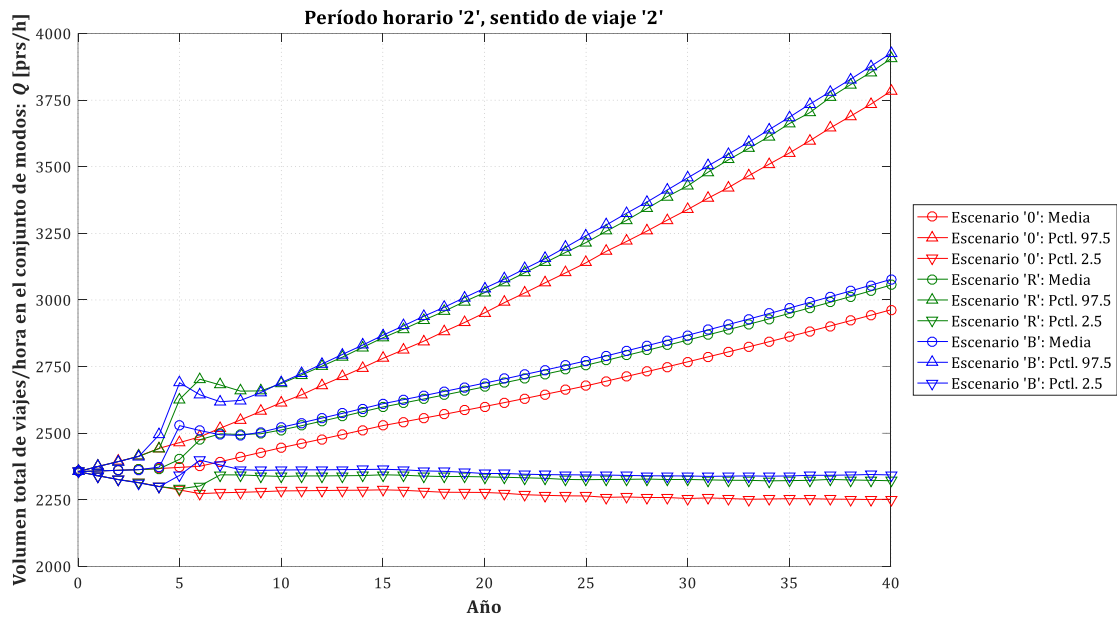
### 9.3.4.5. Volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales

Es el turno ahora para el estudio del volumen o número total de viajes (por hora) que, según los pronósticos del modelo, serían realizados en cada caso mediante todo el conjunto de opciones modales de transporte contempladas en la modelización (transporte público, automóvil particular, moto o ciclomotor, bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viaje a pie). Por consiguiente, la variable objeto de análisis para este tipo de estudio ha de ser  $Q_{ry1jk}^s$  (junto con su homóloga  $Q_{1jk}^*$  en el caso particular del año base), debiendo considerarse su evolución a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación contado desde el año base de partida.

Las Figuras 9.66 y 9.67 presentan, por tanto, los resultados obtenidos por el modelo para el volumen total de viajes por hora en el conjunto de modos de transporte, mostrándose una vez más en las gráficas la media, el percentil 97.5 y el percentil 2.5 como parámetros estadísticos de interés de la variable aleatoria  $Q_{ry1jk}^s$ . Asimismo se conservan como ejemplos representativos de distintos períodos horarios y sentidos de viaje los casos referidos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' (Figura 9.66) y al período horario '2' en el sentido '2' (Figura 9.67).



**Figura 9.66.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.67.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

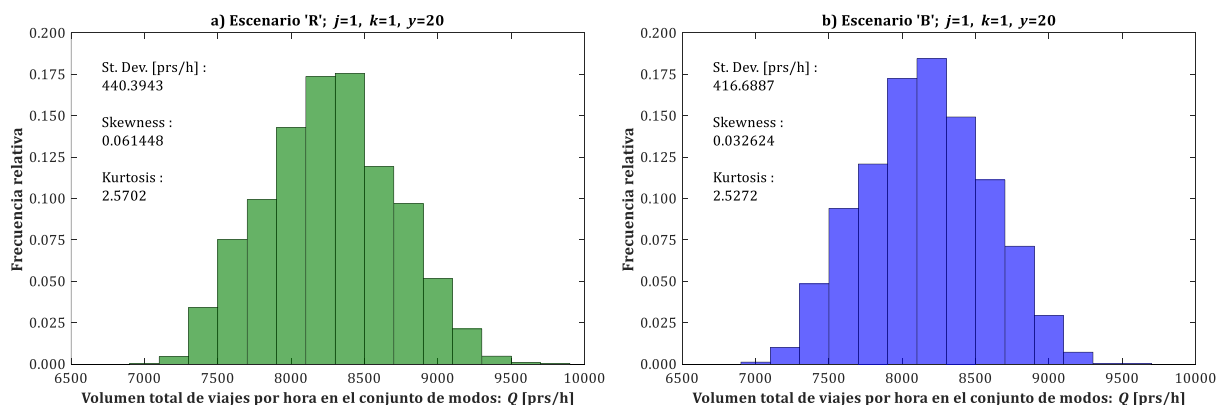
En el caso relativo al período horario '1' con sentido de viaje '1', característico de las condiciones de hora punta, la Figura 9.66 muestra una situación en la que impera, como tónica global del horizonte o período de evaluación y de manera bastante común a los distintos escenarios, una tendencia general creciente en el volumen total de viajes. Nótese que esta tendencia general está en buena medida condicionada por los datos introducidos al modelo en el apartado de evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos, es decir, ajenos a los costes de transporte o atributos (recuérdese el papel de la variable  $IQex_{r1jk}$  como tasa media de variación exógena anual), y no solamente por el comportamiento del coste compuesto de viaje. De todos modos, es necesario distinguir unos patrones de evolución sensiblemente diferentes entre el escenario '0' y los escenarios alternativos 'R' y 'B'. Así, en el escenario '0' se aprecia una etapa inicial (de aproximadamente unos seis años de duración) en la que los valores medios del volumen total de viajes se mantendrían en guarismos bastante estables, situándose en torno a cifras aproximadas de 7,300 prs/h. A continuación se entraría en una etapa de crecimiento suave —al menos en lo que a los valores medios se refiere— pero notablemente constante, que culminaría al final del horizonte de evaluación con un valor medio del volumen total de viajes cifrado en 8,606 prs/h. En cuanto a los escenarios 'R' y 'B', el primero de ellos (implantación de tranvía o metro ligero) tiende a proporcionar volúmenes totales de viajes muy ligeramente mayores que el escenario 'B' (implantación de BHLS/BRT) y ambos, a su vez, moderadamente superiores a los del escenario '0' (excepto para una breve etapa inicial, como se verá a continuación). En efecto, durante dicha etapa inicial, que corresponde aproximadamente a la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público, los escenarios 'R' y 'B' presentarían un menor volumen total de viajes que el escenario '0', observándose una tendencia decreciente en sus valores medios (originada por la progresiva reducción de capacidad viaria para tráfico mixto, que afecta principalmente al volumen de viajes en automóvil). Así, durante esta etapa inicial, los valores medios del volumen total de viajes alcanzarían cotas mínimas de 7,141 prs/h en el escenario 'R' y de 7,097 prs/h en el escenario 'B'. Por el contrario, a partir de aproximadamente los años '9' o '10' (con los nuevos servicios de transporte público ya plenamente consolidados y con capacidad viaria constante para tráfico mixto desde hace años), se observa una prolongada etapa —ya definitiva— en la que los volúmenes totales de viajes en los escenarios 'R' y 'B' siguen una tendencia establemente creciente, siendo dichos volúmenes claramente superiores a los del escenario '0' (aunque con una diferencia bastante moderada). Durante esta última etapa los valores medios del volumen total de viajes en el conjunto de modos de transporte ascenderían desde 7,853 prs/h (año '9') hasta 9,099 prs/h



(último año del período de evaluación) en el caso del escenario 'R', y desde 7,718 prs/h (año '9') hasta 8,986 prs/h (final del horizonte de evaluación) en el escenario 'B'. En la fase de transición entre las dos etapas descritas se aprecia un notable repunte del volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales, coincidente en el tiempo con la fase de introducción de los nuevos servicios de transporte público y con la finalización de la etapa de reducción progresiva de la capacidad viaria para tráfico mixto. Este repunte concuerda, en todo caso, con la acusada disminución del coste compuesto de viaje observada anteriormente en la Figura 9.63. Durante esta etapa de transición se registrarían picos puntuales en los valores medios del volumen total de viajes que según el modelo alcanzarían las 7,984 prs/h en el escenario 'R' (año '7') y las 8,014 prs/h en el escenario 'B' (año '5').

Por su parte, para el período horario '2' con sentido de viaje '2' (representativo de las condiciones de horas valle) se observan en la Figura 9.67 unas tendencias globales que cualitativamente son bastante similares a las descritas para el caso  $j=1, k=1$  (Figura 9.66), aunque con valores del volumen total de viajes en todo caso muy inferiores a aquellos. No obstante, cabe señalar algunas diferencias adicionales con respecto al caso anterior. Así, en una primera y breve etapa inicial, en la que los valores medios se mantienen aproximadamente constantes (alrededor de 2,360 prs/h), se produce la práctica igualdad de los volúmenes totales de viajes en los tres escenarios. En la etapa mayoritaria en la que domina el crecimiento sostenido (a partir de aproximadamente el octavo o noveno año) es ahora el escenario 'B' el que conduciría a unos volúmenes totales de viajes ligerísimamente mayores que los del escenario 'R' (y en ambos casos un poco mayores a los del escenario '0'). Las progresiones de los valores medios durante esta etapa irían desde 2,428 prs/h (año '9') hasta 2,963 prs/h (último año del período de evaluación) en el escenario '0', desde 2,498 prs/h (año '9') hasta 3,056 prs/h (año final del horizonte de evaluación) en el escenario 'R', y desde 2,504 prs/h (año '9') hasta 3,077 prs/h (año final) en el caso del escenario 'B'. De nuevo se aprecia, para los escenarios 'R' y 'B', un sensible repunte de los volúmenes totales de viajes en el conjunto de opciones modales en torno a la fase de introducción de los nuevos servicios de transporte público, el cual resulta consistente con la disminución bastante brusca del coste compuesto de viaje detectada en la Figura 9.64.

Adicionalmente, se representan en la Figura 9.68 dos ejemplos de histogramas de frecuencias relativas del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, correspondientes a los escenarios 'R' y 'B'. Dichos histogramas hacen referencia a las condiciones representativas de hora punta (período horario '1' con sentido de viaje '1', es decir,  $j=1, k=1$ ) y a los volúmenes de viajes previstos para el año '20' ( $y=20$ ).



**Figura 9.68.** Histogramas de frecuencias relativas del volumen total de viajes por hora en el conjunto de opciones modales, en el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' y en el año '20': a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

### 9.3.4.6. Cuotas de reparto modal general y de reparto modal no cautivo para cada opción de transporte

A continuación se examina la evolución pronosticada por el modelo, a lo largo del horizonte o período de evaluación y en cada uno de los tres escenarios, para las cuotas de reparto modal correspondientes a cada una de las opciones generales de movilidad incluidas en la modelización (transporte público, automóvil particular, moto o ciclomotor, bicicleta o vehículo de movilidad personal, y viaje a pie). En este sentido, resulta oportuno diferenciar entre cuotas de reparto modal general (es decir, contabilizadas sobre el volumen total de viajes realizados en las modalidades contempladas con independencia de que el autor del viaje deba ser considerado como un individuo cautivo de alguna opción modal o como un viajero con capacidad efectiva de elección entre cualquiera de las alternativas), y cuotas de reparto modal no cautivo (referidas únicamente al subconjunto de viajes realizados por viajeros con capacidad efectiva para elegir cualquiera de las opciones modales). Así pues, las respectivas variables objeto de análisis han de ser  $MS_{ry1jk}^{ms}$  ( $MS_{1jk}^{*m}$  en el año base) para el reparto modal general y  $MP_{ry1jk}^{ms}$  ( $MP_{1jk}^{*m}$  si se trata del año base) en el caso del reparto modal efectuado entre el grupo de viajeros no cautivos.

Por otra parte, el estudio estadístico y representación gráfica de la evolución de cada una de estas cuotas de reparto modal se sintetizan a través de los valores de los consabidos parámetros estadísticos de interés (media o valor medio, percentil 97.5 y percentil 2.5). Igualmente, se continúan tomando como ejemplos representativos de las diferencias entre períodos horarios y entre sentidos de viaje los casos relativos al período horario '1' en el sentido de viaje '1' ( $j=1, k=1$ ) y al período horario '2' con sentido de viaje '2' ( $j=2, k=2$ ).

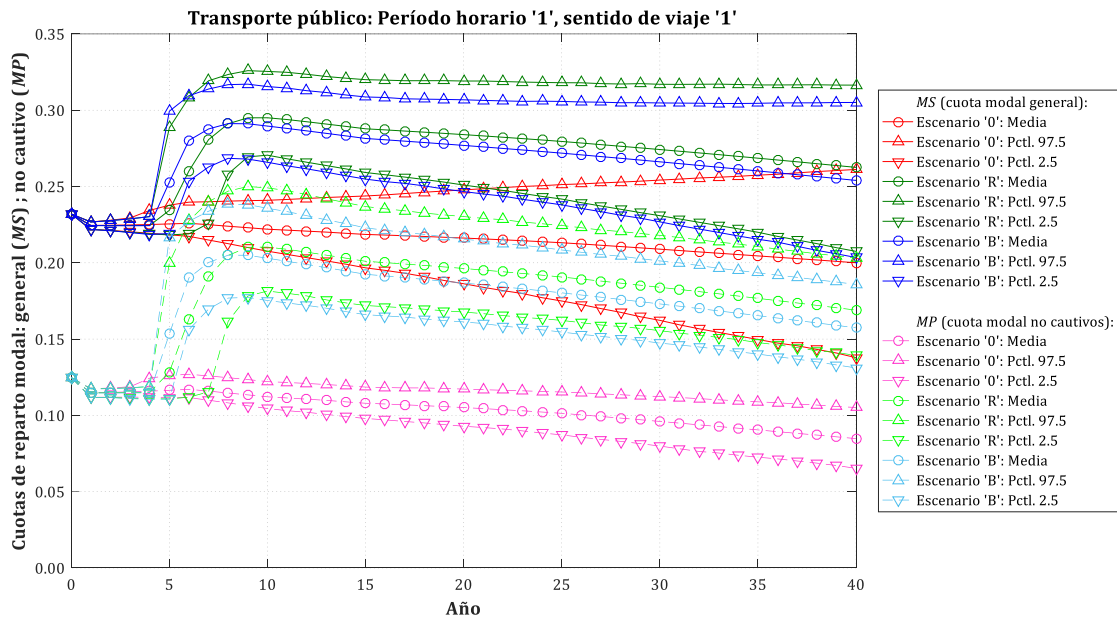
#### 9.3.4.6.a. Transporte público

Se representa en las Figuras 9.69 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.70 (caso  $j=2, k=2$ ) la evolución prevista por el modelo, entre el año base y el final del horizonte o período de evaluación, para los parámetros estadísticos de interés de las cuotas de reparto modal (general y no cautivo) correspondientes a la opción genérica de transporte público en cada uno de los distintos escenarios. Al respecto, recuérdese que los escenarios 'R' y 'B' incluyen y combinan estadísticamente (para algunos años fronterizos entre la fase de implantación y la fase de introducción del nuevo servicio) resultados que, dependiendo de la simulación aleatoria en cuestión, pueden referirse a distintos modos de transporte público.

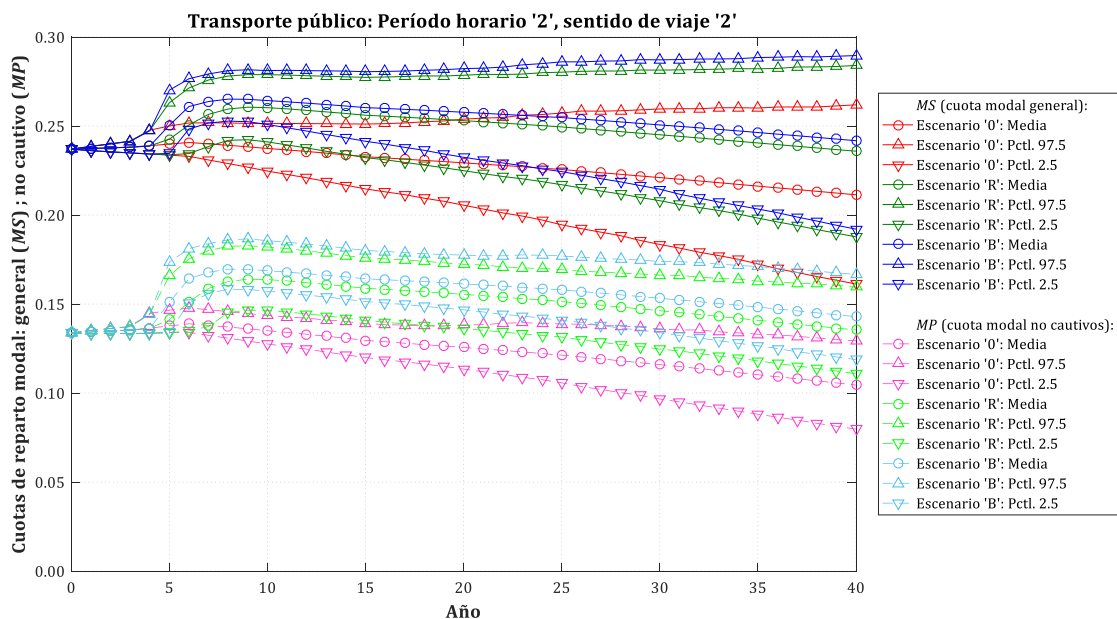
En lo que respecta al período horario '1' con sentido de viaje '1', característico de las condiciones de horas punta, la Figura 9.69 pone de relieve, como principal conclusión, la notable expansión que experimentaría la cuota de reparto modal del transporte público con la introducción de los nuevos modos con plataforma reservada y priorización semafórica (escenarios 'R' y 'B'), tanto en términos de reparto modal general como de reparto no cautivo. Frente a ellos, en el escenario '0' (servicio de transporte público mediante autobús convencional durante todo el horizonte de evaluación), los valores medios de la cuota de reparto modal general del transporte público sufrirían una tendencia bastante estable de signo levemente decreciente, pasándose del 23.2% en el año base al 20.0% al final del horizonte de evaluación. Paralelamente, sus cuotas de reparto modal no cautivo caerían, en este escenario, en valores medios, desde el 12.5% hasta el 8.5% (nótese que la elevada superioridad de las cuotas generales sobre las de reparto modal no cautivo pone de manifiesto el alto peso que los usuarios cautivos tendrían en la utilización del transporte público). Por su parte, en los escenarios alternativos 'R' y 'B', las cuotas modales del transporte público serían inicialmente, durante la fase de implantación de los nuevos modos, muy similares a las del escenario '0', al ser prestado el servicio todavía mediante autobús convencional en tráfico mixto. En cambio, al irse alcanzando en el eje temporal los años de entrada en funcionamiento de los nuevos modos de movilidad colectiva (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT), se produciría un sustancial aumento en las cuotas modales correspondientes al transporte público. Durante este aumento los valores medios de la cuota modal general del transporte público alcanzarían cotas máximas del 29.5% en el escenario 'R' y del 29.1% en el escenario 'B'. A partir de este punto se entraría en una nueva etapa —coincidiendo aproximadamente con la fase de madurez de los



nuevos servicios— en la que se observaría una ligera propensión al decrecimiento de estas cuotas. De todas formas, las cuotas modales del transporte público seguirían siendo, durante toda esta etapa (que ocupa algo más de tres cuartas partes del período de evaluación), ligeramente más elevadas para el escenario 'R' que para el escenario 'B' (y, evidentemente, ambas notablemente mayores que las del escenario 'O'). Así, los valores medios de la cuota de reparto modal general del transporte público serían, al final del horizonte de evaluación, según las previsiones del modelo, del 26.3% para el escenario 'R' y del 25.4% para el escenario 'B' (valores respectivos del 16.9% y del 15.7% para el reparto modal entre el grupo de viajeros no cautivos).



**Figura 9.69.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de la opción de transporte público en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

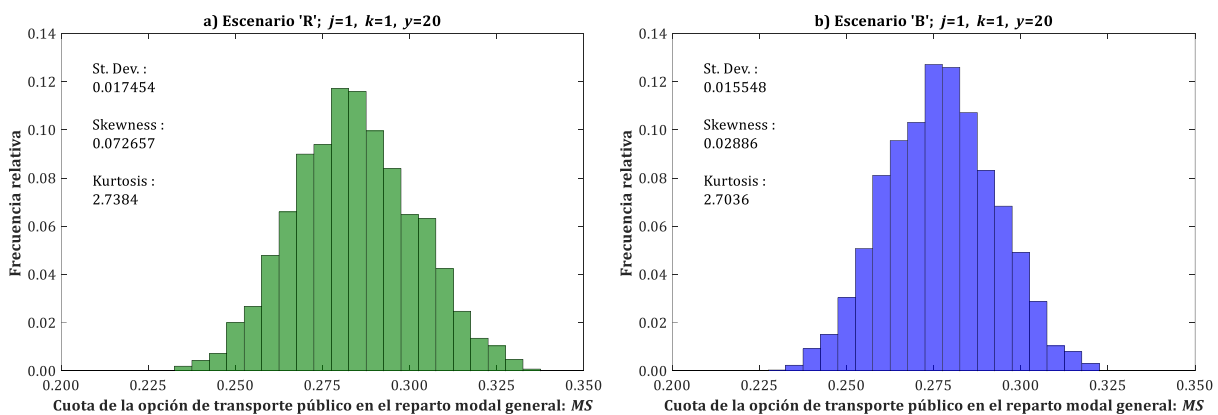


**Figura 9.70.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de la opción de transporte público en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

En cuanto al período horario ‘2’ con sentido de viaje ‘2’, representativo de las condiciones de horas valle, la Figura 9.70 muestra unas pautas de evolución de las cuotas modales del transporte público que, a grandes rasgos, presentan bastante similitud con los patrones observados en la situación característica de hora punta (caso  $j=1, k=1$ ), pero siendo ahora el incremento de dichas cuotas en los escenarios ‘R’ y ‘B’ de bastante menor magnitud que en el caso anterior. Así, los valores medios de la cuota modal general del transporte público en el escenario ‘0’ evolucionarían, en este caso, desde el 23.7% en el año base hasta el 21.1% al final del horizonte de evaluación (tendencia global suavemente decreciente, con la posible salvedad de un pequeño grupo de años al inicio del período de evaluación). Sus cuotas de reparto modal no cautivo seguirían una evolución relativamente paralela, con valores medios que pasarían del 13.4% inicial al 10.5% final. Por otra parte, los escenarios ‘R’ y ‘B’, tras una primera etapa de implantación durante la cual las cuotas modales del transporte público son prácticamente idénticas a las del escenario ‘0’, experimentarían una fase de captación —con una duración en torno a cuatro años— que culminaría con unas cotas máximas de la cuota de reparto modal general del transporte público que, en valores medios, alcanzarían el 26.5% en el escenario ‘B’ y el 26.1% en el escenario ‘R’. Nótese que la situación relativa entre estos dos escenarios se invierte con respecto a las condiciones típicas de horas punta, siendo ahora el escenario ‘B’ el que proporcionaría unas cuotas modales ligeramente mayores que las del escenario ‘R’. Desde el final de esa etapa de captación modal en adelante, la pauta dominante es de leve decrecimiento, conduciendo, al final del horizonte de evaluación, a valores medios de la cuota de reparto modal general del transporte público del 24.2% en el escenario ‘B’ y del 23.6% en el escenario ‘R’ (14.3% y 13.5% respectivamente en el caso de las cuotas de reparto modal no cautivo).

A nivel general, obsérvese que el grado de incertidumbre que afecta a las cuotas de reparto modal general es mayor que el obtenido para las cuotas de reparto modal no cautivo, pues a la incertidumbre propia de estas últimas (que procede a su vez de la incerteza sobre las variaciones de coste generalizado de las distintas opciones modales y sobre los parámetros del modelo de reparto) hay que añadirle la incertidumbre relativa a las fracciones o proporciones de viajes realizados por usuarios cautivos de cada modo de transporte. Esta observación es extensible además a las cuotas de cualquiera de las opciones modales.

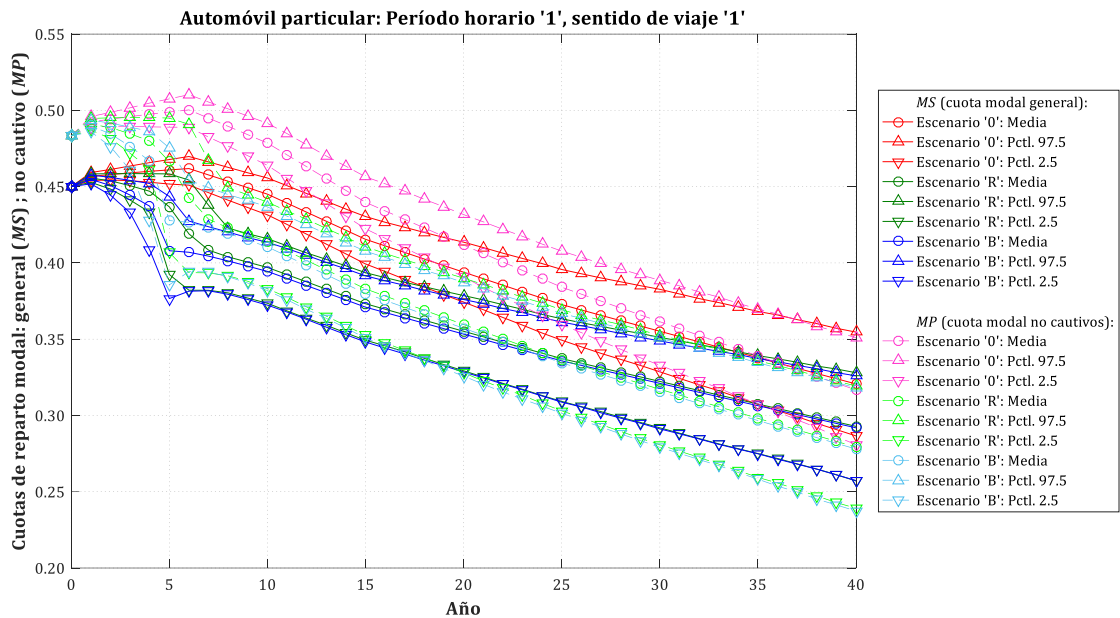
De forma complementaria, la Figura 9.71 incluye histogramas de frecuencias relativas para la cuota de la opción de transporte público en el reparto modal general, tanto para el caso del escenario ‘R’ (implantación de metro ligero o tranvía) como para el escenario ‘B’ (implantación de BHLS o BRT). Estos histogramas están particularizados para el año ‘20’ del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ), así como para las condiciones propias del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ ( $j=1, k=1$ ; condiciones representativas de hora punta).



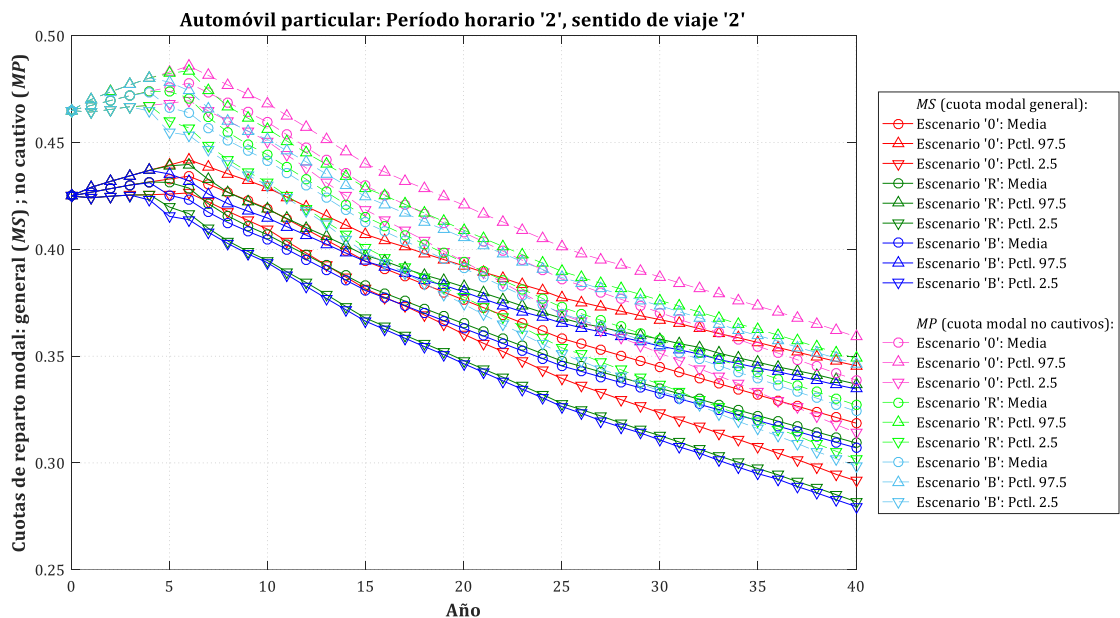
**Figura 9.71.** Histogramas de frecuencias relativas de la cuota de la opción de transporte público en el reparto modal general, en el caso del período horario ‘1’ con sentido de viaje ‘1’ y en el año ‘20’: a) Escenario ‘R’; b) Escenario ‘B’.

### 9.3.4.6.b. Automóvil particular

Se expone gráficamente en las Figuras 9.72 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.73 (caso  $j=2, k=2$ ) la evolución pronosticada por el modelo —a lo largo del horizonte o período de evaluación y en los distintos escenarios— para los parámetros estadísticos de interés de las cuotas modales atribuidas al automóvil particular, tanto en el reparto modal general como en el que afectaría solo a viajeros no cautivos.



**Figura 9.72.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas del automóvil particular en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.73.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas del automóvil particular en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

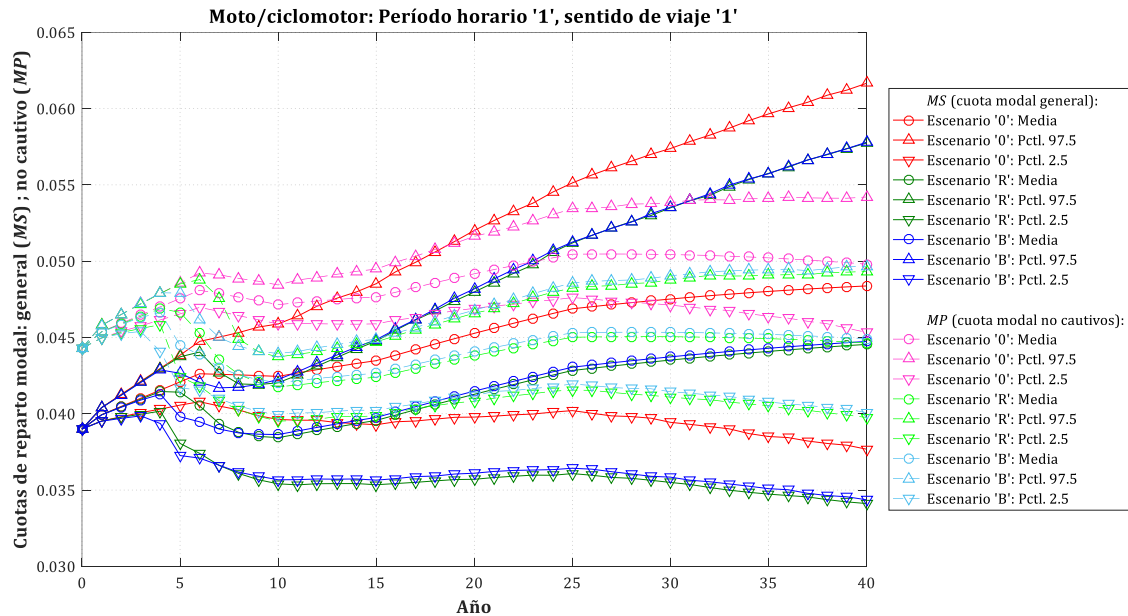
En relación con el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', representativo de las condiciones de horas punta, la conclusión general más destacada que puede extraerse de la Figura 9.72 es que los

escenarios 'R' y 'B' son más propensos a reducir la cuota modal de los viajes en automóvil particular que el escenario 'O', tanto en lo relativo al reparto modal general como en el reparto modal entre el grupo de viajeros no cautivos. Además, en la comparación entre los escenarios 'R' y 'B' se observa que sus resultados en esta materia son muy similares, especialmente una vez que termina la fase de introducción de los nuevos modos de transporte público. De forma general, predomina una tendencia marcadamente decreciente en la cuota modal de los viajes en automóvil particular, la cual está sensiblemente condicionada por los datos introducidos al respecto en el apartado de evolución futura de otros costes modales aplicados al viaje en automóvil particular de forma exógena al modelo (especialmente del año '11' en adelante). Por otra parte, obsérvese que en este caso las cuotas de reparto modal no cautivo correspondientes al automóvil son algo mayores que las de reparto modal general, aunque hacia el final del horizonte o período de evaluación tienden a igualarse unas y otras (lo cual indicaría que la tendencia decreciente en la cuota modal del automóvil particular se debe, en mayor medida, a una pérdida de atractivo de dicha opción entre los viajeros con capacidad efectiva de elección que a una disminución de la proporción de usuarios cautivos del automóvil, si bien es cierto que ambos factores contribuyen a dicha tendencia decreciente). Entrando más en detalle, el escenario 'O' comienza con una pequeña etapa inicial en la que las cuotas modales del automóvil tienden a ser ligeramente crecientes, pasándose, en valores medios, del 45.0% (año base) al 46.2% (año '6') en el caso del reparto modal general, y del 48.3% al 50.0% en el reparto modal no cautivo. A partir de entonces las cuotas modales del automóvil en el escenario 'O' entran en una etapa claramente descendente, que llevaría, al final del horizonte de evaluación, a valores medios del 32.1% en el reparto modal general y del 31.7% en el reparto modal no cautivo. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' arrancan con una pequeña etapa inicial (aproximadamente hasta el año '4') en la que las cuotas modales del automóvil experimentan un moderado descenso, claramente relacionado con la progresiva reducción de capacidad viaria para tráfico mixto aplicada en estos escenarios durante la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público. Este decrecimiento de las cuotas modales del automóvil particular se acelera puntualmente con la puesta en servicio de los nuevos modos de transporte público (gracias a la potencialidad para el cambio modal que estos llevan asociada), para a continuación entrar en una etapa de descenso moderado pero continuo, que se extendería a lo largo de toda la fase de madurez de los nuevos servicios de transporte público. Durante esta prolongada etapa las cuotas modales del automóvil particular serían prácticamente coincidentes en los escenarios 'R' y 'B', alcanzándose al final del horizonte de evaluación valores medios del 29.3% para el escenario 'R' y del 29.2% para el escenario 'B' en el caso del reparto modal general (27.9% y 27.8% respectivamente en el reparto modal no cautivo).

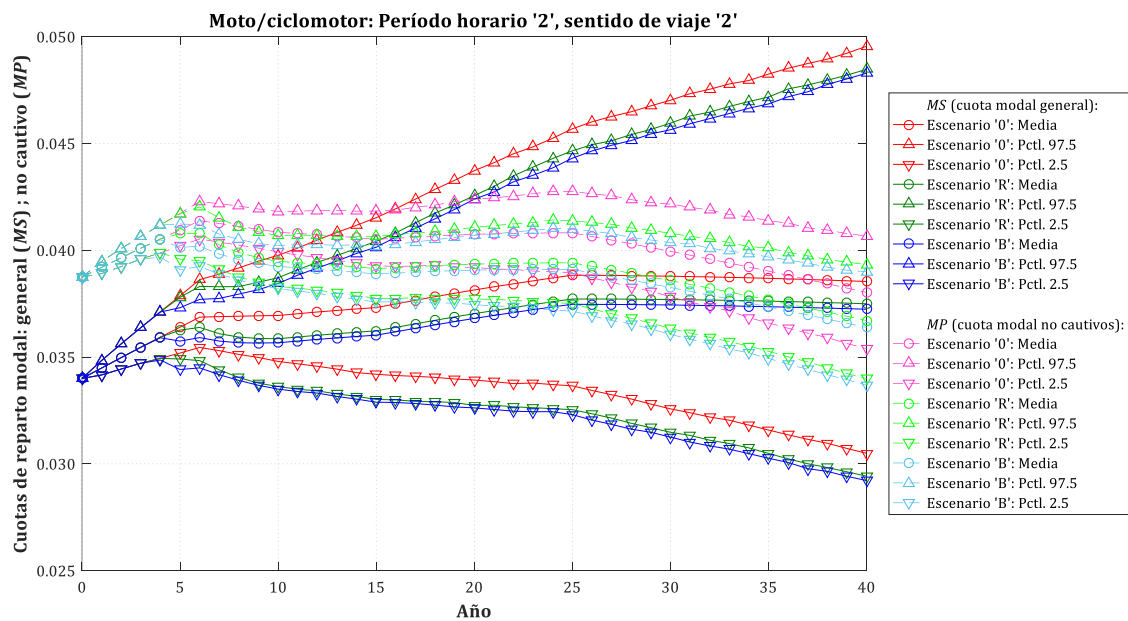
En lo que respecta al período horario '2' con sentido de viaje '2', característico de las condiciones de horas valle, la Figura 9.73 muestra una panorámica general en la que predominan las similitudes con el caso descrito para el período horario '1' y sentido de viaje '1', pero cabe destacar que las diferencias entre los escenarios 'R' y 'B' y el escenario 'O' en las cuotas modales del automóvil particular son ahora menores. Otra diferencia con el caso anterior se observa en la etapa inicial de los escenarios 'R' y 'B' (fase de implantación), donde ahora predomina una tendencia moderadamente creciente, siendo los valores de las cuotas modales prácticamente coincidentes con los del escenario 'O'. Partiendo de una cuota modal general para el automóvil particular del 42.5% en el año base, se alcanzarían durante esta etapa de crecimiento cotas máximas de los valores medios del 43.4% en el escenario 'O' (año '6'), del 43.2% en el escenario 'R' (año '4') y del 43.1% en el escenario 'B' (año '4'), mientras que en el reparto modal no cautivo se pasaría del 46.5% inicial al 47.8% en el escenario 'O' y al 47.4% en los escenarios 'R' y 'B'. A partir de entonces se entra en una etapa marcadamente decreciente, en la que la prestación del servicio de transporte público mediante metro ligero o tranvía, o mediante BHLS/BRT, permite que las cuotas modales del automóvil particular en los escenarios 'R' y 'B' sean menores que en el escenario 'O' (si bien es cierto que en este caso con una diferencia bastante exigua). Mientras, entre los escenarios 'R' y 'B' las diferencias son prácticamente irrelevantes (cuotas del automóvil particular ligerísimamente mayores en el escenario 'R'). Así, al final del horizonte de evaluación se llegaría a valores medios del 31.9% en el escenario 'O', del 30.9% en el escenario 'R' y del 30.7% en el escenario 'B' en el caso del reparto modal general (33.9%, 32.7% y 32.4% respectivamente en el reparto modal no cautivo).

### 9.3.4.6.c. Moto o ciclomotor

En relación con la opción modal de vehículo motorizado de dos ruedas, las Figuras 9.74 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.75 (caso  $j=2, k=2$ ) presentan la evolución prevista por el modelo en los distintos escenarios para los parámetros estadísticos de interés de las cuotas modales referidas a motos y ciclomotores, contemplando tanto el reparto modal general como el reparto modal limitado a viajeros no cautivos a lo largo del horizonte o período de evaluación.



**Figura 9.74.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.



**Figura 9.75.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

Para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1', característico de las condiciones de horas punta, la Figura 9.74 pone de manifiesto que, a partir de la puesta en servicio de los nuevos sistemas de transporte público, las cuotas modales de motos y ciclomotores serían algo más reducidas en los escenarios 'R' y 'B' que en el escenario '0'. Asimismo, dichas cuotas modales serían, durante la gran mayoría del horizonte o período de evaluación, prácticamente iguales en los escenarios 'R' y 'B'. En general, para las cuotas modales de motos y ciclomotores se observa en la Figura 9.74 una tendencia global mayoritariamente creciente, aunque bastante moderada en su intensidad y con algunas fases notablemente diferentes a lo largo del período de evaluación. Además, las cuotas modales de motos y ciclomotores son inicialmente un poco mayores en el reparto modal no cautivo que en el reparto modal general, aunque con el tiempo tenderían a igualarse (excepto para el caso de los percentiles más bajos) o incluso a invertir dicha situación (para los percentiles más altos). Esta tendencia revela que el crecimiento general de las cuotas modales de motos y ciclomotores reflejado por el modelo estaría algo más relacionado con un pequeño incremento de los usuarios cautivos de este modo de transporte que con una sensible ganancia de atractivo entre el grupo de viajeros no cautivos. En un estudio más detallado, el escenario '0' comenzaría con una primera etapa (aproximadamente hasta el año '6') de crecimiento de las cuotas modales de moto y ciclomotor, en la que sus valores medios pasarían del 3.90% al 4.26% en el caso del reparto modal general y del 4.43% al 4.81% en el reparto modal no cautivo. A continuación se entraría en una pequeña etapa de cierto estancamiento de los valores medios (aproximadamente hasta el año '10'), y tras ella se llegaría finalmente, en el escenario '0', a una extensa fase de predominio de la tendencia creciente (más clara en el reparto modal general que en el no cautivo), aunque en todo caso a ritmos muy moderados. De esta forma, se alcanzarían, en el escenario '0' al final del horizonte de evaluación, valores medios de la cuota de motos y ciclomotores del 4.84% en el reparto modal general y del 4.98% en el reparto modal no cautivo. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' presentarían cuotas modales de motos/ciclomotores prácticamente idénticas a las del escenario '0' durante una pequeña etapa inicial (3-4 años), asimilable a grandes rasgos a la fase de implantación de los nuevos sistemas de transporte público. Con la entrada en servicio de estos nuevos modos de transporte público se observaría, en cambio, un sensible descenso en las cuotas de motos y ciclomotores, llegándose a cotas mínimas de los valores medios del 3.84% en el escenario 'R' y del 3.86% en el escenario 'B', en lo que al reparto modal general se refiere (4.18% y 4.20% respectivamente en el reparto modal no cautivo). A partir de aproximadamente el año '10', habría de nuevo un predominio de las tendencias crecientes en las cuotas modales de motos y ciclomotores, estando dicha tendencia más marcada antes del año '25' que después del mismo. Así, al final del horizonte de evaluación se llegaría a valores medios de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general del 4.45% en el escenario 'R' y del 4.47% en el escenario 'B' (4.46% y 4.49% respectivamente en el reparto modal no cautivo).

En cuanto al período horario '2' con sentido de viaje '2', representativo de las condiciones de horas valle, se aprecia en la Figura 9.75 que las pautas de comportamiento y evolución de las cuotas modales de motos y ciclomotores no son en general muy diferentes de las ya descritas para el período horario '1' con sentido de viaje '1', aunque con menores diferencias entre los escenarios 'R' y 'B' y el escenario '0' y con valores inferiores de las cuotas con respecto al caso anterior. De todos modos, los escenarios 'R' y 'B' siguen proporcionando cuotas algo más reducidas que el escenario '0' para la opción modal de motos y ciclomotores, siendo las diferencias entre los dos escenarios alternativos ('R' y 'B') prácticamente irrelevantes. Se percibe un cierto dominio de las tendencias de signo creciente en lo que a las cuotas del reparto modal general se refiere, pero no se observa esa misma tendencia (sino más bien al contrario) en las cuotas del reparto modal no cautivo, lo que sugiere que el crecimiento de las cuotas de motos y ciclomotores en el reparto modal general se debería principalmente —según los datos introducidos al modelo— a pequeños aumentos de la proporción de viajeros cautivos de este modo de transporte. Más detalladamente, el escenario '0' presenta una etapa inicial (hasta el año '6' aproximadamente) en la que el crecimiento relativo de las cuotas modales de motos y ciclomotores es claramente perceptible (aunque en realidad de magnitud ciertamente limitada), pasando los valores medios del 3.40% al 3.69% en el reparto modal general, y del 3.88% al 4.14% en el reparto modal no cautivo. Tras esta etapa inicial

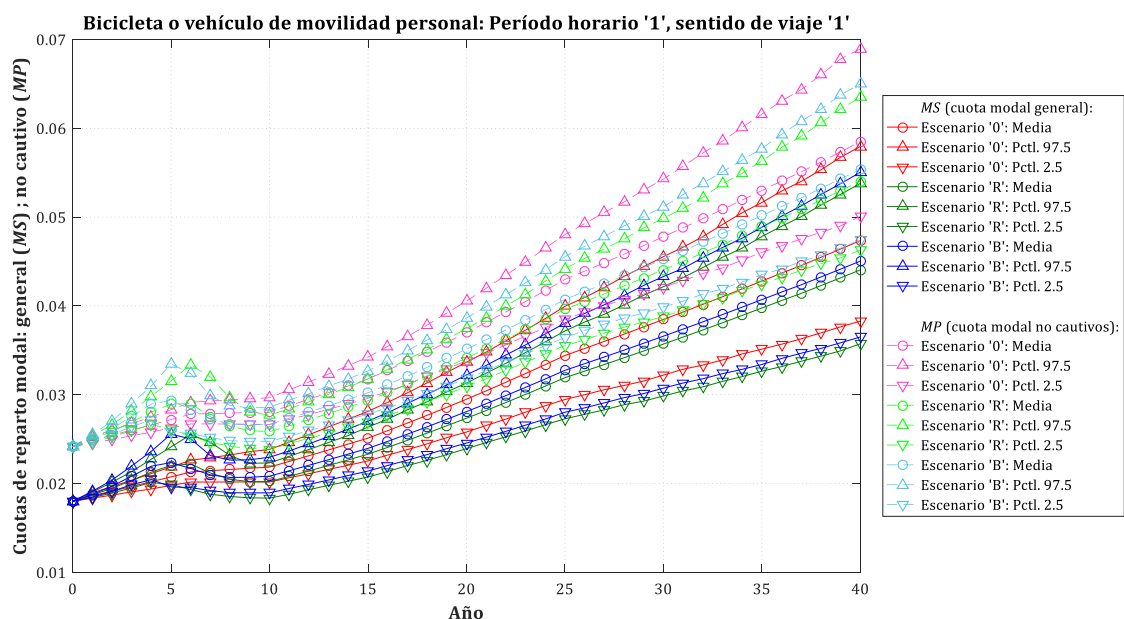


se entraría en una fase en la que las cuotas modales de motos y ciclomotores tenderían a mantenerse más estables, apreciándose a grandes rasgos una ligera propensión al crecimiento en el caso del reparto modal general y una leve tendencia decreciente en el reparto modal no cautivo. Al final del horizonte de evaluación se llegaría así, en el escenario '0', a cuotas de viajes en moto o ciclomotor que presentarían valores medios del 3.85% en el caso del reparto modal general y del 3.80% en el reparto modal no cautivo. Por otra parte, los escenarios 'R' y 'B' muestran un comportamiento idéntico al del escenario '0' durante una pequeña etapa inicial de unos cuatro años de duración, con un crecimiento relativo de las cuotas modales de motos y ciclomotores. En ese momento, la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público neutraliza esa tendencia creciente (que en el escenario '0' se prolongaba hasta el año '6'), entrándose a partir de los años '8' o '9' en una etapa en la que la evolución de las cuotas modales de motos y ciclomotores sigue un comportamiento prácticamente paralelo al del escenario '0'. Esto conduce, al final del horizonte de evaluación, a unas cuotas del reparto modal general con valores medios para motos y ciclomotores del 3.75% en el escenario 'R' y del 3.72% en el escenario 'B' (3.67% y 3.64% respectivamente en el reparto modal no cautivo).

En cualquier caso y como observación general, nótese que los cambios observados en las cuotas modales de motos y ciclomotores son solo relevantes a una escala de detalle.

#### 9.3.4.6.d. Bicicleta o vehículo de movilidad personal

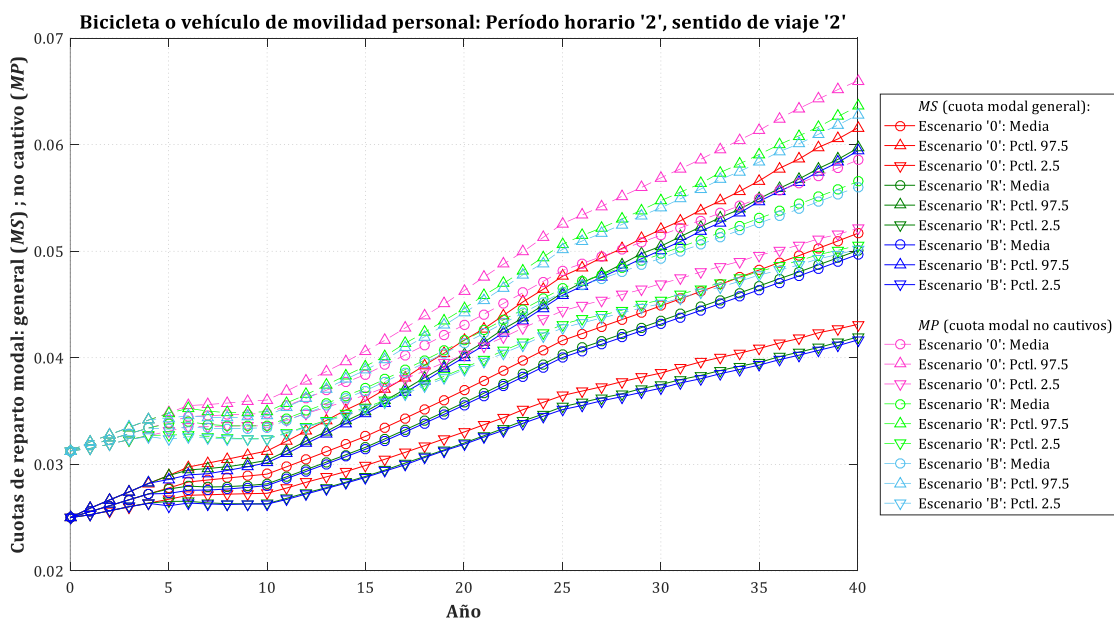
En relación con las modalidades de transporte no motorizado y de 'micromovilidad', se representa en las Figuras 9.76 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.77 (caso  $j=2, k=2$ ) la evolución estimada por el modelo, entre el año base y el final del horizonte o período de evaluación, para los parámetros estadísticos de interés de las cuotas de reparto modal (general y no cautivo) correspondientes, en cada escenario, a los viajes realizados en bicicleta o vehículo de movilidad personal.



**Figura 9.76.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

En lo que respecta al período horario '1' con sentido de viaje '1', la Figura 9.76 muestra principalmente una clara tendencia general de crecimiento en las cuotas modales de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal. Desde el punto de vista de la capacidad de análisis del modelo, esta tendencia creciente se relaciona estrechamente con los datos que en este sentido han sido introducidos al modelo en el apartado de evolución futura de otros costes modales aplicados a los viajes en bicicleta o vehículo

de movilidad personal (de modo exógeno). Por otra parte, se observa que las cuotas modales de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal resultantes de la ejecución del modelo serían ligeramente inferiores, durante la mayor parte del período de evaluación, para los escenarios 'R' y 'B' que para el escenario 'O'. Este resultado, aunque probablemente indeseado, es consistente con la clase de modelo de reparto modal empleado (de características comunes a un logit multinomial simple en lo que a la propiedad de independencia de alternativas irrelevantes se refiere), y con las limitaciones del mismo, de forma que los patrones de sustitución entre alternativas no son capaces de tener en cuenta la posible existencia de alternativas más afines entre sí unas que otras (es decir, alternativas con distintos grados de correlación). Por consiguiente, según las propiedades del modelo, el incremento de las cuotas modales del transporte público que se produce en los escenarios 'R' y 'B' con la introducción de los sistemas de metro ligero o tranvía o de BHLS/BRT tiene que proceder proporcionalmente por igual del resto de opciones modales, restando algunos usuarios también a la bicicleta o vehículo de movilidad personal. A nivel de detalle, el escenario 'O' estaría dominado por una tendencia creciente bastante continua (salvo quizás entre los años '6' y '10'), en la que los valores medios de la cuota de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal evolucionarían desde el 1.80% (año base) hasta el 4.74% (final del horizonte de evaluación) en el reparto modal general, y desde el 2.42% al 5.85% en el caso del reparto modal no cautivo. Por su parte, en los escenarios 'R' y 'B' se observa una etapa inicial (hasta aproximadamente el año '5') en la que el crecimiento de las cuotas modales de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal es algo más acelerado que en el escenario 'O'. A continuación, con la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público, se aprecia, sin embargo, una pequeña caída de las cuotas modales asignadas a la bicicleta o vehículo de movilidad personal (nótese la incidencia de la limitación metodológica anteriormente comentada). Se retoma la tendencia creciente en torno a los años '9' o '10', y se alcanzan al final del horizonte de evaluación valores medios de las cuotas modales de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal del 4.41% en el escenario 'R' y del 4.50% en el escenario 'B' si se analiza el reparto modal general, o bien del 5.40% (escenario 'R') y 5.54% (escenario 'B') en el caso del reparto modal no cautivo.



**Figura 9.77.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

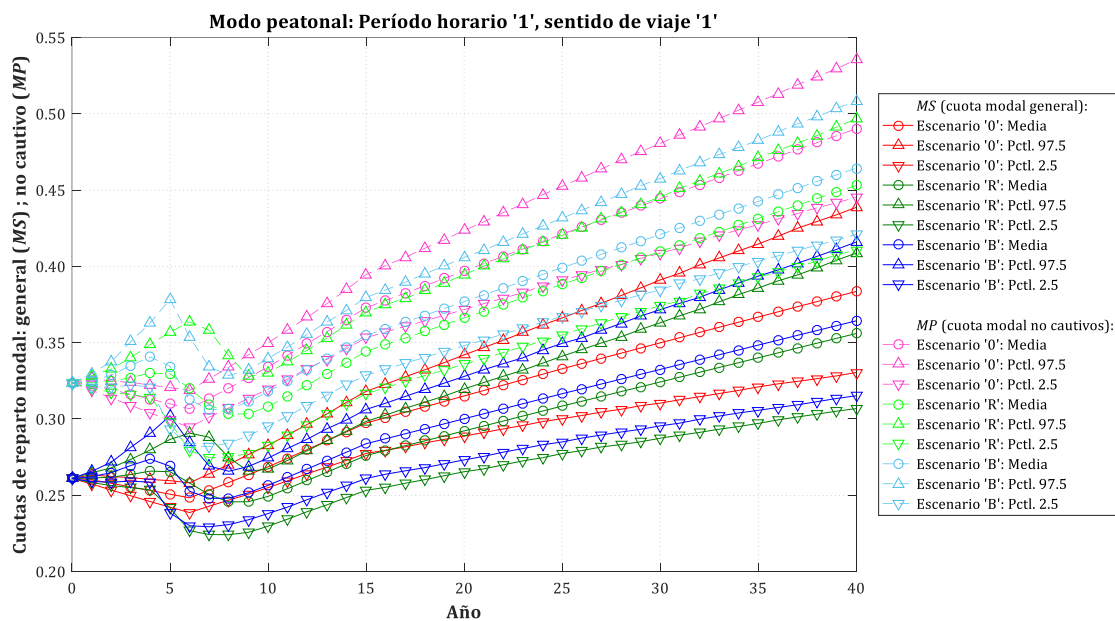
En el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2', la Figura 9.77 refleja una panorámica global sustancialmente similar a la observada en la Figura 9.76 (caso  $j=1, k=1$ ), aunque con unas tendencias generales de crecimiento de las cuotas modales de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal



ligeramente más moderadas que en el caso anterior, y sin que se aprecie en los escenarios 'R' y 'B' una etapa de decrecimiento de dichas cuotas con la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público. Además, las cuotas modales de la bicicleta o vehículo de movilidad personal son, en este caso, ligeramente superiores a las del período horario '1' con sentido de viaje '1'. Desde un punto de vista cuantitativo, cabe señalar que, en el escenario '0', el valor medio de las cuotas de viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal evolucionaría, en lo concerniente al reparto modal general, desde el 2.50% en el año base hasta el 5.17% del último año del horizonte o período de evaluación, mientras que en el reparto modal no cautivo dicha evolución sería desde el 3.13% hasta el 5.85%. En el escenario 'R', partiendo obviamente de la misma situación inicial, se alcanzaría, al final del horizonte de evaluación, un valor medio de las cuotas modales de la bicicleta o vehículo de movilidad personal del 5.01% en el caso del reparto modal general, y del 5.65% en el reparto modal no cautivo. Por su parte, los valores obtenidos en el escenario 'B' resultarían prácticamente idénticos a los del 'R' (en concreto, valores medios finales del 4.97% en el reparto modal general y del 5.60% en el reparto modal no cautivo).

### 9.3.4.6.e. Modo peatonal

Continuando con el análisis de las cuotas modales pertenecientes a las opciones de transporte no motorizado y de 'micromovilidad', se presenta ahora, en las Figuras 9.78 (caso  $j=1, k=1$ ) y 9.79 (caso  $j=2, k=2$ ), la evolución estimada por el modelo en los distintos escenarios para los parámetros estadísticos de interés de las cuotas modales de viajes a pie, examinando a lo largo del horizonte o período de evaluación tanto el reparto modal general como el reparto modal entre el subconjunto de viajeros no cautivos.



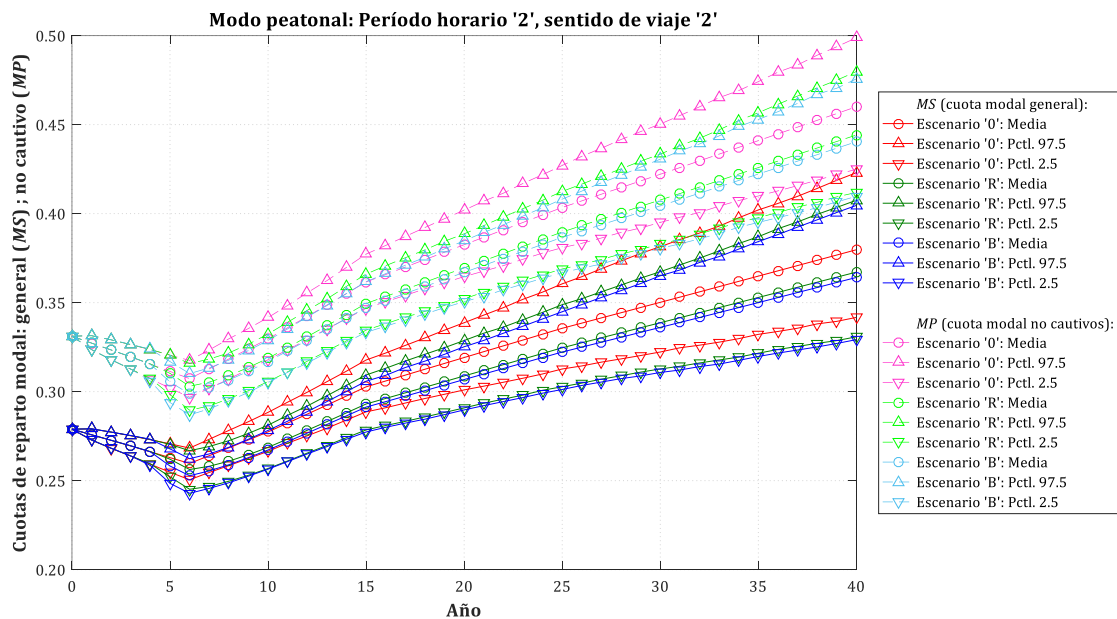
**Figura 9.78.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes a pie en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1'.

En referencia al período horario '1' con sentido de viaje '1', la Figura 9.78 refleja, a escala general del horizonte o período de evaluación, una apreciable tendencia global de crecimiento en las cuotas modales de viajes a pie, afectando este crecimiento general a los tres escenarios planteados. No obstante, a un nivel más detallado es posible distinguir etapas con comportamientos notablemente diferentes, especialmente en el caso de los escenarios 'R' y 'B', como se describirá posteriormente. Tanto la tendencia general como las tendencias parciales por etapas están sensiblemente condicionadas por los datos que al respecto han sido introducidos al modelo en el apartado de evolución futura de otros

costes modales aplicados a los viajes peatonales (costes exógenos con respecto a las capacidades de análisis interno del modelo), aunque también existen otros factores que afectan particularmente a los escenarios 'R' y 'B'. Por otro lado, se percibe en la Figura 9.78 que las cuotas modales de viajes a pie previstas por el modelo resultarían menores para los escenarios 'R' y 'B' que para el escenario '0' durante la gran mayoría del período de evaluación (se exceptúa la etapa inicial previa a la consolidación y madurez de los nuevos servicios de transporte público). Al igual que en el caso de los viajes en bicicleta o vehículo de movilidad personal, se debe señalar que este resultado es coherente con las limitaciones del tipo de modelo de reparto modal utilizado, al estar sujeto este a la propiedad de independencia de alternativas irrelevantes, con lo cual los patrones de sustitución entre alternativas son insensibles a la posible existencia en realidad de opciones más correlacionadas entre sí unas que otras. Esto se traduce en que el aumento de las cuotas modales del transporte público producido en los escenarios 'R' y 'B' con la entrada en servicio de los sistemas de metro ligero o tranvía o de BHLS/BRT ha de proceder —según las propiedades del modelo— proporcionalmente por igual del resto de alternativas modales, afectando negativamente a la cuota modal de viajes a pie. Entrando en detalles cuantitativos, el escenario '0' comenzaría con una etapa inicial (hasta el año '6') de tendencia ligeramente decreciente (relacionada con los datos introducidos en la evolución futura de otros costes modales aplicados a los viajes peatonales), de tal forma que durante esta primera etapa los valores medios de la cuota de viajes a pie evolucionarían del 26.1% (año base) al 24.8% (año '6') en el caso del reparto modal general (del 32.3% al 30.7% en el reparto modal no cautivo). En el año séptimo se da paso a una etapa de crecimiento continuado de las cuotas modales de viajes a pie, que conduciría al final del horizonte de evaluación a valores medios del 38.4% en el reparto modal general, y del 49.0% en el reparto modal no cautivo. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' arrancan, sin embargo, con una breve etapa en la que se observaría un predominio de la tendencia creciente en las cuotas modales de viajes a pie, y que coincidiría con la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público. Durante esta fase se producen, en los escenarios 'R' y 'B', pequeñas caídas de las cuotas modales de viajes en transporte público y, sobre todo, en automóvil particular, que han de ser parcialmente asumidas por el modo peatonal. Así, los valores medios de la cuota de viajes a pie en el reparto modal general alcanzarían máximos relativos, en esta etapa, del 26.6% en el escenario 'R' y del 27.4% en el escenario 'B' (en ambos casos en el año '4'), mientras que en el reparto modal no cautivo dichos máximos relativos serían del 33.0% en el escenario 'R' y del 34.1% en el 'B'. A continuación se apreciaría, en los escenarios 'R' y 'B', una etapa (también de duración relativamente corta) marcada por la sensible disminución de las cuotas modales de viajes a pie (especialmente en el reparto no cautivo), la cual está ligada a la entrada en servicio de los nuevos sistemas de transporte público (con la consiguiente ganancia de cuota modal de estos últimos). Los valores medios de las cuotas de viajes a pie registrarían así mínimos relativos del 24.6% en el escenario 'R' (año '8') y del 24.8% en el escenario 'B' (año '7') si se analiza el reparto modal general, y del 30.3% y 30.6%, respectivamente, en el caso del reparto modal no cautivo. A partir de aproximadamente los años '9' o '10' se recupera la tendencia claramente creciente, observándose en adelante un comportamiento de las cuotas de viajes a pie relativamente paralelo al del escenario '0'. El horizonte de evaluación culminaría, de esta forma, con valores medios de las cuotas de viajes a pie con respecto al reparto modal general del 35.6% en el escenario 'R' y del 36.4% en el escenario 'B' (45.3% y 46.4%, respectivamente, en el caso del reparto modal no cautivo). Obsérvese que, durante toda esta etapa, las cuotas modales de viajes a pie previstas por el modelo son ligeramente más altas en el escenario 'B' que en el escenario 'R'.

Por lo que respecta al período horario '2' con sentido de viaje '2', la Figura 9.79 presenta una situación que analizada globalmente muestra cierta similitud con la relatada para el caso del período horario '1' con sentido de viaje '1' (Figura 9.78), concentrándose las principales diferencias en el primer cuarto del horizonte o período de evaluación. Otras disimilitudes con el caso anterior consisten en que ahora se aminoran las diferencias entre el escenario de referencia o escenario '0' y los escenarios alternativos 'R' y 'B', y que entre estos dos últimos es en este caso el escenario 'R' el que proporcionaría, según el modelo, cuotas modales de viajes a pie ligerísimamente mayores (aunque en ambos casos aún inferiores a las del escenario '0'). Más en detalle, el escenario '0' presenta una primera etapa (hasta el año '6') con

una tendencia claramente decreciente en las cuotas modales de viajes a pie, vinculada de nuevo a los datos introducidos en relación con la evolución futura de otros costes modales aplicados a los viajes peatonales. En esta etapa inicial los valores medios de las cuotas de viajes a pie descenderían, en el escenario '0', desde el 27.9% (año base) hasta el 26.0% (año '6') en lo concerniente al reparto modal general, mientras que en el reparto modal no cautivo dicha caída sería desde el 33.1% al 30.7%. En el año séptimo arrancarían, en cambio, una etapa de continuo crecimiento de las cuotas modales de viajes a pie, que llevaría al final del horizonte de evaluación a valores medios del 38.0% en el caso del reparto modal general, y del 46.0% en el reparto modal no cautivo. Por otra parte, los escenarios 'R' y 'B' comienzan también con una etapa de disminución de las cuotas modales de viajes a pie, siendo estas inicialmente coincidentes con la del escenario '0' hasta que el decrecimiento se intensifica ligeramente hacia el final de esta primera etapa, en conexión con la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público. Los valores medios de las cuotas de viajes a pie alcanzarían, de esta forma, en el año '6', picos mínimos del 25.6% en el escenario 'R' y del 25.3% en el escenario 'B' en lo que al reparto modal general se refiere, y del 30.3% y 29.9% respectivamente en el caso del reparto modal no cautivo. A partir de ese punto se inicia la etapa de crecimiento continuado, si bien este crecimiento resulta, durante unos pocos años al comienzo de esta nueva etapa, ligeramente más atenuado que en el escenario '0'. Continuando con esta etapa de crecimiento —y ya con una evolución prácticamente paralela a la del escenario '0'— se llegaría, al final del horizonte de evaluación, a valores medios de las cuotas de viajes a pie en el reparto modal general del 36.7% para el escenario 'R' y del 36.4% para el escenario 'B', o bien del 44.4% y 44.0% respectivamente si se atiende al reparto modal no cautivo.



**Figura 9.79.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de las cuotas de viajes a pie en el reparto modal general y en el reparto modal no cautivo, para el caso del período horario '2' con sentido de viaje '2'.

### 9.3.5. Resultados relacionados con la explotación del transporte público

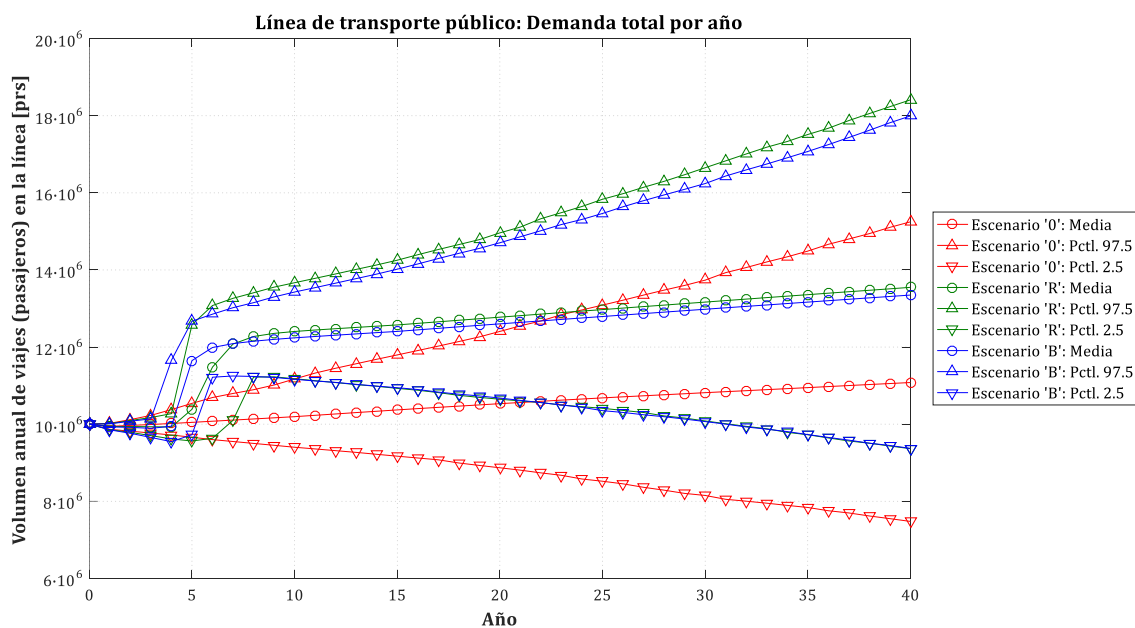
#### 9.3.5.1. Volumen anual de viajes en la línea de transporte público

Como primer aspecto concerniente a los resultados proporcionados por el modelo en relación con la explotación del transporte público, se analizan a continuación, para cada escenario, los volúmenes anuales de viajes (es decir, el número de pasajeros por año) previstos en la línea de transporte público objeto de estudio, agregando o totalizando todos los períodos horarios contemplados (seis en este caso)

y los dos posibles sentidos de viaje. Se trata por tanto de un resultado que, entre otros muchos aspectos, afectaría muy notablemente a los potenciales ingresos del operador.

Para configurar la variable de análisis, es necesario sumar, a lo largo de los diferentes períodos horarios ( $j=1,2,\dots,6$ ) y sentidos de viaje ( $k=1,2$ ), los productos del volumen de viajes por hora en el modo de transporte público disponible en cada situación (variable  $q_{ry1jk}^{ms}$  con  $m \in \{0,R,B\}$ , o  $q_{1jk}^{*0}$  en el año base) por el número de horas anuales asignadas a cada período horario de operación (variable  $NH_{1j}$ ), de forma que tal procedimiento puede sintetizarse como  $\sum_{j,k} q_{ry1jk}^{ms} \cdot NH_{1j}$  (o  $\sum_{j,k} q_{1jk}^{*0} \cdot NH_{1j}$  en el año base). En cualquier caso, recuérdese que en esta cuestión los escenarios 'R' y 'B' incorporan, según el año del horizonte o período de evaluación, resultados pertenecientes a diferentes modos de transporte público: autobús convencional durante los años iniciales de implantación del nuevo sistema; tranvía o metro ligero y BHLS/BRT (respectivamente) una vez que estos han sido ya implantados y puestos en servicio (mayor parte del período de evaluación); o incluso una agregación estadística de uno u otro –según cada simulación aleatoria– en la etapa de virtual transición (es decir, en los años comprendidos entre la más temprana posible y la más tardía posible entrada en servicio del nuevo sistema de transporte público).

Así pues, en la Figura 9.80 se representan gráficamente los resultados obtenidos, de acuerdo al modelo, para los volúmenes anuales de viajes en la línea de transporte público previstos en cada escenario, mostrándose la posible evolución desde el año base de partida hasta el final del horizonte o período de evaluación. En consonancia con el criterio habitualmente seguido a lo largo de este capítulo, se toman como parámetros estadísticos de interés para el análisis simplificado de la distribución de resultados la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo).



**Figura 9.80.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del volumen anual de viajes (pasajeros) en la línea de transporte público.

La Figura 9.80 pone de relieve, como principal conclusión, el significativo aumento que la entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público dotados de plataforma reservada y priorización semafórica generaría en el volumen anual de pasajeros de la línea. Como referencia comparativa, puede apreciarse que, en el escenario '0' (es decir, prolongando durante todo el horizonte de evaluación la prestación del servicio mediante autobús convencional en tráfico mixto), los valores medios del volumen anual de viajes en la línea de transporte público exhibirían una tendencia creciente, aunque

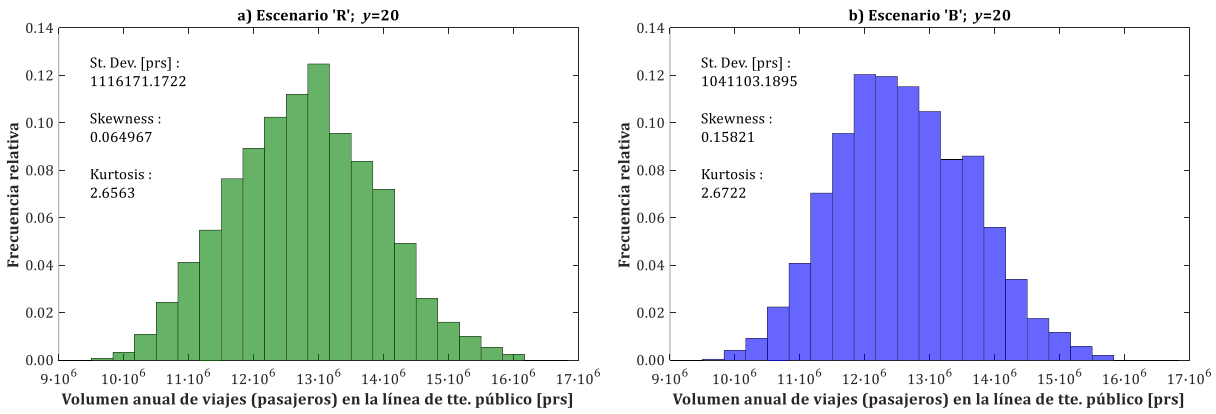
con unos incrementos a largo plazo muy exigüos. Así, dichos valores medios progresarían en este escenario desde 10.00 M (millones) de pasajeros (prs) en el año base hasta 11.08 M prs al final del horizonte de evaluación, siguiendo una evolución en el tiempo notablemente estable. Esta progresión supondría un incremento de apenas el 10% en un lapso de 40 años.

Por su parte, en los escenarios 'R' y 'B' los volúmenes anuales de pasajeros en la línea de transporte público comienzan siendo inicialmente (durante la fase de implantación de los nuevos modos, con servicio prestado aún mediante autobús convencional) muy parejos a los del escenario '0' (es decir, con valores medios en torno a 10.00 M prs), o incluso ligerísimamente menores que aquellos. Sin embargo, al irse alcanzando en las simulaciones aleatorias el año de puesta en servicio de los nuevos sistemas de transporte público, se observa un fuerte impulso ascendente en el volumen anual de pasajeros. En el momento en el que este impulso queda plenamente amortiguado en ambos escenarios (coincidiendo aproximadamente con el final de las fases de introducción y consolidación) se registrarían, según las previsiones del modelo, valores medios del volumen anual de pasajeros de 12.35 M prs en el escenario 'R' y de 12.20 M prs en el escenario 'B' (cifras referidas en ambos casos al año '9'). Se aprecia por tanto que el volumen anual de demanda a medio y largo plazo sería solo un poco mayor para el metro ligero o tranvía que para el sistema de BHLS/BRT. Así, durante los restantes años del período de evaluación de los escenarios 'R' y 'B' (fases de madurez de los nuevos servicios de transporte público) se mantiene, en valores medios, una tendencia ligeramente creciente, aproximadamente paralela a la observada en el escenario '0', aunque con una pendiente un poco superior que en dicho escenario (véanse valores en el párrafo siguiente). De esta manera, al final del horizonte de evaluación (es decir, en el año '40') los valores medios del volumen anual de pasajeros alcanzarían cifras de 13.55 M prs en el escenario 'R' y de 13.35 M prs en el escenario 'B'. Nótese que el incremento medio del volumen anual de pasajeros del transporte público atribuible a los nuevos sistemas de metro ligero o tranvía o de BHLS/BRT se situaría, en este caso particular, en torno al 21% (sin que este resultado se pueda considerar generalizable a otros casos distintos, sobre todo si el volumen inicial de viajes en la línea de transporte público es notablemente diferente).

Si se estudian detalladamente, en cada escenario, las pendientes de crecimiento de los valores medios del volumen anual de viajes en la línea de transporte público durante las fases de madurez de los nuevos servicios (tomando como referencia para ello los valores correspondientes a los años '9' y '40'), se obtienen las tasas medias de crecimiento del número anual de pasajeros que se indican a continuación. Así, la menor pendiente de crecimiento resulta ser la prevista para el escenario '0', con un valor medio de 29,546 (prs/año)/año. Por su parte, los escenarios 'R' y 'B' presentarían tasas de aumento del número anual de pasajeros sensiblemente superiores. La mayor pendiente de crecimiento es la obtenida para el escenario 'R', con un valor medio de 38,539 (prs/año)/año. Mientras, el escenario 'B' presentaría, de acuerdo a las previsiones del modelo, una tasa de aumento de los valores medios cuantificada en 37,081 (prs/año)/año.

Obsérvese, por otra parte, que, para cualquiera de los escenarios, la amplitud del intervalo comprendido entre los percentiles 97.5 y 2.5 (o, visto de otro modo, el nivel de incerteza sobre los pronósticos) aumenta progresivamente con el transcurso de los años, conforme se incrementa el plazo de las previsiones y se van acumulando las incertidumbres asociadas a los sucesivos años.

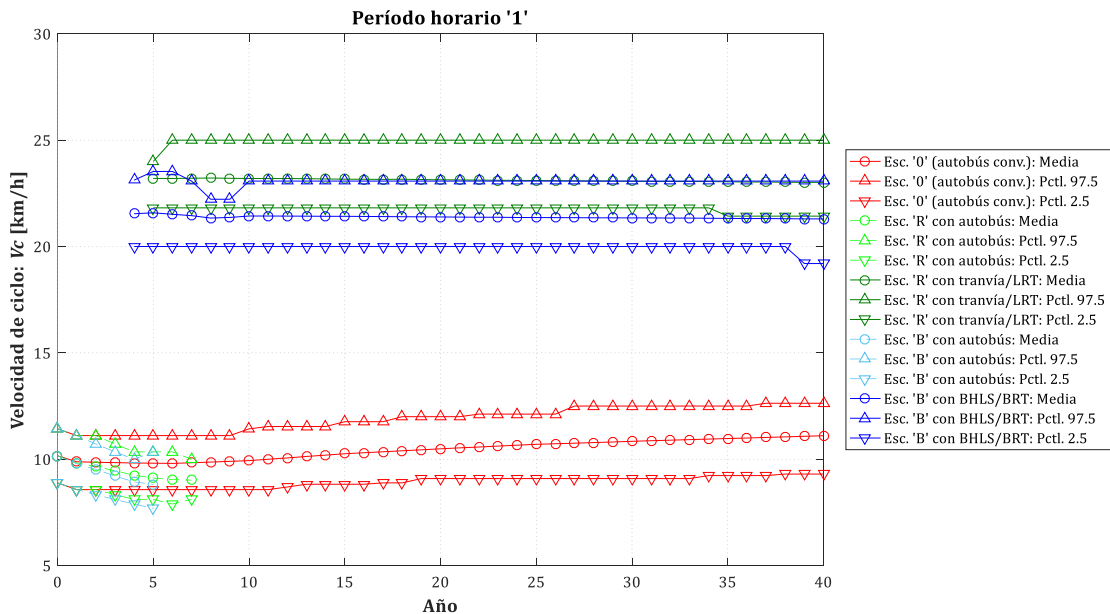
Por último, se han representado en la Figura 9.81 los histogramas de frecuencias relativas del volumen anual de viajes (pasajeros) previstos para la línea de transporte público en el año '20' del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ), tanto para el caso del escenario 'R' (implantación de metro ligero o tranvía) como para el escenario 'B' (implantación de BHLS o BRT).



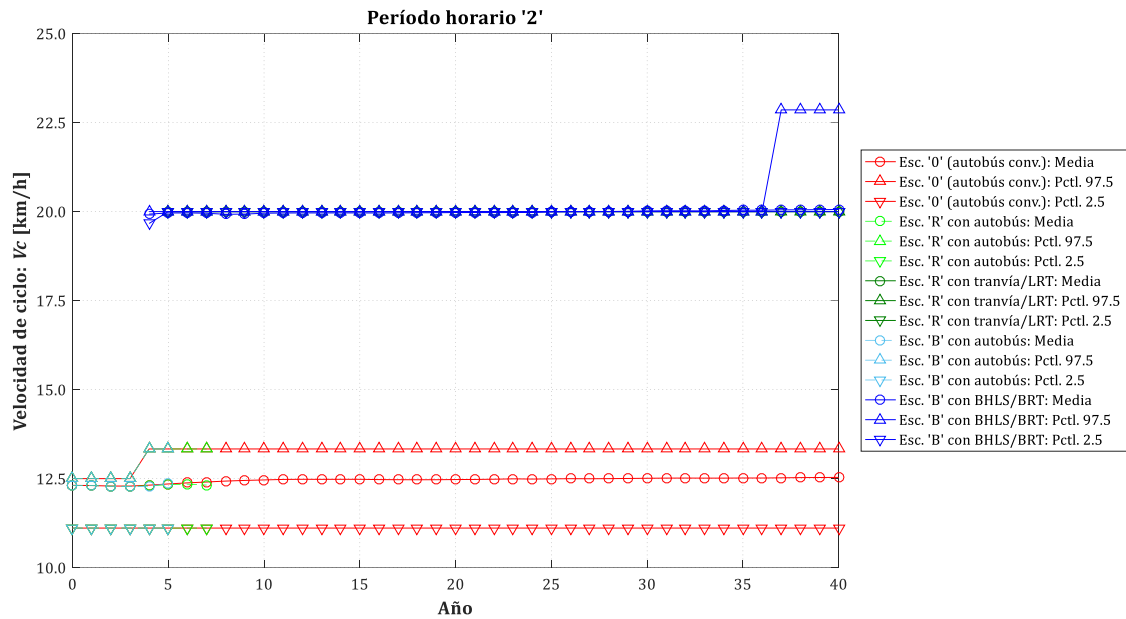
**Figura 9.81.** Histogramas de frecuencias relativas del volumen anual de viajes (pasajeros) en la línea de transporte público, en el año '20: a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

**9.3.5.2. Velocidad de ciclo en la línea de transporte público**

A continuación se estudian los resultados relativos a la velocidad de ciclo ( $V_{C_{ry1jk}}^{ms}$ ) en la explotación de la línea de transporte público, siendo esta una variable de particular interés para los operadores. Por consiguiente, las Figuras 9.82 y 9.83 se destinan a mostrar gráficamente la evolución prevista por el modelo para dicha velocidad con cada uno de los posibles modos de transporte público, a lo largo de los 40 años que componen el horizonte o período de evaluación. Para representar de forma simplificada la distribución aleatoria de los posibles resultados se adoptan nuevamente como parámetros estadísticos de interés el valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5. Nótese que, al referirse este ejemplo de aplicación práctica a una línea convencional o longitudinal de doble sentido, no es aplicable para la velocidad de ciclo la distinción específica entre sentidos de viaje, ya que dicha velocidad se define sobre la base de una vuelta completa a la línea. Por tanto, en la variable de interés  $V_{C_{ry1jk}}^{ms}$  se asigna un único valor ( $k=1$ ) al índice que habitualmente denota el sentido de operación. En cuanto a la diversidad entre diferentes períodos horarios, se mantienen como ejemplos representativos los casos correspondientes al período horario '1' (Figura 9.82) y al período horario '2' (Figura 9.83).



**Figura 9.82.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad de ciclo en la operación de la línea de transporte público, para el caso del período horario '1'.



**Figura 9.83.** Evolución, a lo largo del horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos de la velocidad de ciclo en la operación de la línea de transporte público, para el caso del período horario '2'.

Para el período horario '1', representativo de la situación en horas punta, la Figura 9.82 muestra el gran aumento de velocidad de ciclo que se produciría, en la explotación de la línea de transporte público, si esta fuese operada con los nuevos sistemas dotados de plataforma reservada y priorización semafórica (metro ligero o tranvía y BHLs o BRT), en lugar de mantener el autobús convencional en tráfico mixto. Así, en el escenario '0' los valores medios de la velocidad de ciclo de los autobuses convencionales se mantendrían, a lo largo del horizonte o período de evaluación, en un rango entre 9.8 y 11.1 km/h, observándose una tendencia en el tiempo ligeramente creciente (con la excepción de un muy pequeño descenso en los primeros años). Entre los nuevos modos de transporte público, el metro ligero o tranvía operativo en el escenario 'R' sería capaz de alcanzar una velocidad de ciclo algo más elevada que la que proporcionaría el sistema de tipo BHLs o BRT puesto en servicio en el escenario 'B' (y en uno u otro caso muy superior –del orden del doble– a la que mantendría el autobús convencional en tráfico mixto). De hecho, para el metro ligero o tranvía se obtienen valores medios siempre en el entorno de los 23.0–23.2 km/h, mientras que para el sistema de BHLs o BRT las medias de las velocidades de ciclo estarían comprendidas entre 21.3 y 21.6 km/h a lo largo de su horizonte de evaluación. Puede apreciarse, además, que en ambos casos las velocidades de ciclo permanecen muy estables a lo largo de los años (los aparentes 'saltos' que se observan en algunos puntos a lo largo de las series de percentiles 97.5 y 2.5 se originan a causa de que el tiempo de ciclo ajustado con el que se calcula –como denominador– la velocidad de ciclo solo puede tomar ciertos valores discretos que sean múltiplos del número de unidades de transporte en servicio y del intervalo redondeado o estandarizado utilizado para la operación de la línea). Obsérvese también, por otra parte, que para cualquiera de los tres modos de transporte público la diferencia de los percentiles 97.5 y 2.5 con respecto a los valores medios se sitúa generalmente en el entorno de  $\pm 1.5$ –2 km/h, aunque con algunas pequeñas variaciones.

Por su parte, durante las fases de implantación de los nuevos sistemas de transporte en los escenarios 'R' y 'B', se registraría una caída progresiva de la velocidad de ciclo en la operación de la línea mediante autobús convencional, de forma que se alcanzarían velocidades inferiores a las propias del escenario '0' (en concreto, los valores medios llegarían a caer hasta cotas mínimas de 9.0 km/h en el escenario 'R' y de 8.8 km/h en el escenario 'B'). Este descenso de la velocidad de ciclo aparece ligado a la caída de la velocidad de operación observada en estas fases, la cual remite, a su vez, a la progresiva reducción de capacidad viaria que se produce durante la implantación de los nuevos modos, transformada en un aumento del ratio Volumen/Capacidad para la circulación en tráfico mixto de los autobuses.



Por lo que respecta al período horario '2', característico de la situación en horas valle, la Figura 9.83 refleja, como en el caso anterior, que la velocidad de ciclo en la explotación de la línea de transporte público sería mucho mayor con la operación mediante los posibles nuevos modos (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) que manteniendo el servicio de autobús convencional, si bien es cierto que, con respecto al período horario '1', la diferencia de velocidades de ciclo entre los sistemas con plataforma reservada y priorización semafórica y el autobús convencional en tráfico mixto se reduce sensiblemente. Por un lado, la velocidad de ciclo en la operación mediante autobuses convencionales es algo mayor que en el caso anterior, con valores medios que se sitúan, durante todo el horizonte o período de evaluación, entre 12.3 y 12.5 km/h. Por su parte, las velocidades de ciclo que en este período horario desarrollarían los sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT son un poco menores que en el período horario '1', situándose ahora los valores medios siempre en torno a 20.0 km/h tanto para un sistema como para el otro. Nótese que esta reducción de la velocidad de ciclo está más relacionada con la necesidad de permanecer un mayor tiempo en las terminales para ajustar el tiempo de ciclo a un múltiplo del intervalo de operación (que en el período horario '2' es bastante mayor que en el '1') que con una pequeña disminución de la velocidad de operación (recuérdese que esta última fue analizada en el epígrafe 9.3.2.1). Como nota adicional cabe mencionar que la velocidad de ciclo de los nuevos modos de transporte público durante este período horario de hora valle presentaría niveles de incertidumbre muy bajos (probablemente debido al elevado tiempo de terminales disponible para el amortiguamiento de las lógicas variaciones en los tiempos de operación).

Por otra parte, obsérvese que en el período horario '2' las velocidades de ciclo alcanzadas mediante autobús convencional en tráfico mixto durante las fases de implantación de los nuevos modos de transporte público de los escenarios 'R' y 'B' son prácticamente iguales a las propias del escenario '0', puesto que los volúmenes de tráfico mixto en los que circulan los autobuses son, en este caso, suficientemente bajos como para que la reducción de capacidad viaria no llegue a tener una influencia relevante.

### 9.3.5.3. Número de unidades de transporte público necesarias en la composición de la flota o parque en cada escenario

Continuando con los resultados relativos a las características de explotación del transporte público, se analiza a continuación el número total de vehículos o unidades de transporte de cada modo que resultarían necesarias para la adecuada explotación de la línea (incluyendo unidades de reserva), y que por tanto deben estar disponibles a tal fin en la flota o parque vehicular del operador. Así pues, este resultado se relaciona con las necesidades de adquisición y renovación de vehículos o unidades de transporte público, siendo necesario tener en cuenta, complementariamente, los diferentes períodos de vida útil que suelen tener los distintos tipos de unidades (tranvías o LRVs, autobuses de tipo BRT, autobuses convencionales, etc.).

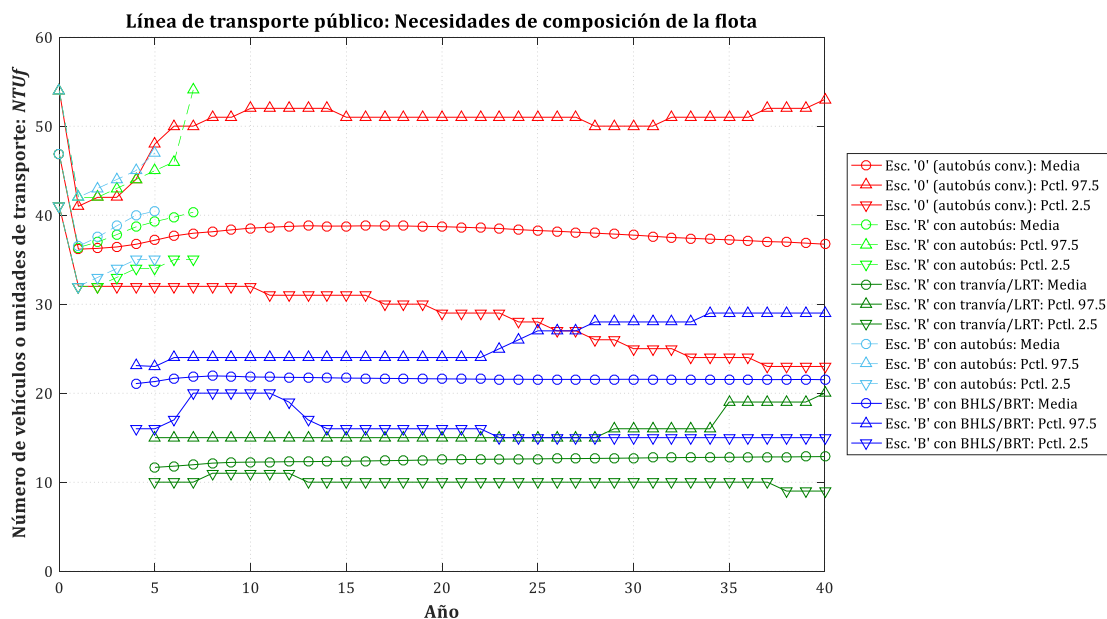
Por consiguiente, se representan gráficamente, en la Figura 9.84, los resultados obtenidos por el modelo para el número total necesario de unidades de transporte de cada modo (variable de análisis  $NTU_{ryn}^{ms}$ , con  $n=1$  en todos los casos), debiendo considerarse la posible evolución de esta variable a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación. Al objeto de poder representar simplificada la variabilidad de los resultados de las diferentes simulaciones aleatorias, se toman una vez más como parámetros estadísticos de interés la media o valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5.

La simple observación de la Figura 9.84 revela que, tal como era esperable, el número de unidades de transporte que es necesario dedicar a la explotación de la línea resulta muy inferior para los nuevos modos alternativos de transporte público dotados de plataforma reservada y priorización semafórica, en comparación con el elevado número de vehículos necesarios en el caso de la operación mediante autobús convencional en tráfico mixto. Además, entre los dos nuevos sistemas planteados como alternativa, la línea de BHLS/BRT requeriría un número de unidades de transporte notablemente superior al que sería necesario con el sistema tranviario o de metro ligero (resultado que, por otra parte,



tampoco es en absoluto sorprendente). Ahora bien, el análisis más detallado de los resultados obtenidos permite cuantificar numéricamente las diferencias que los distintos modos de transporte público presentarían en este aspecto. Así, en el caso del autobús convencional en tráfico mixto del escenario '0', los valores medios del número de vehículos necesarios están comprendidos durante todo el horizonte o período de evaluación (se excluye del mismo el año base de partida) en un intervalo entre 36.2 y 38.8 unidades. Por su parte, los valores medios del número de vehículos requeridos para la operación de la línea con un sistema de tipo BHLS o BRT se sitúan siempre entre 21 y 22 unidades. Mientras, en el caso de optarse, para la línea objeto de estudio, por un sistema tranviario o de metro ligero, los valores medios del número de unidades de transporte del que es necesario disponer quedarían comprendidos entre 11.7 y 12.9 unidades. Por otra parte, durante las fases de implantación de los nuevos sistemas en los escenarios 'R' y 'B' se observa que los requerimientos de la flota de autobuses serían generalmente todavía mayores que los propios del escenario '0', con un número de vehículos necesarios que, en valores medios, llega a superar ligeramente las 40 unidades. Otro resultado que merece ser puesto de relieve es que el nivel de incertidumbre sobre el número de unidades de transporte necesarias (inferido de forma aproximada como la diferencia entre los percentiles 97.5 y 2.5) resulta notablemente menor para los modos de transporte público con plataforma reservada y priorización semafórica (especialmente el metro ligero o tranvía) que para el autobús convencional en tráfico mixto.

En relación con los factores subyacentes a los resultados obtenidos, nótese que tras la importante reducción del número de unidades de transporte necesarias para los sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT (con respecto al autobús convencional) se encuentran no solamente los efectos de la mayor capacidad estática de cada unidad de transporte, sino también la influencia de la mucho mayor velocidad de ciclo, que permite una rotación más rápida de las unidades.



**Figura 9.84.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del número de vehículos o unidades de transporte, de cada tipo, necesarias en la composición de la flota o parque para la explotación de la línea de transporte público.

### 9.3.6. Conclusiones del ejemplo de aplicación numérica

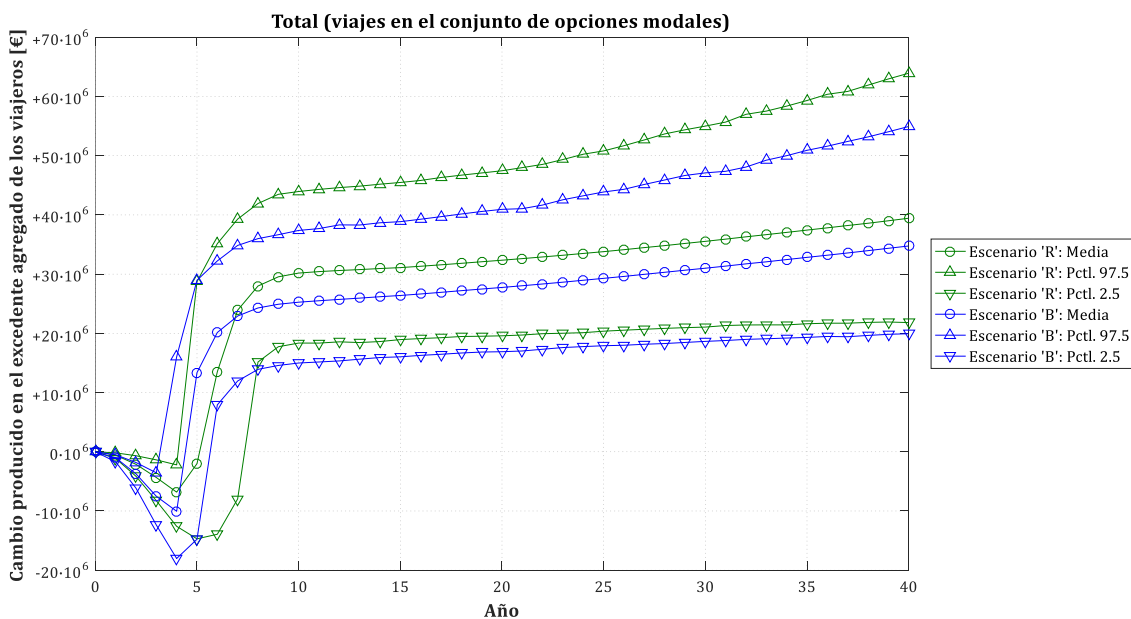
A raíz de la serie de resultados obtenidos a lo largo del epígrafe 9.3, se propone en último término la extracción de ciertas conclusiones particulares relacionadas específicamente con el ejemplo práctico de aplicación numérica propuesto en este capítulo, pero que, al mismo tiempo, puedan servir como una referencia orientativa aproximada para casos relativamente similares. Para este fin resulta muy conveniente proceder, en primer lugar, con el cálculo de los cambios que los proyectos de implantación

de los nuevos sistemas de transporte público de capacidad intermedia de los escenarios 'R' y 'B' generarían en el excedente agregado de los viajeros —en comparación con la situación prevista para el escenario base o escenario de referencia (escenario '0')—, así como obtener el desglose de dichos cambios de excedente de acuerdo a la contribución de los distintos modos de transporte en los que se haya alterado el coste generalizado de realizar el viaje. Tras el estudio detallado de todos estos cambios, se completará el análisis con las principales conclusiones preliminares que, para este ejemplo particular de aplicación, sea posible extraer en relación con la evaluación y selección de los respectivos planes de implantación de sistemas de capacidad intermedia.

**9.3.6.1. Análisis de los cambios en el excedente de los viajeros generados por los nuevos escenarios alternativos**

De cara a la extracción de posibles conclusiones, se analizan en primer lugar, en la Figura 9.85, los cambios o diferencias en el excedente agregado de los viajeros que, en los escenarios 'R' y 'B' (en comparación con el escenario de referencia o escenario '0'), se producirían en cada año del horizonte o período de evaluación a consecuencia de los proyectos de implantación de los nuevos sistemas de transporte público de capacidad intermedia. Para dotar a este estudio de un significado más directamente aplicable a la evaluación de los proyectos, se plantea dicho análisis agregando o totalizando los resultados parciales de todos los períodos horarios contemplados (seis en este caso) y de los dos posibles sentidos de viaje.

Así pues, para configurar la variable de análisis representada en la Figura 9.85 se han de sumar, a lo largo de los diferentes períodos horarios ( $j=1,2,\dots,6$ ) y sentidos de viaje ( $k=1,2$ ), los resultados obtenidos (de acuerdo a la ecuación 8.97) para la variable  $\Delta CS_{ry1jk}^s$ , de modo que la variable final analizada en la Figura 9.85 toma la forma  $\sum_{j,k} \Delta CS_{ry1jk}^s$ . Por otra parte, no se ha de olvidar que, en lo que concierne a la opción de transporte público, el análisis de los escenarios 'R' y 'B' no incluye exclusivamente los correspondientes modos de capacidad intermedia (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT, respectivamente), sino que también incorpora la situación correspondiente al autobús convencional en tráfico mixto durante los años iniciales en los que todavía se está llevando a cabo la implantación de los nuevos sistemas de transporte público.



**Figura 9.85.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros generado cada año por los nuevos escenarios en relación con el escenario de referencia, para el conjunto de usuarios de todas las opciones modales.

En síntesis, la Figura 9.85 muestra gráficamente la evolución, para cada año completo comprendido entre el año base de partida y el final del horizonte o período de evaluación, de la diferencia en el excedente agregado del total de viajeros del conjunto de opciones modales que se produciría entre los escenarios 'R' y 'B' y el escenario '0'. Nótese que sobre los resultados obtenidos no se ha aplicado todavía ningún factor de descuento intertemporal, a diferencia de la forma en la que este excedente de los viajeros entraría a formar parte de la evaluación coste-beneficio (como componente del beneficio actualizado del proyecto y, en consecuencia, del valor actual neto y de la relación Beneficio/Coste). Por otra parte, de acuerdo con las pautas generales adoptadas a lo largo de este capítulo, se toman como parámetros estadísticos de interés en la distribución de resultados la media o valor medio, el percentil 97.5 (próximo al máximo) y el percentil 2.5 (próximo al mínimo).

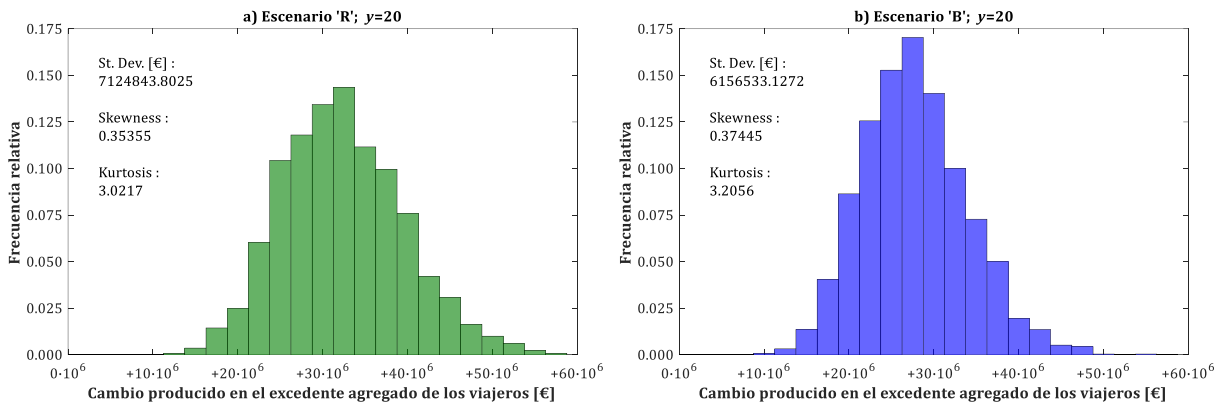
Como principal característica observada en la Figura 9.85, cabe destacar que una vez que se hubiese producido la total entrada en servicio de los nuevos modos de transporte público en plataforma reservada y con priorización semafórica (metro ligero o tranvía y BHLS o BRT) se generaría cada año, en comparación con el escenario de referencia, un importante aumento en el excedente agregado del total de viajeros del conjunto de opciones modales, siendo dicho beneficio algo mayor en el escenario 'R' (metro ligero o tranvía) que en el escenario 'B' (BHLS o BRT), aunque con una diferencia entre ambos bastante reducida. Este aumento del excedente anual de los viajeros presentaría, durante la fase de madurez de los nuevos modos, una tendencia suavemente creciente. Así pues, en valores medios este tipo de beneficio pasaría aproximadamente de 28.0 M€ (año '8') a 39.4 M€ (año '40') en el caso del escenario 'R', mientras que en el escenario 'B' dicha evolución puede cifrarse aproximadamente entre 22.9 M€ (año '7') y 34.8 M€ (año '40'). Si se toma el año final del horizonte de evaluación (año '40') como referencia a largo plazo, puede observarse que en el 97.5% de casos el aumento de excedente anual de los viajeros terminaría alcanzando al menos 21.8 M€ en el escenario 'R' y 19.9 M€ en el escenario 'B' (percentiles 2.5). En el extremo opuesto, solo en el 2.5% de casos más favorables el incremento del excedente anual de los viajeros podría llegar a superar los 63.9 M€ en el escenario 'R' y los 54.9 M€ en el escenario 'B' (percentiles 97.5).

En contraste con las etapas de consolidación y madurez, durante los primeros años del horizonte de evaluación (correspondientes a la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público) se aprecia, para los escenarios 'R' y 'B', una disminución del excedente agregado de los viajeros. Esta disminución de excedente está asociada, por un lado, a que durante esta fase el modo de transporte público disponible sigue siendo el autobús convencional en tráfico mixto, el cual resulta negativamente afectado por la progresiva reducción de la capacidad viaria que conllevan las obras de inserción del nuevo sistema de transporte público. Esta reducción de capacidad viaria perjudica también, en mayor medida, a los usuarios de las opciones de transporte motorizado privado (especialmente a los de automóvil particular). En consecuencia, durante esta etapa, los valores medios de esta disminución de excedente registrarían picos máximos de 6.8 M€ en el caso del escenario 'R' y de 10.1 M€ en el escenario 'B' (en ambos casos para el año '4'). En los casos más desfavorables, los percentiles 2.5 alcanzarían disminuciones máximas de 14.7 M€ en el escenario 'R' (año '5') y de 18.0 M€ en el escenario 'B' (año '4').

Por su parte, en la transición entre estas dos etapas contrapuestas se produce, coincidiendo con la puesta en marcha de los sistemas de transporte público de capacidad intermedia y la fase de introducción del nuevo servicio, un brusco cambio de signo en los efectos generados sobre el excedente de los viajeros. Este brusco cambio de signo se asocia, sobre todo, a los beneficios producidos a los usuarios del transporte público a consecuencia del superior nivel de servicio de los nuevos modos de capacidad intermedia, pero también a la relativa disminución de la congestión viaria que tiene lugar dentro de los escenarios 'R' y 'B' a causa del cambio modal entre transporte motorizado privado y transporte público, que actúa disminuyendo los perjuicios ocasionados a los usuarios de vehículos motorizados privados por la reducción de capacidad viaria aplicada en estos escenarios. Un punto a favor del escenario 'B' (BHLS o BRT) es que este 'salto' positivo en el excedente de los viajeros tiene lugar con más prontitud que en el escenario 'R' (metro ligero o tranvía), debido a que la fase de implantación de los sistemas de tipo BHLS o BRT es en general algo más corta, y por tanto pueden ser puestos en servicio con anteriori-

dad. En el caso del ejemplo práctico de aplicación numérica aquí desarrollado, este acortamiento de plazos se sitúa aproximadamente en el entorno de 1–2 años.

Adicionalmente, se presentan en la Figura 9.86 histogramas de frecuencias relativas del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros generado, para el conjunto de usuarios de todas las opciones modales, por los escenarios alternativos 'R' y 'B' en comparación con el escenario de referencia (escenario '0'). Nótese que la variación anual de excedente específicamente analizada en dichos histogramas es la prevista para el año '20' del horizonte o período de evaluación ( $y=20$ ).

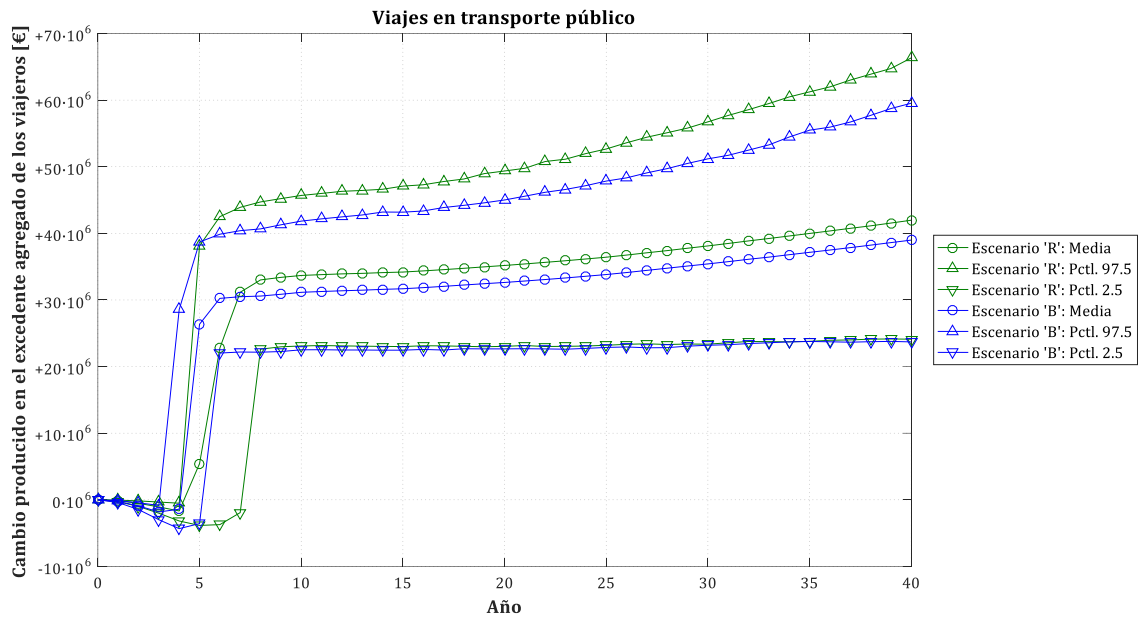


**Figura 9.86.** Histogramas de frecuencias relativas del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros generado en el año '20' por los nuevos escenarios en relación con el escenario de referencia, para el conjunto de usuarios de todas las opciones modales: a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

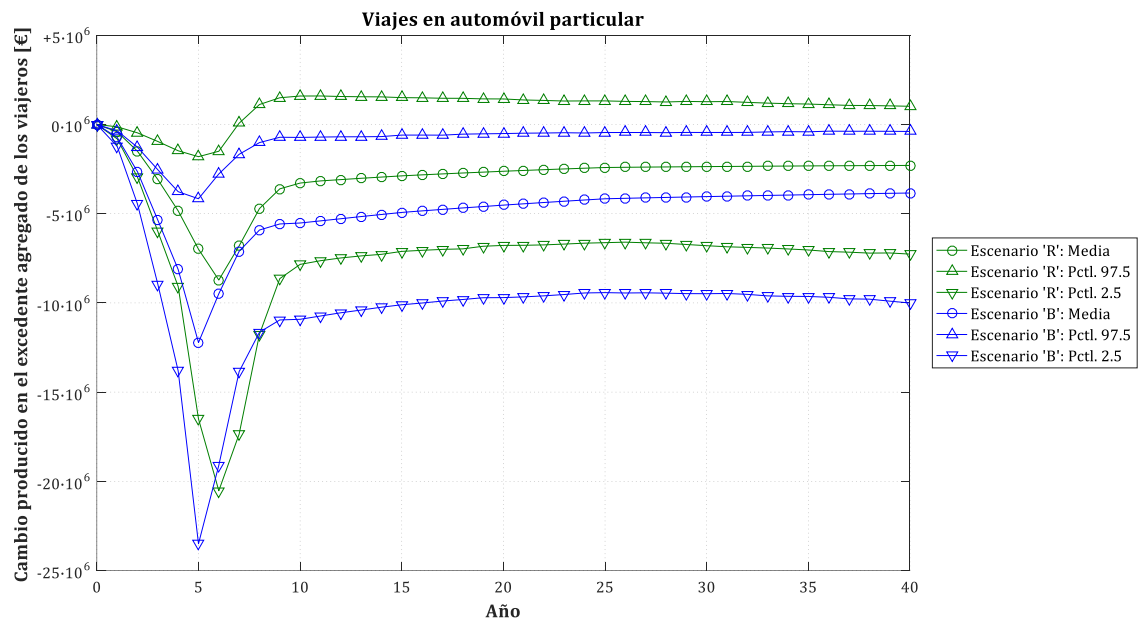
Por otra parte, para facilitar una comprensión más detallada de los efectos que los proyectos planteados en los escenarios 'R' y 'B' tendrían sobre el excedente de los viajeros en función de la opción modal afectada, se presenta a continuación, a lo largo de las Figuras 9.87, 9.88 y 9.89, la contribución desglosada por modos de transporte de los cambios totales producidos en el excedente agregado del conjunto de viajeros (previamente mostrados en la Figura 9.85).

Para ello, se parte de un análisis separado de cada uno de los tres sumandos que forman parte de la ecuación 8.97 (el primero de ellos para el transporte público, el segundo para el automóvil particular, y el tercero para la opción de moto o ciclomotor), teniendo en cuenta además —en comparación con la ecuación 8.97— que se han de agregar o totalizar los resultados parciales de los seis períodos horarios contemplados y de los dos posibles sentidos de viaje.

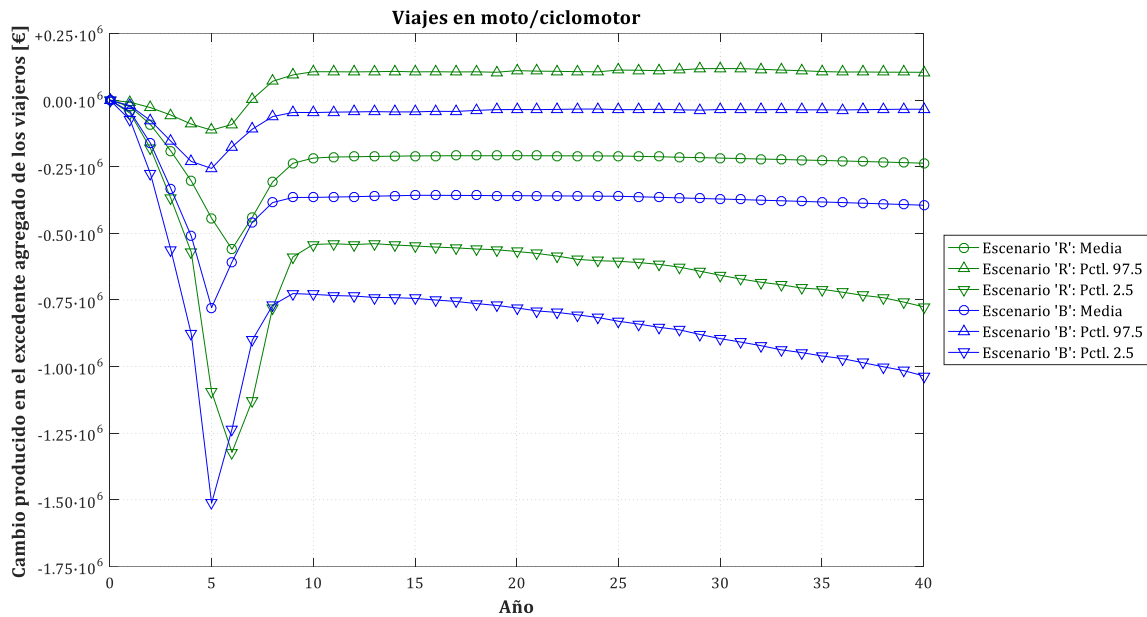
Así pues, en las Figuras 9.87, 9.88 y 9.89 se representa gráficamente la evolución, para cada año comprendido entre el año base de partida y el final del horizonte o período de evaluación, de los cambios o diferencias en el excedente agregado de los viajeros que se originen en los viajes realizados en transporte público, en automóvil particular, y en moto o ciclomotor (respectivamente), teniendo en cuenta que la comparación se establece entre los nuevos escenarios ('R' y 'B') y el escenario de referencia (escenario '0'). Se recuerda de nuevo que, sobre la valoración de los resultados mostrados en estas figuras, no se ha aplicado todavía factor de descuento alguno, así como que los parámetros estadísticos de interés adoptados para la representación gráfica de la distribución de resultados son la media o valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5, en consonancia con el criterio general del resto del capítulo.



**Figura 9.87.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en transporte público, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia.



**Figura 9.88.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en automóvil particular, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia.



**Figura 9.89.** Evolución, durante el horizonte de evaluación, de los parámetros estadísticos representativos del cambio o diferencia en el excedente agregado de los viajeros atribuible a los desplazamientos realizados cada año en moto o ciclomotor, en la comparación entre los nuevos escenarios y el escenario de referencia.

Para analizar detenidamente el comportamiento del excedente del viajero por opciones de transporte es preciso diferenciar nuevamente las distintas etapas que tienen lugar dentro del horizonte o período de evaluación, tal como se observa en las Figuras 9.87, 9.88 y 9.89.

Así pues, se aprecia que durante los años iniciales (correspondientes a la fase de implantación de los nuevos modos de transporte público de capacidad intermedia) se produce, de forma generalizada, un perjuicio para el conjunto de viajeros. No obstante, la gran mayoría de este perjuicio se genera sobre los viajes efectuados en automóvil particular, especialmente afectados —sobre todo en horas punta— por la progresiva reducción de capacidad viaria que tiene lugar durante esta fase. Para el conjunto de viajes realizados en automóvil particular la disminución de excedente de los viajeros llega, en cuanto a sus valores medios, a picos máximos de 8.7 M€ en el escenario 'R' (año '6') y de 12.2 M€ —algo mayor que el anterior— en el escenario 'B' (año '5'). El perjuicio total ocasionado anualmente sobre los viajes en transporte público (realizados todavía en autobús convencional durante esta fase) presenta valores notablemente menores que para los desplazamientos en automóvil particular. Así, los valores medios de disminución de excedente de los viajeros atribuible al transporte público alcanzan picos máximos de 1.7 M€ en el caso del escenario 'R' (año '4') y de 1.8 M€ en el escenario 'B' (año '3'). Por su parte, la contribución de los viajes efectuados en moto o ciclomotor a la disminución del excedente de los viajeros es todavía menor (debe tenerse en cuenta, en este sentido, la reducida cuota de reparto modal que corresponde a este modo de transporte). Los valores medios de la disminución del excedente de los viajeros registran, para el caso de los desplazamientos en moto o ciclomotor, picos máximos de 0.6 M€ en el escenario 'R' (año '6') y de 0.8 M€ en el escenario 'B' (año '5'). Obsérvese que durante esta fase de implantación los resultados previstos para el escenario 'R' son en general algo menos desfavorables que en el escenario 'B', para cualquiera de las tres modalidades de transporte analizadas. Este resultado se relaciona con el hecho de que, de acuerdo a los datos introducidos en el modelo, la reducción de capacidad viaria propuesta para el escenario 'R' es ligeramente menor que la planteada para el escenario 'B'.

Si se pasa a analizar, por el contrario, la etapa correspondiente a la madurez de los nuevos sistemas de capacidad intermedia (con el servicio y la demanda de dichos modos ya consolidada), se observa que son los viajes en la opción modal de transporte público los responsables de que se produzca un aumento

en el excedente total de los viajeros, mientras que los viajes en las opciones de transporte motorizado privado tienden a presentar una contribución negativa a dicho cambio de excedente. De nuevo, el comportamiento negativo de estos últimos responde a los efectos de la reducción de capacidad viaria que se aplica en el caso de los escenarios 'R' y 'B'.

Durante la etapa de madurez el beneficio generado para los viajeros por el uso del transporte público es, en general, levemente mayor para el escenario 'R' (metro ligero o tranvía) que para el escenario 'B' (BHLS o BRT). Así, en el caso del escenario 'R' el aumento de excedente de los viajeros atribuible a los desplazamientos en transporte público se mueve durante esta fase, en términos de valores medios, entre 33.0 M€ (año '8') y 42.0 M€ (año '40'). Mientras, en el escenario 'B' el beneficio medio generado para los viajeros por el uso del transporte público se situaría en esta etapa entre 30.2 M€ (año '6') y 39.0 M€ (año '40'). En los casos más desfavorables (véanse percentiles 2.5) la contribución del metro ligero o tranvía y la del BHLS o BRT al incremento del excedente de los viajeros resultaría prácticamente igual, mientras que en los casos más favorables (percentiles 97.5) el aumento de beneficio para los usuarios del transporte público generado por el escenario 'R' —en comparación con el 'B'— es un poco más acusado que cuando se consideran los valores medios.

Por lo que respecta a los viajes en automóvil particular, se aprecia que durante la fase de madurez de los nuevos modos de transporte público la variación del excedente de los viajeros producida en los desplazamientos realizados en automóvil sigue siendo mayoritariamente de signo negativo. Sin embargo, la cuantía del perjuicio generado en dicho tipo de viajes se reduce notablemente con respecto al período final de la fase de implantación. Además, la disminución de excedente ocasionada por el conjunto de viajes en automóvil particular sigue siendo menor para el caso del escenario 'R' que para el escenario 'B'. En valores medios, la reducción de excedente vinculada a los desplazamientos en automóvil particular varía, a lo largo de esta fase, entre 3.6 M€ (año '9') y 2.3 M€ (año '40') en el caso del escenario 'R', y entre 5.9 M€ (año '8') y 3.8 M€ (año '40') en el escenario 'B'. Una vez más, hay que apuntar a la reducción de capacidad viaria de los escenarios 'R' y 'B' como origen principal del perjuicio ocasionado sobre los viajes en automóvil particular (afectando especialmente a aquellos que se realizan en períodos punta). Nótese que el efecto de descongestión relativa producida en estos escenarios a raíz de la puesta en servicio de los nuevos modos de transporte público de capacidad intermedia —a consecuencia de un cierto trasvase modal desde el transporte motorizado privado al transporte público— contribuye a aminorar sensiblemente la cuantía del perjuicio generado a los viajeros que empleen la opción de automóvil particular, pero aún así no es suficiente para invertir el signo del cambio experimentado en el excedente de estos viajeros.

Por su parte, para los viajes efectuados en moto o ciclomotor se observa, a nivel cualitativo, un tipo de comportamiento muy similar al descrito para los desplazamientos en automóvil particular, pero con unos valores de la reducción total de excedente que, en el caso de los viajes realizados en moto o ciclomotor, son de mucha menor cuantía. La muy inferior magnitud de esta contribución negativa se debe principalmente al escaso volumen de viajes que, en comparación con el automóvil particular, son realizados en la opción modal de moto o ciclomotor, pero también a que el incremento de coste generalizado originado en los escenarios 'R' y 'B' por cada viaje en vehículo motorizado privado es, en general, algo más reducido en el caso de los desplazamientos en moto o ciclomotor que en automóvil particular. Así pues, a lo largo de la fase de madurez de los nuevos modos de transporte público los valores medios de la reducción de excedente de los viajeros generada en los viajes en moto o ciclomotor se situaría en torno a cifras anuales de 0.21–0.24 M€ en el caso del escenario 'R'. Estos valores serían algo mayores en el escenario 'B', con cuantías anuales de reducción de excedente de los viajeros alrededor de 0.36–0.39 M€.

### 9.3.6.2. Conclusiones orientadas a la evaluación

En líneas generales, se ha observado mediante el ejemplo práctico de aplicación numérica definido en este capítulo que, en este caso particular, el escenario 'R' (es decir, el plan de implantación de un sistema de metro ligero o tranvía) es algo más favorable, desde el punto de vista del beneficio o excedente generado para el conjunto de viajeros del corredor, eje o itinerario afectado por la línea de transporte público, que el escenario 'B', en el cual se implantaría como alternativa un sistema de BHLS o BRT. No obstante, la diferencia existente en este sentido entre ambos escenarios se ha mostrado, a lo largo de los sucesivos años del horizonte o período de evaluación, bastante limitada. Al objeto de extraer conclusiones de una mayor solidez orientadas a la evaluación de los respectivos proyectos, resulta necesario cuantificar de un modo más preciso la variación total en el beneficio personal o excedente de los viajeros generada por cada uno de estos escenarios de forma acumulada a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación. Para esta tarea se debe tener en cuenta que han de aplicarse criterios de comparación o agregación intertemporal. Esto se traduce en que el valor de los beneficios y costes incurridos en plazos temporales que pueden llegar a ser muy dispares (hasta varias décadas de diferencia entre el inicio de la inversión y el final del período de evaluación o de la vida útil del proyecto) debe ser agregado u homogeneizado a una única cuantía que esté referenciada a un punto temporal específico, normalmente coincidente con el hipotético inicio de la inversión o del proyecto. De este modo, sobre los beneficios y costes futuros generados por estos proyectos ha de considerarse la aplicación de una tasa social de descuento que reduzca progresivamente el valor real de los beneficios o costes más lejanos en el tiempo en comparación con los actuales, de forma que se actualice o se 'traiga al presente' el valor futuro de aquellos. En último término, la aplicación de esta tasa social de descuento se relaciona con una cierta preferencia de la sociedad por el bienestar presente (o cercano en el tiempo) frente al hipotético bienestar futuro.

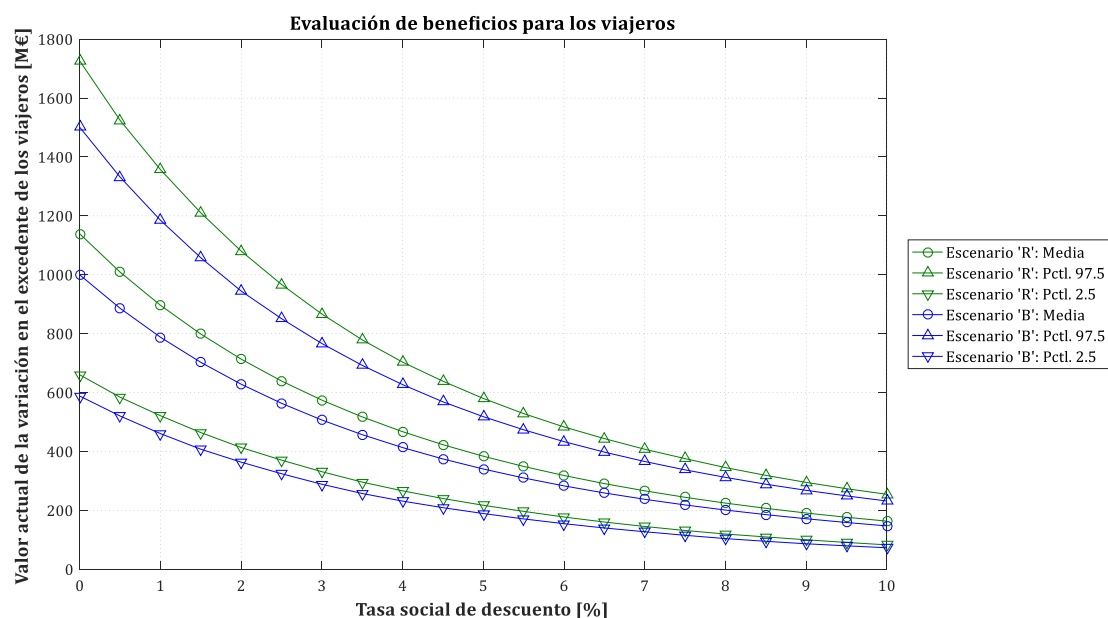
En este caso se va a adoptar como punto de referencia para la actualización de los beneficios y costes el año base o año '0', de forma que el valor actualizado de la variación de excedente calculada para un determinado año  $y$  del horizonte o período de evaluación se obtendría dividiendo su valor sin actualizar entre  $(1+SDR)^y$ , siendo  $SDR$  la tasa social de descuento (en términos reales, es decir, a precios constantes). Por su parte, el valor actualizado total de la variación en el excedente de los viajeros generada en uno u otro escenario a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación se obtendría, simplemente, sumando los valores actualizados correspondientes a cada uno de los años de dicho período (es decir, en este caso concreto con  $y$  desde 1 hasta 40).

Siguiendo estas premisas, en la Tabla 9.1 se especifica, para cada uno de los escenarios 'R' y 'B', el valor actualizado al año base del incremento en el excedente del conjunto de viajeros producido a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, teniendo en cuenta que dichos incrementos toman como nivel de referencia el escenario base o escenario '0', caracterizado por la continuidad del autobús convencional en tráfico mixto como servicio de transporte público en la línea objeto de estudio. En principio, se ofrece ese valor actualizado para un amplio rango de posibles cuantías de la tasa social de descuento, variando la misma entre el 0% (es decir, como si no se aplicase ningún factor de descuento a los beneficios y costes futuros) y el 10%. Además, manteniendo el nivel de tratamiento estadístico con el que se analiza la posible distribución de resultados aleatorios de los proyectos, se especifican como parámetros más representativos de dicha distribución la media o valor medio, el percentil 97.5 y el percentil 2.5. De una forma más visual, estos mismos resultados de la Tabla 9.1 también se representan gráficamente en la Figura 9.90.



**Tabla 9.1.** Valor actualizado (referido al año base) de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' durante la totalidad del horizonte o período de evaluación, para diferentes valores posibles de la tasa social de descuento.

Tasa social de descuento	Valor actualizado (al año base) de la variación total en el excedente de los viajeros					
	Escenario 'R'			Escenario 'B'		
	Media	Percentil 97.5	Percentil 2.5	Media	Percentil 97.5	Percentil 2.5
0.0%	1,138.9 M€	1,725.7 M€	660.2 M€	999.6 M€	1,500.7 M€	588.1 M€
0.5%	1,008.9 M€	1,524.2 M€	584.2 M€	886.1 M€	1,331.5 M€	520.4 M€
1.0%	896.3 M€	1,357.0 M€	521.4 M€	787.8 M€	1,185.1 M€	460.6 M€
1.5%	798.6 M€	1,210.1 M€	464.1 M€	702.5 M€	1,057.6 M€	407.6 M€
2.0%	713.5 M€	1,080.4 M€	413.4 M€	628.3 M€	944.6 M€	363.7 M€
2.5%	639.2 M€	966.9 M€	370.6 M€	563.5 M€	850.9 M€	324.4 M€
3.0%	574.3 M€	866.7 M€	331.3 M€	506.8 M€	766.5 M€	288.6 M€
3.5%	517.3 M€	778.9 M€	295.9 M€	457.0 M€	692.4 M€	257.2 M€
4.0%	467.1 M€	703.2 M€	266.3 M€	413.2 M€	627.0 M€	231.4 M€
4.5%	422.9 M€	638.5 M€	240.3 M€	374.6 M€	568.6 M€	209.2 M€
5.0%	383.8 M€	580.1 M€	217.3 M€	340.4 M€	518.1 M€	189.3 M€
5.5%	349.1 M€	528.5 M€	196.6 M€	310.1 M€	473.6 M€	171.0 M€
6.0%	318.3 M€	483.3 M€	177.4 M€	283.1 M€	433.4 M€	154.7 M€
6.5%	290.9 M€	443.6 M€	160.3 M€	259.1 M€	397.8 M€	140.2 M€
7.0%	266.3 M€	407.5 M€	145.3 M€	237.6 M€	365.9 M€	127.4 M€
7.5%	244.4 M€	375.7 M€	131.6 M€	218.4 M€	337.4 M€	115.4 M€
8.0%	224.7 M€	345.2 M€	119.7 M€	201.1 M€	312.0 M€	104.1 M€
8.5%	207.0 M€	318.8 M€	109.8 M€	185.5 M€	288.8 M€	95.0 M€
9.0%	191.0 M€	294.9 M€	100.1 M€	171.5 M€	268.0 M€	86.5 M€
9.5%	176.5 M€	273.5 M€	91.1 M€	158.8 M€	249.2 M€	79.6 M€
10.0%	163.4 M€	254.5 M€	82.9 M€	147.3 M€	231.7 M€	73.0 M€



**Figura 9.90.** Parámetros estadísticos representativos del valor actualizado de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' (en comparación con el escenario de referencia) durante todo el horizonte o período de evaluación, en función de los posibles valores de la tasa social de descuento.

La Tabla 9.1 y la Figura 9.90 corroboran la existencia de una pequeña ventaja a favor del escenario 'R' en cuanto al beneficio total generado directamente para el conjunto de viajeros que utilizan el corredor, eje o itinerario objeto de estudio, cualquiera que sea la tasa social de descuento aplicada dentro del rango entre 0% y 10%. No obstante, para efectuar una primera apreciación aproximada de la posible rentabilidad socioeconómica de la hipotética implantación de alguno de estos dos modos de capacidad intermedia frente al escenario base, así como para poder delimitar la magnitud de la ventaja del escenario 'R' y contraponerla, al menos, con una estimación de los costes de implantación que serían previsiblemente necesarios en uno u otro caso, es preciso adoptar un valor de referencia para la tasa social de descuento.

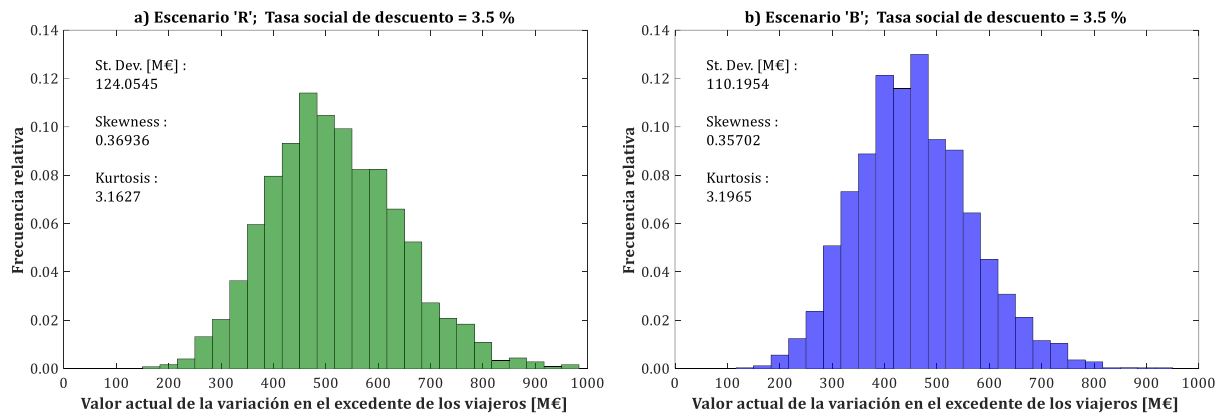
En relación con esta cuestión, el *'Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades'* (MFOM, 1996: p. 120) proponía en su momento (1996) una tasa social de descuento del 6%, en consonancia con la utilizada habitualmente por aquel entonces para la evaluación de infraestructuras de transporte público interurbano en España. No obstante, también sugería la realización de análisis de sensibilidad con valores del 4% y del 8%.

Sin embargo, desde aquel momento se ha producido una tendencia bastante generalizada a reducir el valor de las tasas sociales de descuento aplicadas en diferentes países de nuestro entorno, de forma que el bienestar futuro recibido a medio y largo plazo no sea tan relativamente infravalorado como lo era anteriormente (probablemente esa tendencia tiene sus orígenes en la toma de conciencia sobre los conceptos de sostenibilidad y desarrollo sostenible). Así, de acuerdo a la guía europea de evaluación *'Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects'* (EC-DGRP, 2008: p. 208), la tasa social de descuento se redujo en el Reino Unido del 6% al 3.5% en 2003, del 4% al 3% en Alemania en 2004, y del 8% al 4% en Francia en 2005. La propia guía europea (EC-DGRP, 2008: p. 208) proponía, en relación con el período 2007-2013, el uso de tasas de descuento social del 5.5% para los países receptores de fondos de cohesión (aquellos cuya renta nacional bruta *per cápita* sea inferior al 90% de la media de la Unión Europea) y del 3.5% para los países no receptores de dichos fondos. En este sentido, se ha de tener en cuenta que España podía optar de manera transitoria a fondos de cohesión durante el período 2007-2013, pero ya no se encuentra entre los potenciales receptores en el período 2014-2020. Por tanto, conforme a dichos criterios, se adopta como referencia para el análisis de este caso una tasa social de descuento del 3.5%.

Con dicha tasa social de descuento del 3.5%, el escenario 'R' generaría, como promedio, un incremento en el excedente de los viajeros con un valor actual de 517.3 M€, con un 97.5% de probabilidades de alcanzar al menos los 295.9 M€ y solo un 2.5% de posibilidades de que se superasen los 778.9 M€.

Por su parte, el valor medio actualizado del incremento de excedente de los viajeros producido en el escenario 'B' se sitúa en los 457.0 M€, con una probabilidad del 97.5% de que se llegue al menos a los 257.2 M€ y un 2.5% de posibilidades de superar los 692.4 M€.

Complementando a estas cifras, en la Figura 9.91 se muestran los histogramas de frecuencias relativas del valor actualizado (con una tasa social de descuento del 3.5%) de la variación en el excedente de los viajeros generado por los escenarios alternativos 'R' y 'B' a lo largo de todo el horizonte o período de evaluación, en comparación con el escenario base o de referencia (escenario '0').



**Figura 9.91.** Histogramas de frecuencias relativas del valor actualizado de la variación en el excedente de los viajeros generada por los escenarios 'R' y 'B' (en comparación con el escenario de referencia) durante todo el horizonte o período de evaluación, para una tasa social de descuento del 3.5%: a) Escenario 'R'; b) Escenario 'B'.

Para poner en contexto la magnitud o escala de las cifras anteriores, una primera pero significativa aproximación es compararlas con una estimación de la inversión inicial que previsiblemente sería necesaria para la implantación y puesta en servicio de cada uno de los dos modos de transporte público de capacidad intermedia que son objeto de análisis. En este sentido, pueden tomarse como referencia de partida los datos aportados en el Capítulo 2 (epígrafe 2.3.2.1) sobre los costes iniciales de implantación de los sistemas de metro ligero o tranvía y de BHLS o BRT. De forma simplificada, en dicho epígrafe se indicaban unos costes totales de implantación de los sistemas de metro ligero (incluyendo vehículos, depósito y talleres) de 20.6 M€ prorrateados por cada kilómetro de infraestructura lineal de acuerdo al estudio de la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008), y de 21.1 M€/km según los estudios de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). Para los sistemas de BRT o BHLS se señalaban costes totales de implantación de 12.4 M€ por kilómetro de acuerdo a la 'Sociedad Alemana de Investigación sobre Carreteras y Transportes' (FGSV, 2008), y de 13.5 M€/km (con autobuses guiados) según Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). Aunque a estas cifras no se les puede otorgar, evidentemente, una validez general (de forma que resultasen aplicables con aceptable exactitud a cualquier caso), sí permiten establecer un marco de referencia para la comparación aproximada con los beneficios generados para los viajeros por cada uno de los sistemas de capacidad intermedia. Así pues, teniendo en cuenta que la longitud de la línea analizada en este ejemplo de aplicación numérica es de 10 km, se considera un coste inicial orientativo de implantación y puesta en servicio en torno a los 210 M€ para el caso del metro ligero o tranvía (escenario 'R') y de alrededor de 130 M€ para el sistema de BHLS o BRT (escenario 'B').

Como puede apreciarse, con una tasa de descuento del 3.5% el beneficio generado en forma de incremento de excedente de los viajeros en los escenarios 'R' y 'B' supera ampliamente los costes de inversión inicial necesarios para la implantación en la línea de transporte público de los respectivos sistemas de capacidad intermedia (con diferencias, en valores medios, de 307.3 M€ en el escenario 'R' y de 327.0 M€ en el caso del escenario 'B'). Si bien es cierto que, para un análisis más exhaustivo, sería necesario considerar también otros componentes de la evaluación coste-beneficio, como las posibles diferencias entre escenarios en los costes de operación y mantenimiento del transporte público (en relación con el excedente de los productores) y —probablemente de mayor peso— las diferencias en cuanto a externalidades o costes externos generados por los viajes en cada escenario, la amplia diferencia entre el valor actual del incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial permite anticipar que la implantación de sistemas de capacidad intermedia en la línea analizada conduciría muy probablemente a una rentabilidad socioeconómica positiva. En este sentido debe tenerse en cuenta que, dadas las características de los proyectos de transporte público analizados, estos dos componentes (incremento de excedente de los viajeros y costes de inversión inicial) son previsiblemente los que generan unas diferencias de mayor cuantía en los beneficios y costes comparados con la

situación del escenario base o escenario '0'. Además, es esperable que en el apartado de costes externos los resultados de los escenarios 'R' y 'B' sean claramente positivos en relación con el escenario '0', al reducirse con respecto a este último el volumen de viajes efectuados en vehículos motorizados privados (automóvil particular y moto o ciclomotor). Por tanto, la inclusión de dichos costes externos redundaría en la previsible rentabilidad socioeconómica positiva de los proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia.

Nótese además que la diferencia entre el beneficio generado directamente para los viajeros y los costes de inversión inicial resulta positiva incluso si se toman para el incremento de excedente de los viajeros los valores del percentil 2.5, que presentan una muy alta probabilidad (97.5%) de ser superados. Por tanto, puede indicarse que el principal riesgo para la rentabilidad socioeconómica de estos proyectos de sistemas de transporte público de capacidad intermedia estaría asociado a una hipotética infravaloración de sus costes de implantación, o, visto de otro modo, al posible surgimiento de sobrecostes en la implementación de dichos proyectos.

Por otra parte, también debe tenerse presente que si se tomase una tasa social de descuento del 6% —tal como la indicada en su momento por el *Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades* (MFOM, 1996: p. 120)— la diferencia entre los valores medios del incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial para los escenarios 'R' y 'B' continuaría siendo de signo positivo, aunque lógicamente con un margen de amplitud notablemente menor (108.3 M€ en el escenario 'R' y 153.1 M€ en el escenario 'B'). Sin embargo, en los casos en los que el aumento de excedente de los viajeros presentase sus valores más desfavorables (véanse percentiles 2.5) existiría un riesgo apreciable, en el caso del escenario 'R' (metro ligero o tranvía), de que esta diferencia resultase negativa.

Una vez justificada la muy probable rentabilidad socioeconómica positiva de los proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia en la línea objeto de estudio en comparación con el escenario base (continuación del servicio de autobús convencional en tráfico mixto), procede discernir, al menos para este caso particular, cuál de los dos tipos de modos podría previsiblemente aportar un mayor valor neto a la sociedad. En este sentido, el resultado más relevante al que es posible recurrir es que, si se toman los valores medios del incremento de excedente de los viajeros generado por los escenarios 'R' y 'B' y una tasa social de descuento del 3.5%, la diferencia entre el beneficio para los viajeros y el coste de inversión inicial se muestra favorable al escenario 'B', aunque por un margen ciertamente estrecho. En concreto, dicha diferencia positiva resultaba de 327.0 M€ para el escenario 'B' y de 307.3 M€ en el caso del escenario 'R' (es decir, aproximadamente un 6% mayor para el escenario 'B' en relación al 'R'). Nótese no obstante que, si se mantiene la misma tasa de descuento y los mismos costes iniciales de inversión tomados como referencia, en aquellos casos más beneficiosos en los que el aumento de excedente de los viajeros se aproxima a sus valores máximos (véanse percentiles 97.5), la situación comparativa entre estos dos escenarios tiende a igualarse e incluso puede resultar ligerísimamente favorable al escenario 'R'. Por el contrario, cuando se den situaciones en las que el aumento de excedente de los viajeros producido por los escenarios 'R' y 'B' se sitúe realmente en el rango más bajo de las previsiones (obsérvense, como referencia, los percentiles 2.5), la diferencia en favor del escenario 'B' tiende a hacerse algo más elevada.

En cualquier caso, aun considerando los valores medios del incremento de excedente y la tasa social de descuento del 3.5%, no puede descartarse de antemano que la reducida diferencia observada en favor del escenario 'B' (cifrada en apenas 20 M€) pudiese llegar a ser compensada —o incluso superada— por los previsiblemente mejores resultados de los sistemas de metro ligero o tranvía en materia de reducción de costes externos (aunque en este sentido sería necesario precisar también, entre otras cuestiones, el tipo de fuente de energía utilizada para la propulsión de los autobuses del sistema de BHLS o BRT). Por su parte, el posible papel desempeñado por los costes de operación y mantenimiento del transporte público en favor de uno u otro sistema no es una cuestión que esté clara de antemano, ya que la disparidad de resultados observada en los estudios que han abordado esta materia con mayor grado de detalle (véase epígrafe 2.3.2.2) no permite extraer conclusiones definitivas en uno u otro

sentido. De todos modos, no parece probable que las posibles ventajas que pudiese presentar uno u otro sistema en el apartado de costes de operación y mantenimiento llegasen a jugar un papel tan decisivo como las diferencias en el excedente de los viajeros generado y en los costes de inversión inicial.

Por otra parte, resulta conveniente analizar también cuál sería la situación comparativa si se adoptase una tasa social de descuento más elevada, tal como el 6% propuesto en su momento por el *'Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades'* (MFOM, 1996: p. 120). En este caso, la diferencia entre los valores medios del incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial es, tal como se vio anteriormente, de 153.1 M€ para el escenario 'B' y de 108.3 M€ para el escenario 'R'. Por tanto, la diferencia en favor del escenario 'B' (cerca de 45 M€) resulta ahora algo más amplia que con la tasa de descuento del 3.5% (apenas 20 M€). No obstante, esta diferencia sigue pareciendo demasiado exigua como para poder afirmar que no pudiese ser hipotéticamente compensada a través de otros componentes de la evaluación como los costes externos o los costes de operación y mantenimiento del transporte público. De todos modos, una conclusión adicional que puede extraerse, en relación con la influencia de las tasas sociales de descuento, es que tasas más altas parecen resultar más favorables al escenario 'B' (BHLS o BRT), mientras que tasas más bajas favorecerían en cambio al escenario 'R' (metro ligero o tranvía).

En síntesis, los resultados obtenidos en el ejemplo particular de aplicación del modelo indican, de cara a la posible evaluación de los hipotéticos planes de implantación de un sistema de transporte público urbano o metropolitano de capacidad intermedia, que la rentabilidad socioeconómica de dichos proyectos (en el caso analizado o en otras posibles situaciones notablemente similares) es, con muy alta probabilidad, positiva (en comparación con el escenario base en el que el servicio continuaría estando prestado mediante autobús convencional). Tal como es previsible, los principales beneficios para los viajeros se producen en los desplazamientos efectuados en transporte público, mientras que los viajes en vehículos motorizados privados (automóviles y motos o ciclomotores) resultarían moderadamente perjudicados en horas punta y apenas afectados en horas valle.

En la comparación entre proyectos de implantación de modos ferroviarios urbanos (metro ligero o tranvía en el escenario 'R') y de sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT en el escenario 'B'), los resultados obtenidos para este caso particular muestran —basándose en la diferencia entre el incremento de excedente de los viajeros generado en estos escenarios y los costes de inversión inicial estimados para los sistemas— una pequeña ventaja en favor del escenario 'B' (para una tasa social de descuento del 3.5% esta ventaja se cifraría, en valores medios, en torno a 20 M€, aumentando hasta unos 45 M€ para una tasa de descuento del 6%). Sin embargo, la magnitud de esta ventaja parece —en ausencia de una evaluación más exhaustiva de aspectos como las externalidades y los costes de operación y mantenimiento de cada sistema— demasiado reducida como para poder determinar concluyentemente una mayor rentabilidad socioeconómica del escenario 'B'. Cabría hablar más bien para este caso de una situación próxima al 'empate técnico', aunque con la mencionada ventaja parcial para el sistema de BHLS o BRT.



## 10. Conclusiones, aportaciones y futuras líneas de investigación

### 10.1. INTRODUCCIÓN

Para dar finalización a la presente tesis, en este capítulo se revisan las principales aportaciones de la misma, se resumen las conclusiones fundamentales (tanto a nivel metodológico como en relación con la evaluación comparativa de sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia), se identifican posibles oportunidades de mejora con respecto al modelo desarrollado, y se plantean por último otras posibles líneas de investigación futura relacionadas con esta tesis.

Así pues, se comienza este capítulo con una síntesis de las aportaciones que se consideran de mayor relevancia en la presente tesis, principalmente en referencia a las características y utilidades del modelo desarrollado, aunque también se incluyen algunas aportaciones metodológicas de otros tipos y aportaciones relacionadas con la revisión del estado del conocimiento.

A continuación se recapitulan las principales conclusiones extraídas de la tesis, distinguiendo entre posibles conclusiones relacionadas con el enfoque metodológico adoptado y conclusiones relativas a la evaluación comparativa entre sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia. Entre estas últimas se destacan las conclusiones relacionadas con los costes de implantación y de operación y mantenimiento, con la valoración del excedente de los viajeros, y con la evaluación preliminar de la posible rentabilidad socioeconómica de los planes de implantación de uno u otro tipo de sistemas de capacidad intermedia (en función del ejemplo de aplicación práctica desarrollado en el Capítulo 9).

Tras las conclusiones, se señalan brevemente algunas de las posibilidades de introducción de mejoras en el modelo que han podido ser identificadas a lo largo de su desarrollo. Dichas oportunidades de mejora surgirían fundamentalmente de la supresión de las principales simplificaciones que fue preciso incorporar en el diseño del modelo con el fin de hacerlo más aplicable y menos exigente en cuanto al nivel de los datos requeridos.

Por último, se plantean las posibles líneas futuras de investigación que se derivan de la presente tesis, las cuales están relacionadas en su mayoría con las posibilidades que el modelo desarrollado ofrece para su posterior empleo como herramienta de base en análisis de evaluación más completos.

### 10.2. APORTACIONES

De acuerdo al objetivo primordial planteado en el epígrafe 1.3, se ha diseñado y desarrollado en esta tesis un modelo concebido particularmente para la previsión y análisis detallado de los efectos que sobre las principales variables cuantitativas de movilidad produciría la hipotética implementación, en un determinado corredor, eje o itinerario, de los principales sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia (es decir, de modos ferroviarios ligeros como metro ligero o tranvía moderno y de sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada bajo la denominación de BHLS o BRT). El diseño general de dicho modelo se ha enfocado a la prognosis de aquellos 'inputs' que, en relación con la demanda, oferta, y costes generalizados del transporte, serían requeridos —entre otros— como base o punto de partida para una posterior evaluación socioeconómica de los

respectivos proyectos (particularmente, mediante el análisis coste-beneficio). Además, conforme a la naturaleza comparativa de la evaluación coste-beneficio, se ha añadido al modelo un escenario base o escenario de referencia en el que se analiza también el previsible comportamiento futuro del correspondiente servicio de autobús convencional en tráfico mixto, de forma que los modos de transporte público finalmente modelizados y analizados han sido tres en total: autobús convencional, metro ligero o tranvía moderno, y BHLS o BRT.

Este modelo se ha diseñado de manera que se integren conjuntamente y de manera congruente los distintos aspectos concernientes a la predicción de la futura demanda (a través del volumen total de viajes y de los volúmenes de viajes en cada opción modal), a la caracterización de la oferta de transporte de forma dinámica (teniendo en cuenta la influencia de los volúmenes de demanda en la operación del servicio de transporte público y en los atributos de las restantes alternativas), a la valoración que los potenciales viajeros atribuyan a cada una de las opciones o alternativas (a través del coste generalizado de viaje en cada modo y del coste compuesto de viaje para el conjunto de opciones), y a las elecciones de los viajeros en forma agregada para la determinación de la demanda (en función de la influencia del coste compuesto en la distribución de viajes y del coste generalizado de cada opción en el reparto modal).

Frente al enfoque parcial que caracteriza a la gran mayoría de los estudios comparativos previos revisados en el epígrafe 2.3.1, en los que se examinan de forma separada o independiente diversos aspectos de la comparación entre sistemas de capacidad intermedia de tipo ferroviario y sistemas análogos basados en autobuses, el modelo desarrollado en esta tesis permite abordar el estudio comparativo desde un enfoque integrado (además de analítico o racional, basado en lo posible en procedimientos cuantitativos teóricamente robustos). Este enfoque integrado se caracteriza por incluir y analizar, de forma endógena o acoplada, las interacciones o interdependencias entre los distintos aspectos que deben ser objeto de análisis comparativo (tales como demanda potencial, operación del servicio, características o atributos de la oferta, costes y beneficios percibidos por los viajeros y atractivo para los mismos, etc.). Desde este enfoque, la modelización formal y de carácter genérico de los sistemas de interés —entendidos estos en un amplio sentido— permite, por un lado, la aplicación del análisis comparativo a una gran variedad de casos particulares de estudio que puedan resultar objeto de evaluación. Por otra parte, dicha modelización formal resulta imprescindible para poder establecer unas mismas condiciones de contorno en la comparación entre los dos tipos fundamentales de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia, de forma que ambos puedan ser juzgados bajo unas mismas ‘reglas de juego’.

Así pues, el diseño y desarrollo de un modelo que cumpla con estas características y que, al mismo tiempo, esté enfocado específicamente al análisis comparativo del futuro comportamiento del sistema de transportes ante la implantación de un modo de transporte público de capacidad intermedia de tipo ferroviario ligero o de un sistema de autobuses semirrápidos en plataforma reservada, constituye, por sí mismo, una novedosa y muy importante aportación de la presente tesis.

En relación con el modelo desarrollado, cabe destacar también como aportación la amplia gama de variables de entrada considerada, lo que contribuye a una mayor riqueza de posibilidades en el tratamiento de los factores que potencialmente pueden influir en los resultados de los proyectos. Esta gama de variables de entrada comprende principalmente aspectos tales como las características genéricas de la línea de transporte público, características de los vehículos, criterios de operación y explotación del servicio, características de la demanda de transporte público y de la movilidad y reparto modal en los corredores o itinerarios afectados, características de las condiciones de viaje en vehículo motorizado privado, costes unitarios relativos al tiempo de viaje, costes unitarios relativos al consumo de energía en vehículo motorizado privado, etc.

Otra aportación destacable del modelo es la capacidad para incorporar explícitamente un análisis diferenciado de las muy distintas condiciones de demanda, de atributos de la oferta, de costes de viaje, etc. que tienen lugar en diversos períodos horarios, tales como horas punta, horas valle, períodos



intermedios, etc. Este enfoque multiperíodo supone una importante mejora de cara a la evaluación de los beneficios y costes generados por la explotación de los proyectos, ya que analizar únicamente las condiciones de hora punta y tratar de realizar algún tipo de extrapolación ponderada de los resultados de dicho período a la totalidad del horario de servicio del transporte público podría introducir importantes distorsiones en la cuantificación de dichos beneficios y costes.

Otra característica del modelo que se puede subrayar como aportación es la diferenciación explícita de varias fases a lo largo del horizonte o período de evaluación en relación con las distintas etapas que tienen lugar en la implantación y posterior explotación de los sistemas de transporte público, realizándose al respecto una segmentación temporal del horizonte de evaluación. En particular, la incorporación en el modelo de la fase de implantación de los nuevos sistemas de capacidad intermedia permite introducir en la evaluación el efecto de los costes de interrupción que se producen con la construcción de la nueva infraestructura (en este caso, generados a partir de la restricción de capacidad varía para el tráfico general en el eje, corredor o itinerario afectado).

También se puede citar como aportación del modelo la inclusión de un enfoque multimodal (al menos a un nivel básico), sin limitarse a analizar de forma aislada el rendimiento del modo de transporte público en cuestión. Este enfoque multimodal permite incorporar a la modelización efectos cruzados en las condiciones de oferta y demanda en las que se desarrollan los viajes en otras opciones modales. Esto es particularmente importante para la evaluación de los efectos producidos sobre los viajes en vehículo motorizado privado, ya que los cambios en la oferta y en la demanda de transporte público originados por la introducción y servicio de los nuevos sistemas de capacidad intermedia pueden alterar sensiblemente los costes de viaje soportados por los usuarios de vehículos motorizados privados, así como el volumen de viajes efectuados en estas modalidades de transporte (efectos de sustitución), con las consiguientes repercusiones en la evaluación de los costes externos generados en total por dichos viajes.

Otra aportación significativa y novedosa radica en la implementación explícita en el modelo de simulaciones aleatorias de acuerdo al método de Montecarlo, de forma que se satisfacen completamente las necesidades del nivel metodológico más elevado de análisis de riesgo en la evaluación. En particular, se ha acometido, por una parte, el tratamiento metodológico de la incertidumbre mediante la aleatorización de un extenso conjunto de variables de entrada en las que los datos disponibles podrían estar previsiblemente sujetos a un nivel relevante de imprecisión. Por otro lado se ha considerado la existencia de incertidumbres metodológicas o de modelización mediante la aleatorización de ciertas funciones o variables de cálculo del modelo sobre las que —por la necesidad de introducir simplificaciones y/o hipótesis— no se dispone de un nivel de certeza suficientemente sólido. Además, se han incorporado a la modelización de las simulaciones aleatorias las probables correlaciones entre variables, tanto si se trata de variables aleatorias distintas pero previsiblemente correlacionadas entre sí como si se trata de valores aleatorios de una misma variable que compartan alguna característica en común (por ejemplo, hacer referencia a un mismo corredor, eje o itinerario, a un mismo período horario, a un mismo sentido de viaje, etc.).

Para someter a prueba el funcionamiento práctico del modelo desarrollado y poder aplicarlo a conjuntos particulares de datos se ha procedido además a su implementación como código ejecutable sobre una herramienta informática de cálculo computacional<sup>266</sup>, lo que constituye una aportación necesaria para su utilización como herramienta de análisis. Asimismo, se ha procedido a aplicar dicho modelo a un ejemplo de cálculo que, aunque basado en datos artificiales, pueda resultar representativo de situaciones en las que tenga sentido plantear, de forma justificada, la posible implantación de un sistema de transporte público de capacidad intermedia. En referencia a este ejemplo de aplicación, los resultados obtenidos en el conjunto de simulaciones aleatorias del modelo han sido tratados estadísticamente, representados gráficamente, e interpretados de acuerdo a las características del caso analizado.

---

<sup>266</sup> En concreto, se ha utilizado para tal fin el software de computación numérica y análisis matemático MATLAB.

Otras posibles aportaciones metodológicas de la tesis hacen referencia al estudio de las formulaciones incrementales en los modelos sintéticos de distribución y de reparto modal (véanse epígrafes 4.2 y 4.3), introduciendo modificaciones a partir de las formulaciones básicas que permiten tratar, de forma simplificada y a nivel agregado, la influencia —no solo sobre el reparto modal, sino también en el volumen total de la demanda de viajes— de las distintas proporciones de viajeros cautivos de cada uno de los posibles modos de transporte. A tal objeto, ha sido necesario desarrollar una expresión particular para el cálculo de la variación, entre un estado original y otro modificado o alterado, del coste compuesto promediado o ponderado según las fracciones o proporciones de viajes atribuibles a usuarios cautivos de cada opción modal, incluyendo el posible cambio de dichas fracciones entre uno y otro estado.

Asimismo, otra aportación metodológica a destacar consiste en el análisis de los paralelismos o analogías entre los conceptos de coste generalizado en los modelos agregados y de utilidad sistemática o representativa en los modelos de elección discreta (epígrafe 4.5). Del análisis de dichos paralelismos se ha derivado la interpretación dual del parámetro  $\lambda$  (interviniente en la formulación del reparto modal y en el cálculo del coste compuesto de viaje) como utilidad marginal del ingreso y como parámetro inversamente proporcional a la variabilidad o dispersión de la desutilidad percibida en sus viajes por los individuos que conforman el grupo o segmento en estudio (esta dispersión o variabilidad es la que permite que viajeros de un cierto grupo o segmento tomen opciones que aparentemente no minimizan la parte observada de la función de coste generalizado). Se deduce que ambas interpretaciones, complementarias entre sí e inseparables o indistinguibles en la práctica, están fusionadas en un único valor.

Otras aportaciones en aspectos específicos llevadas a cabo durante el desarrollo de la tesis incluyen, por ejemplo, la definición, como parámetro simplificador, del índice de simultaneidad o equilibrio entre los procesos de subida y bajada de pasajeros a lo largo del conjunto de paradas de una línea de transporte público (epígrafe 5.5.3). También se puede mencionar como aportación puntual el desarrollo explícito de funciones de transformación de valores de una variable aleatoria inicial con distribución uniforme a una distribución triangular simétrica o asimétrica y, especialmente, de una variable con distribución triangular (ya sea simétrica o asimétrica) a otra distribución triangular de diferentes parámetros (véase epígrafe 6.2.2). También en relación con la aleatorización del modelo, se analizó la forma de obtener variables aleatorias con distribuciones triangulares y cuyos valores estén parcialmente correlacionados entre sí a partir de las combinaciones lineales  $A=m \cdot X+n \cdot Y$  y  $B=m \cdot X+n \cdot Z$ , siendo  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  tres variables aleatorias independientes con distribución uniforme estándar, y  $m$  y  $n$  dos coeficientes que han de tomar el mismo valor ( $\frac{1}{2}$ ) para que las variables aleatorias obtenidas  $A$  y  $B$  correspondan a distribuciones triangulares, resultando estas simétricas y con un coeficiente de correlación de Pearson entre variables igual a  $\frac{1}{2}$  (véase epígrafe 6.2.3). Otra aportación particular que podría mencionarse es el desarrollo de un multiplicador promediado del coste unitario del tiempo de viaje en transporte público por efecto del nivel de aglomeración de pasajeros en los vehículos (epígrafe 8.3.5.2), de tal forma que se tengan en cuenta en dicho factor, de manera agregada y a lo largo de la línea, las distintas circunstancias que pueden ser experimentadas por el conjunto de pasajeros durante su viaje a bordo del vehículo de transporte público (pasajero sentado sin existencia de pasajeros de pie, pasajero sentado con presencia de pasajeros de pie, o pasajero efectivamente de pie), junto con los efectos de la densidad media de viajeros de pie calculada para el caso de estas dos últimas situaciones. Otra aportación que puede señalarse por su originalidad es el desarrollo de un procedimiento auxiliar que, a falta de datos específicos, puede ser utilizado para estimar tiempos medios de retraso en una línea de transporte público a partir del valor del índice de puntualidad, definido este para unos determinados límites de retraso máximo admitido y de adelanto máximo aceptable (véase epígrafe 8.3.5.4.b).

Al margen de las cuestiones más directamente relacionadas con el desarrollo del modelo, se puede destacar también como una notable aportación de la tesis la revisión del estado del conocimiento sobre los principales tipos de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia realizada en el Capítulo 2. Además de una descripción general de sus características, se ha aportado una

revisión de los estudios comparativos existentes entre sistemas de transporte ferroviario urbano o metropolitano y sistemas basados en autobuses, abordando dicha comparación desde diversos enfoques (estudios de carácter generalista o cualitativo, estudios relacionados con la demanda potencial y el atractivo para los viajeros, estudios centrados en la valoración de costes y en la evaluación de inversiones, y estudios de otros tipos). Asimismo, se ha realizado una revisión en profundidad de los estudios que han tratado con mayor nivel de detalle el análisis comparativo de los costes de implantación y de operación y mantenimiento de cada uno de los dos tipos de sistemas.

En síntesis, se puede afirmar que se ha dado cumplimiento a los objetivos de la tesis en relación con la utilidad final de la investigación, proporcionando una herramienta capaz de servir como base para la estimación racional de gran parte de los componentes principales de una evaluación coste-beneficio *ex-ante* en la que se analice la posible implantación de un modo de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia. Al respecto, esta herramienta sienta las bases para comparar, en función de una amplia gama de variables, la rentabilidad socioeconómica de los dos principales tipos de alternativas existentes: modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT).

## 10.3. CONCLUSIONES

### 10.3.1. Conclusiones relacionadas con el enfoque metodológico adoptado

Como base de partida para el diseño de las partes del modelo dedicadas a la previsión de la demanda de viajes y del reparto modal entre las diferentes opciones de desplazamiento se recurrió al ámbito de los modelos agregados de transporte, considerando que esta clase de modelos se amoldan de una manera suficientemente adecuada al tipo de objetivos marcados para la tesis. Asimismo, suponen una forma más sencilla de abordar el problema objeto de estudio, evitando la mayor complejidad formal de los modelos desagregados y de elección discreta.

En particular, como marco teórico de referencia se adoptó un modelo gravitacional sintético de distribución y de reparto modal (véase formulación general en el epígrafe 4.2.1), a partir del cual fue necesario introducir ciertas simplificaciones y particularizaciones que permitiesen sentar las bases de un modelo de demanda de viajes y de reparto modal menos exigente en cuanto a requerimiento de datos necesarios, más fácilmente aplicable, y mejor adaptado a las limitaciones prácticas derivadas de los objetivos de la tesis. Entre estas simplificaciones se han destacado aquellas que se relacionan con la forma en la que se trata en el modelo desarrollado la segmentación de la demanda entre el grupo de viajeros que podrían escoger entre cualquiera de las opciones modales y aquellos otros grupos de individuos que deban ser considerados usuarios cautivos de un determinado modo de transporte. Asimismo, la probable limitación de información en cuanto a los volúmenes de viajes en las líneas de transporte público según cada posible par de paradas de origen y destino supuso un condicionante que condujo al tratamiento homogeneizado de cada corredor, eje o itinerario objeto de análisis.

También en relación con la configuración del modelo de demanda de viajes y de reparto modal utilizado en esta tesis, se optó por la adopción y desarrollo de formulaciones incrementales, dando lugar a modelos de pivoteo o '*pivot-point*'. La idea central que guía el desarrollo de este tipo de formulaciones y de los correspondientes modelos de pivoteo es la posibilidad de estimar la demanda futura de viajes a partir del conocimiento de los niveles iniciales de dicha demanda (en este caso el volumen total de viajes y el reparto modal entre las opciones de transporte) junto con tan solo los cambios o variaciones en los atributos o variables de nivel de servicio de las alternativas que sean previstos entre la situación de partida y la nueva situación. Esto permite prescindir del conocimiento de los valores específicos de todos aquellos atributos o variables de nivel de servicio para los que se pueda asumir que no van a cambiar entre una y otra situación (por ejemplo, en el caso del modelo se puede prescindir de los tiempos de acceso y dispersión en los viajes en la línea de transporte público si se asume que se

mantiene la posición de las paradas). Asimismo, tampoco es imprescindible conocer los valores específicos de los atributos o variables de nivel de servicio susceptibles de cambio, sino solamente la cuantía de dicha variación junto con la situación de partida en cuanto a demanda y reparto modal.

Dado que en el tipo de modelo propuesto para el desarrollo de la tesis (modelo gravitacional sintético con formulación incremental) la demanda de viajes y el reparto modal dependen —entre otros factores de mayor rigidez— del coste generalizado de viaje en las diferentes opciones modales, fue preciso plantear al respecto cuál debía ser la composición de las variaciones potencialmente experimentadas en dichos costes generalizados, en cuanto a atributos o fuentes básicas de desutilidad a incluir. En este sentido, la composición de las variaciones del coste generalizado de viaje de cada opción modal fue establecida en el modelo dependiendo del tipo de modo de transporte y teniendo en cuenta al mismo tiempo las propiedades derivadas de la utilización de una formulación incremental. Para el caso de los modos de transporte público se incluyeron en el modelo componentes del coste generalizado relacionadas con atributos como la tarifa abonada o desembolsada, el tiempo medio transcurrido a bordo del vehículo por cada viaje, la incomodidad derivada del nivel de congestión o aglomeración de pasajeros en el interior de los vehículos, el tiempo medio de espera en parada o estación, las posibles deficiencias en la fiabilidad de horarios, y el *bonus* modal asociado a metro ligero o tranvía y a BHLS o BRT con respecto al autobús convencional (donde quedan incluidos otros atributos o características de cada modo de transporte público de carácter más sutil —‘*soft factors*’— y de difícil cuantificación numérica objetiva). En lo que respecta a las opciones de transporte motorizado privado (automóvil particular y moto o ciclomotor), se incluyeron en el modelo las variaciones de coste generalizado asociadas al tiempo de viaje transcurrido a bordo del vehículo motorizado privado (incorporando las molestias adicionales experimentadas en condiciones de elevada congestión viaria), a la irregularidad, variabilidad o incertidumbre del tiempo de trayecto, al gasto por consumo de energía del vehículo (ya sea en forma de combustibles o de energía eléctrica, según el caso) y a otros costes modales que pudiesen considerarse aplicados de forma exógena (por ejemplo, costes de aparcamiento o posibles peajes urbanos o metropolitanos). Por su parte, para los modos no motorizados las limitaciones del modelo llevaron a considerar únicamente variaciones de coste generalizado cuyos valores hayan sido previstos por el analista en forma de ‘*inputs*’ o datos de entrada.

Con respecto al diseño de la estructura de datos del modelo, fue necesario tener presentes los requisitos derivados del tratamiento metodológico de la incertidumbre asociada a los valores de las variables de entrada. Así pues, se hubo de distinguir entre aquellos tipos de datos para los que se puede proponer la especificación de un único valor o valor fijo (al entenderse que pueden habitualmente ser conocidos con un nivel adecuado de precisión y certidumbre) y aquellos otros para los que debe preverse que en general puedan estar sometidos a un considerable nivel de incertidumbre, de forma que sea más apropiado tratarlos desde un principio como una variable aleatoria. Esta segunda clase de datos requieren especificar los parámetros estadísticos de su distribución de probabilidad, habiéndose adoptado al respecto distribuciones triangulares. Este tipo de distribuciones de probabilidad aparecen contempladas como adecuadas —e incluso recomendadas— para el análisis de riesgos e incertidumbres en la evaluación de proyectos de transporte en varios manuales o documentos en los que se trata esta cuestión (de Rus *et al.*, 2006: pp. 47-48; EC-DGRP, 2008: pp. 236-237; de Rus *et al.*, 2010: p. 24).

En relación con los procesos de aleatorización estadística de las simulaciones del modelo, han resultado de utilidad las propiedades que se derivan de la obtención de distribuciones triangulares simétricas como suma de dos variables aleatorias independientes con distribución uniforme sobre intervalos de igual anchura (en particular las correlaciones existentes entre las variables obtenidas cuando una de las variables independientes que se suman actúa como sumando común para varias de las variables resultantes). También fue preciso definir funciones de transformación entre los valores extraídos de una variable aleatoria inicial de distribución conocida y los de otra variable final para la cual se pretendan obtener, a través de dicha transformación, valores aleatorios que se ajusten a la distribución deseada para esta última variable. Para ello resultan de utilidad los métodos basados en la función inversa de la distribución acumulada. Se obtuvo así, de acuerdo a las necesidades del modelo, una función de

transformación de valores desde una variable con distribución uniforme a otra variable con distribución triangular (ya sea simétrica o asimétrica), así como otra función de transformación entre dos variables con distribuciones triangulares simétricas o asimétricas de diferentes parámetros.

También en relación con la aleatorización de las simulaciones, fue preciso configurar procedimientos diferenciados para la aleatorización directa de los datos o variables de entrada sujetos a incertidumbre y para la aleatorización primigenia o inicial de aquellas funciones o variables de cálculo del modelo que se hayan considerado sometidas a una notable incertidumbre metodológica o incertidumbre de modelización. En este segundo caso, el procedimiento de aleatorización inicial o primigenia requirió la generación de variables aleatorias auxiliares y la extracción de valores de las mismas, quedando estos reservados para su posterior utilización por las funciones de cálculo del modelo sujetas a incertidumbre metodológica.

El efecto de la aleatoriedad introducida en las simulaciones del modelo, tanto a nivel de los datos o variables de entrada como a nivel de incertidumbre metodológica o de modelización, se ha traducido en la obtención de múltiples valores aleatorios —tantos como simulaciones efectuadas— para cada uno de los resultados de interés del modelo, de tal modo que cada una de las variables obtenidas como resultado del modelo constituye en sí misma una variable aleatoria. Por tanto, cada una de estas variables aleatorias obtenidas como resultado presenta su propia distribución de valores, la cual puede ser estudiada a través de ciertos parámetros estadísticos de interés (por ejemplo, media, desviación típica, valores de diversos percentiles, etc.), junto con la representación de histogramas de frecuencias relativas de los valores obtenidos (véanse múltiples ejemplos a lo largo del epígrafe 9.3). La observación y análisis de estos histogramas permite concluir que, con notable generalidad (aunque con la excepción de aquellas variables-resultado más estrechamente ligadas al intervalo redondeado o ‘discretizado’ obtenido para la operación del transporte público), la distribución estadística de las variables aleatorias resultantes tiende a presentar una forma sensiblemente intermedia entre una distribución triangular (tal como se asumió para los datos de entrada y para las funciones de cálculo del modelo sujetas a incertidumbre metodológica) y una distribución normal con sus ‘colas’ truncadas. Se han observado asimismo diferentes niveles de asimetría en las distribuciones de las variables aleatorias obtenidas como resultado, lo cual depende en gran medida de la mayor o menor asimetría introducida en aquellas variables de entrada utilizadas como datos y que presenten un mayor grado de influencia en el cálculo de la variable-resultado. No obstante, en función de los resultados observados para el ejemplo de aplicación numérica analizado a lo largo del Capítulo 9, cabe apuntar que la asimetría de las distribuciones obtenidas es en general reducida o, como máximo, moderada en algunos casos.

Por otra parte, para desarrollar el núcleo fundamental del modelo fue necesario sistematizar las interacciones o interdependencias mutuas entre los siguientes niveles principales de procesos:

- Cuantificación de la demanda: caracterizada mediante los volúmenes de viajes (viajes/hora) en cada una de las opciones modales, junto con la suma o volumen total correspondiente al conjunto de opciones.
- Caracterización dinámica de la oferta: consistente en la determinación de valores para las variables de operación del servicio de transporte público y para las variables representativas de los atributos o características que las diferentes opciones modales presenten para los potenciales viajeros. Dado que los valores de muchas de estas variables están notablemente influenciados por el volumen de viajes en cada modo, dicha influencia ha tenido que ser contemplada por el modelo (oferta dinámica).
- Valoración del conjunto de opciones o alternativas: consistente en realizar una valoración combinada de cada opción modal (por medio del concepto de coste generalizado) en función de los atributos presentados por dicho modo de transporte y de la apreciación relativa que los viajeros harían de cada uno de esos atributos, así como una valoración global del conjunto total de opciones modales disponibles (mediante el coste compuesto de viaje).

- Estimación de las elecciones agregadas de los viajeros: consistente en la determinación del reparto modal en función de los cambios en la valoración de cada opción o alternativa (es decir, de los cambios en el coste generalizado de viaje de cada una de ellas), al mismo tiempo que la evolución del coste compuesto de viaje del conjunto de alternativas influye, a través del proceso de distribución de viajes, en el volumen total de desplazamientos realizados sobre el corredor, eje o itinerario objeto de análisis.

El sistema acoplado formado por estos cuatro niveles de procesos requirió, para la obtención de soluciones de equilibrio que satisfagan simultáneamente las ecuaciones implicadas en los diferentes niveles, la aplicación de procedimientos iterativos que se plasmaron en la construcción de diferentes módulos de cálculo. La puesta en marcha de estos procedimientos iterativos requirió asimismo el desarrollo de aproximaciones iniciales referidas a las cuotas de reparto modal y al volumen total de viajes (por hora) en el conjunto de opciones modales, de forma que estas aproximaciones iniciales pudiesen ser utilizadas como punto de partida en el arranque de la primera iteración.

En relación con el uso de los resultados del modelo para la evaluación de los beneficios generados a los viajeros a consecuencia de la implantación de cada uno de los sistemas de transporte público de capacidad intermedia, se analizó la utilización de varias formulaciones basadas en la ‘regla de la mitad’ como procedimiento de estimación cuantitativa de las variaciones en el excedente de los viajeros. Se estudiaron las formulaciones más típicamente utilizadas (ya sea con un enfoque unimodal o multimodal), pero también se analizó la posibilidad de utilizar el coste compuesto como medida de evaluación en virtud de las propiedades de las funciones de tipo ‘logsum’. Así pues, se observó que mientras que las formulaciones típicas se basan en computar el volumen de viajes y el coste generalizado de cada uno de los modos de transporte contemplados (ya sea uno solo en el enfoque unimodal o varios en el multimodal), la formulación alternativa emplea en su lugar el volumen total de viajes en el conjunto de opciones modales y el coste compuesto de viaje asociado a dicho conjunto. Esta nueva formulación presenta algunas ventajas, especialmente en el caso de aquellos proyectos o intervenciones consistentes en introducir una opción o alternativa totalmente nueva (que además no reemplace o sustituya a alguna de las anteriores que pueda ser considerada como asimilable), de tal forma que se produce en dichos casos un cambio en el número de alternativas disponibles. No obstante, para el análisis de los resultados del ejemplo de aplicación numérica, se optó por la formulación ‘clásica’ de la ‘regla de la mitad’ con un enfoque multimodal, ya que esta permite desglosar o diferenciar de una forma más explícita la atribución de los cambios totales en el excedente de los viajeros a los distintos modos de transporte en los que se haya alterado el coste generalizado de realizar el viaje en dicha opción modal (facilitando por tanto la identificación de los tipos de viajeros beneficiados y perjudicados). Por su parte, las conclusiones prácticas que se derivan de dicho ejemplo de aplicación numérica formarán parte ya del epígrafe 10.3.2.

En resumen, a lo largo de la tesis se ha puesto de manifiesto —tanto a nivel teórico como posteriormente a nivel práctico— la viabilidad metodológica del enfoque de modelización planteado, así como la utilidad del modelo desarrollado como herramienta de predicción y análisis de la evolución futura esperable de las condiciones de transporte de viajeros en un determinado corredor, eje o itinerario, ante la implantación de cada uno de los principales sistemas de transporte público de capacidad intermedia (o, de ser el caso, ante la continuidad del servicio de autobús convencional preexistente). Asimismo, el enfoque de modelización adoptado se ha confirmado como adecuado para la finalidad de servir como base fundamental de una evaluación coste-beneficio *ex-ante* de los hipotéticos planes de implantación de cada uno de los sistemas de transporte público de capacidad intermedia (especialmente en lo relativo a la valoración del excedente o beneficios generados para el conjunto de viajeros). Como avances de mayor alcance con respecto a modelos o análisis comparativos previos llevados a cabo con similares objetos de estudio se puede destacar, por un lado, el desarrollo de un modelo capaz de recoger, combinar y acoplar, de forma efectiva y detallada, los diversos aspectos metodológicos de modelización reseñados a lo largo de este epígrafe, solventando las dificultades de integración práctica de los distintos enfoques parciales de modelización y obteniendo como resultado final una herramienta de cálculo

autónoma y completa, de la cual se ha sometido a prueba su funcionamiento práctico. Se trata, en síntesis, de un modelo desarrollado desde un enfoque más amplio e integral que los análisis y modelos previos, incorporando además una mayor profundidad en el tratamiento de los efectos endógenos o acoplados entre los diversos aspectos potencialmente implicados (demanda de viajes, reparto modal, operación del transporte público, atributos ofrecidos por las opciones o alternativas modales, costes generalizados de viaje, etc.). Por otra parte, cabe destacar complementariamente la plena incorporación al modelo del tratamiento de la incertidumbre en respuesta al nivel metodológico más elevado de análisis de riesgo en la evaluación. En este sentido se han desarrollado detalladamente los procedimientos de aleatorización del modelo y se han implementado múltiples simulaciones aleatorias del mismo en aplicación del método de Montecarlo, lo cual ofrece a su vez posibilidades más potentes para un análisis estadístico exhaustivo de los resultados obtenidos.

### **10.3.2. Conclusiones relacionadas con la evaluación comparativa de sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia**

#### **10.3.2.1. Conclusiones relativas a los costes de implantación y de operación y mantenimiento**

La revisión de los estudios (FGSV, 2008; Hodgson, 2011; Hodgson *et al.*, 2013) que han examinado con mayor grado de detalle y nivel de desglose el análisis comparativo de los costes de implantación y de operación y mantenimiento de los modos ferroviarios urbanos ligeros (metro ligero o LRT) y de los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BRT o BHLS) ha indicado que el coste de inversión inicial para poner en marcha un sistema de este último tipo se sitúa algo por debajo de los dos tercios ( $\frac{2}{3}$ ) del que se requeriría para un sistema equivalente de rodadura ferroviaria (metro ligero o LRT). De acuerdo a los citados estudios, los costes de implementación de los sistemas de metro ligero o LRT se sitúan en torno a los 20–21 M€/km, mientras que para un sistema equivalente basado en autobuses (BRT o BHLS) dichos costes serían del orden de 12 a 14 M€/km.

En el apartado de costes de operación y mantenimiento se ha observado sin embargo una mayor disparidad de conclusiones. Según FGSV (2008), estos costes resultarían casi un 18% menores para los sistemas BRT o BHLS si se imponen condiciones de igual capacidad de los vehículos y misma frecuencia de operación. En cambio, según Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013), aunque los costes de operación y mantenimiento de los sistemas BRT/BHLS serían casi un 35% inferiores que para el metro ligero en proporción a la distancia recorrida por los vehículos (coste por vehículo-km), resultan sin embargo un 19% mayores en relación a la capacidad de transporte de viajeros (coste por plaza-km). En esta disimilitud de resultados se aprecia por tanto la influencia de la diferente capacidad de los vehículos que habitualmente son utilizados en uno y otro sistema.

Como conclusión final, se ha encontrado, de acuerdo a los estudios anteriormente citados, que el coste total anual de producción del servicio de transporte (entendiendo como tal el coste anualizado de amortización del capital invertido en infraestructuras y vehículos más los costes anuales de operación y mantenimiento) es inferior en los sistemas de BRT/BHLS en comparación con los de metro ligero o LRT: un 33% menor según FGSV (2008) y un 8% inferior de acuerdo a Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013). Sin embargo, a raíz de los resultados aportados por estos últimos autores, se puede deducir que el coste total puesto en relación al número de plazas-km resulta ligeramente menor para el sistema de metro ligero o LRT a pesar de que el coste total por vehículo-km sea sin embargo casi un 43% inferior para el BRT/BHLS. Según FGSV (2008), este coste total de producción del servicio se situaría alrededor de 0.078 €/plaza-km para el sistema de metro ligero y en aproximadamente 0.052 €/plaza-km para el de BRT o BHLS, mientras que de acuerdo a los datos de Hodgson (2011) y Hodgson *et al.* (2013) cabría hablar en ambos casos de costes totales de producción del servicio en torno a 0.20 €/plaza-km (muy superiores en todo caso a los señalados en el estudio anterior).

### 10.3.2.2. Conclusiones relativas al excedente de los viajeros

Tal como se ha visto, en el Capítulo 9 fue desarrollado un ejemplo de aplicación numérica basado en un conjunto de datos que, aunque de origen artificial, han sido elegidos procurando que puedan resultar representativos de situaciones en las que sería procedente plantear la posible implantación de un sistema de transporte público de capacidad intermedia. Dicho ejemplo de aplicación numérica se caracteriza, a muy grandes rasgos, por analizar una línea de transporte público de 10 km de longitud, con un número total anual de pasajeros cifrado, para el año base, en 10,000,000 pax/a, y con unas cuotas de reparto modal inicial (en el año base) que, dependiendo del período horario, se sitúan alrededor de entre el 15% y el 25%. Las conclusiones que se derivan de este ejemplo de aplicación deben ser tomadas por tanto con carácter orientativo (en función de la mayor o menor similitud de cada caso real con el caso planteado), teniendo presente que los resultados obtenidos se refieren meramente a unos datos particulares.

Bajo las premisas del ejemplo de aplicación numérica, se ha obtenido que el escenario 'R' (implantación en la línea de un sistema de metro ligero o tranvía moderno) genera un incremento de excedente para el conjunto de viajeros que utilizan el corredor, eje o itinerario objeto de estudio cuyo valor actualizado y totalizado a lo largo del horizonte o período de evaluación supera moderadamente al que se produciría en el escenario 'B' (implantación de una línea de BHLS o BRT). Esto significa que, desde el punto de vista estrictamente de los beneficios o aumentos de bienestar o satisfacción percibidos de forma directa por el conjunto total de usuarios y viajeros afectados en sus desplazamientos por la intervención en el corredor o eje, el escenario 'R' presentaría unos resultados moderadamente mejores que los del escenario 'B'. Esta superioridad parcial del escenario 'R' se mantiene, en mayor o menor medida, para cualquier tasa social de descuento comprendida entre el 0% y el 10%, si bien se ha observado que la diferencia en favor de dicho escenario tiende a ser algo más amplia con tasas de descuento más bajas y más reducida con tasas de descuento más elevadas.

En concreto, con una tasa social de descuento del 3.5%, el valor actualizado del incremento de excedente de los viajeros generado en el escenario 'R' se sitúa, de media, en los 517.3 M€ (en comparación con el escenario base de referencia), con una probabilidad del 97.5% de que se llegue al menos a los 295.9 M€ y un 2.5% de posibilidades de superar los 778.9 M€. Por su parte, el escenario 'B' generaría, como promedio, un incremento en el excedente de los viajeros con un valor actual de 457.0 M€, con un 97.5% de probabilidades de alcanzar al menos los 257.2 M€ y un 2.5% de posibilidades de que se superen los 692.4 M€. La variabilidad o dispersión de estos resultados, valorada a través de su desviación típica o estándar, es bastante similar para ambos escenarios, aunque un poco más alta para el escenario 'R' (desviación típica de 124.1 M€) que para el escenario 'B' (desviación típica de 110.2 M€). El análisis de los histogramas de frecuencias relativas (véase Figura 9.91) también permite concluir que la asimetría de las distribuciones es, para las condiciones del ejemplo desarrollado, muy similar en ambos casos, con una asimetría de valores moderados y de signo positivo ('cola' de la distribución más desarrollada hacia la parte derecha). También es muy similar la curtosis de la distribución de valores de este resultado tanto en uno como en otro escenario, dando lugar a distribuciones ligeramente leptocúrticas (es decir, con un pequeño exceso positivo de curtosis con respecto a la distribución normal).

Por otra parte, debe indicarse que, ya sea en el escenario 'R' o en el escenario 'B', los beneficios para los viajeros proceden precisamente de los desplazamientos realizados en transporte público (tal como sería previsible, dado el tipo de proyectos), mientras que los viajes en vehículos motorizados privados (automóviles y motos o ciclomotores) resultarían moderadamente perjudicados durante horas punta y apenas afectados en horas valle.



### 10.3.2.3. Conclusiones preliminares relativas a la rentabilidad socioeconómica de los proyectos

Para posibilitar, de acuerdo al tipo de resultados obtenidos en el ejemplo de aplicación, la extracción de unas conclusiones preliminares en relación con la potencial rentabilidad socioeconómica de estos proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia, se tomó como aproximación orientativa la comparación entre el incremento de excedente generado para los viajeros y la inversión inicial estimada para la implantación y puesta en servicio de cada uno de los dos modos de capacidad intermedia. Estos dos elementos intervinientes en la evaluación coste-beneficio (incremento de excedente de los viajeros y costes de inversión inicial) son previsiblemente los que dan lugar a unas diferencias de mayor magnitud en los beneficios y costes comparados con la situación prevista para el escenario base.

Así pues, de acuerdo a los datos indicados en el Capítulo 2, para una línea de 10 km de longitud como la analizada en el ejemplo de aplicación se estimaron unos costes orientativos de implantación y puesta en servicio de alrededor de 210 M€ para el escenario 'R' (metro ligero o tranvía) y del entorno de 130 M€ para el escenario 'B' (BHLS o BRT).

En general, se ha observado en el caso planteado como ejemplo que, excepto para tasas sociales de descuento muy elevadas, el incremento de excedente de los viajeros generado por estos proyectos de implantación de sistemas de capacidad intermedia supera a los costes de inversión inicial. Más específicamente, para una tasa social de descuento del 3.5%, la diferencia entre el beneficio producido en forma de incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial se ha cifrado, en valores medios, en 307.3 M€ en el caso del escenario 'R' y en 327.0 M€ en el escenario 'B'. Si bien es cierto que para un análisis más exhaustivo sería preciso incluir también otros componentes de la evaluación coste-beneficio tales como las posibles diferencias entre escenarios en los costes de operación y mantenimiento del transporte público y en las externalidades o costes externos generados por el conjunto de viajes, la gran amplitud de la diferencia (positiva) entre el valor actual del incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial ha permitido concluir que la implantación de sistemas de capacidad intermedia en un caso similar al analizado conduciría muy probablemente a una rentabilidad socioeconómica positiva. Además, dicha diferencia continuaría resultando positiva incluso si se tomasen para el incremento de excedente de los viajeros los valores del percentil 2.5, los cuales presentan una muy alta probabilidad (97.5%) de ser sobrepasados. Este hecho ha llevado a señalar que el principal riesgo para la rentabilidad socioeconómica de los proyectos analizados vendría del lado de los posibles sobrecostes en la implementación de tales proyectos.

La siguiente cuestión sobre la que podrían derivarse conclusiones del ejemplo de aplicación numérica se refiere a cuál de los dos tipos de modos de capacidad intermedia sería previsiblemente capaz de aportar un mayor valor neto a la sociedad. El resultado más relevante al respecto al que es posible recurrir ha indicado que, tomando los valores medios del incremento de excedente de los viajeros y una tasa social de descuento del 3.5%, la diferencia entre el valor actualizado del beneficio para los viajeros y el coste de inversión inicial resulta favorable al escenario 'B', aunque por un margen relativamente estrecho. Tal como se indicó anteriormente, dicha diferencia se ha estimado en 327.0 M€ para el escenario 'B' y en 307.3 M€ para el escenario 'R' (es decir, unos 20 M€ de ventaja a favor del escenario 'B', lo cual representa aproximadamente un 6% del montante calculado para el escenario 'R'). A tenor de esta limitada diferencia, no es posible descartar de antemano que la misma pudiese llegar a ser compensada —o incluso superada— por los resultados previsiblemente algo mejores de los sistemas de metro ligero o tranvía en el apartado de reducción de costes externos (si bien sería necesario precisar también, entre otras cuestiones, la fuente de energía empleada por los autobuses del sistema de BHLS o BRT). Por su parte, el papel que los costes de operación y mantenimiento del transporte público jueguen en favor de uno u otro sistema no es una cuestión que pueda ser dilucidada de antemano debido fundamentalmente a la disparidad de datos encontrada al respecto, pero parece poco probable que las posibles ventajas que alguno de los sistemas pudiese presentar en este apartado llegasen a desempeñar un papel de una

trascendencia comparable a la de las diferencias en el excedente de los viajeros y en los costes de inversión inicial.

También se ha observado que si se adoptase una tasa social de descuento del 6% (la propuesta en su momento por el *'Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades'* (MFOM, 1996: p. 120)), la diferencia en favor del escenario 'B' en el balance entre el valor actualizado del incremento de excedente de los viajeros y el coste de inversión inicial se amplía a unos 45 M€. Una conclusión adicional en relación con la influencia de las tasas sociales de descuento es que las tasas de mayor cuantía resultan más favorables al escenario 'B' (BHLS o BRT), mientras que las tasas más bajas son más proclives a favorecer al escenario 'R' (metro ligero o tranvía).

En síntesis, la magnitud de la ventaja obtenida para el escenario 'B' en términos de la diferencia entre el incremento de excedente de los viajeros y los costes de inversión inicial parece —en ausencia de una evaluación más exhaustiva de aspectos como las externalidades y los costes de operación y mantenimiento de cada sistema— demasiado escasa como para poder determinar concluyentemente una mayor rentabilidad socioeconómica del escenario 'B'. La comparación entre sistemas en el caso de aplicación planteado se encuentra más bien en una situación próxima al 'empate técnico', aunque teniendo presente que los resultados parciales obtenidos muestran una moderada ventaja en favor del sistema de BHLS o BRT.

#### 10.4. OPORTUNIDADES DE MEJORA

A continuación se apuntan brevemente algunas de las posibilidades de introducción de mejoras en el modelo que han podido ser identificadas a lo largo del desarrollo de este. Estas oportunidades de mejora estarían relacionadas fundamentalmente con la superación de las simplificaciones que fue necesario incorporar en el diseño del modelo al objeto de hacerlo más fácilmente aplicable y menos exigente en cuanto al requerimiento de datos.

Una de las más importantes posibilidades de mejora se relacionaría con incorporar una zonificación más apropiada del área de influencia de las líneas de transporte público en lugar del enfoque homogeneizado adoptado para cada corredor, eje o itinerario, de forma que se operase realmente con matrices de viaje origen-destino. Idealmente esta zonificación debería adaptarse al área de captación de viajeros de cada parada o estación. Además, con este planteamiento se podrían tratar de forma diferenciada tanto los volúmenes de pasajeros por cada sección o tramo entre paradas como los volúmenes o intensidades de tráfico mixto por cada tramo equivalente. Complementariamente, las características de los viales de circulación para el tráfico general (capacidad viaria, velocidad de trayecto en condiciones de volumen nulo de tráfico, parámetros de las funciones 'volumen-retardo', etc.) deberían preferiblemente ser especificadas para cada tramo entre paradas, en lugar de asumir valores medios para todo el corredor, eje o itinerario. No obstante, este planteamiento de zonificación a nivel de parada podría presentar importantes limitaciones prácticas en cuanto a disponibilidad de información (tal como se vio en el epígrafe 3.7.4), además de aumentar muy notablemente la complejidad de los procesos de resolución práctica del modelo de demanda.

Otra notable posibilidad de mejora consistiría en aumentar los niveles de detalle en la segmentación de las características de la población de potenciales viajeros. Esta mejora de la segmentación poblacional podría enfocarse tanto en relación con los conjuntos de opciones modales disponibles (considerando todos los posibles conjuntos de elección que pudiesen ser formados con uno, varios, o todos los modos de transporte incluidos en la modelización) como en referencia a las características socioeconómicas de los viajeros (por ejemplo, en función de los niveles de renta y/o de los motivos de viaje). Consecuentemente, el modelo de demanda de viajes y de reparto modal debería ser aplicado de forma separada a cada segmento o categoría de viajeros, evitando en la medida de lo posible la agregación de diferentes grupos y la utilización de valores promediados. Nuevamente, este mayor nivel de segmentación

repercutiría en una mayor complejidad de los procedimientos de resolución práctica del modelo de demanda.

También podría considerarse como una oportunidad de mejora el abordar un tratamiento más detallado de la operación de los modos de transporte público, particularmente en lo referente a las intersecciones a nivel de los modos de capacidad intermedia en plataforma reservada con otros tráficos, teniendo en cuenta factores como la densidad de intersecciones, el tipo de sistema (pasivo, activo o en tiempo real), el tipo de estrategia (condicional o incondicional), etc. Asimismo, una hipotética disponibilidad de datos de subidas y bajadas de pasajeros especificados a nivel de parada (en concordancia con el planteamiento de zonificación de orígenes y destinos de los viajes) permitiría modelizar con mayor precisión los tiempos de detención correspondientes a cada una de esas paradas.

Por otra parte, en relación con el tratamiento de los modos de transporte no motorizados y de 'micromovilidad' (bicicleta, otros pequeños vehículos urbanos de movilidad personal, viajes a pie, etc.), una posible oportunidad de mejora consistiría en incorporar a la modelización algún tipo de influencia endógena sobre los atributos de viaje de dicho tipo de opciones modales. Esta influencia podría estar relacionada por ejemplo con el volumen de tráfico mixto, de forma que un menor volumen de tráfico redujese el coste generalizado de viaje atribuido a estos modos (mayor seguridad de circulación, condiciones más placenteras, etc.) y los hiciese por tanto más atractivos, sucediendo a la inversa en el caso de mayores volúmenes de tráfico.

Con respecto a los procedimientos de aleatorización de las simulaciones del modelo, se podría considerar la posibilidad de una potencial mejora en la forma en la que se tratan las correlaciones entre variables. En este sentido, se podría introducir la posibilidad de ajustar el valor del coeficiente de correlación de Pearson para cada par de variables presumiblemente correlacionadas entre sí de acuerdo al mayor o menor grado de correlación esperable (haciendo uso de la ecuación 6.24 y determinando los correspondientes coeficientes  $m$  y  $n$ ). Esta mejora permitiría que no fuese necesario emplear siempre un mismo valor fijo del coeficiente de correlación de Pearson ( $1/2$ ) para todas aquellas parejas de variables para las cuales se previese un nivel intermedio de correlación positiva. No obstante, de cara al posible desarrollo de esta potencial mejora, debe tenerse presente que con ello ( $m \neq n$ ) se pierde la propiedad de que las variables aleatorias resultantes ( $A$  y  $B$  en la notación del epígrafe 6.2.3) correspondan a distribuciones triangulares, por lo que serían necesarias además readaptaciones más profundas en los procedimientos de aleatorización del modelo.

En relación con la modelización de la evolución futura de ciertas variables exógenas aportadas como datos del modelo, una oportunidad de mejora se basaría en generalizar la posibilidad de indicar tasas de variación con valores mínimo, máximo y de la moda específicos para cada año en particular del horizonte o período de evaluación. Esta oportunidad podría ser particularmente relevante en el caso de las tasas de evolución futura del volumen total de viajes debido a factores exógenos.

Ya desde un punto de vista más amplio y general, una posibilidad de mejora de gran calado —aunque lógicamente con unas implicaciones trascendentales en cuanto a la complejidad de desarrollo del modelo— consistiría en afrontar el tratamiento de las líneas en las cuales se estudia la implantación de un modo de capacidad intermedia como parte de una red de transporte público, en lugar de analizar cada línea de manera aislada. Este enfoque llevaría a considerar interacciones o efectos de red entre diferentes líneas, como es el caso, por ejemplo, de posibles transbordos entre ellas. Este planteamiento de red se podría hacer extensible incluso a la red viaria de transporte motorizado privado, considerando en este caso diversas rutas alternativas en la etapa de asignación de viajes en automóvil o moto/ciclomotor, de forma que pueda analizarse el tráfico desviado desde el corredor, eje o itinerario afectado hacia otras posibles rutas de la red.

## 10.5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Al margen de las posibles mejoras identificadas en el epígrafe 10.4, las líneas de investigación que de forma más evidente se derivan de esta tesis están relacionadas con las posibilidades que el modelo desarrollado ofrece para su posterior uso como herramienta de análisis. Por tanto, dichas líneas de investigación emanan de la capacidad del modelo para proporcionar como resultados aquellos ‘inputs’ o datos que, referidos al ámbito de la modelización de las variables de transporte, son necesarios para una adecuada estimación de los componentes principales de una evaluación coste-beneficio *ex-ante* de los dos principales tipos de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de capacidad intermedia.

Así pues, una primera rama de líneas de investigación se relacionaría con llevar a término un modelo completo de evaluación coste-beneficio *ex-ante* que permita comparar exhaustivamente la rentabilidad socioeconómica de los modos ferroviarios ligeros (metro ligero o tranvía moderno) y de los sistemas de autobuses semirrápidos en plataforma reservada (BHLS o BRT). Para ello deberían desarrollarse en particular las siguientes líneas o actividades:

- Valoración de los costes de inversión inicial (analizados en el epígrafe 2.3.2.1) a su coste social de oportunidad, para lo que generalmente se emplearían los denominados ‘precios sombra’. En este sentido, sería de utilidad el desglose de los componentes de coste por tipos de recursos empleados (mano de obra, materiales, uso de maquinaria, equipamientos tecnológicos, etc.).
- Valoración de los costes de operación y mantenimiento en la producción del servicio de transporte público, para lo cual, además de los costes unitarios (por vehículo, por kilómetro, por hora de servicio, etc.) estudiados en el epígrafe 2.3.2.2, se emplearían resultados derivados del modelo como la distancia total recorrida al año por el conjunto de vehículos o unidades de transporte y el tiempo de servicio acumulado anualmente por dicho conjunto de vehículos.
- Profundización en la evaluación del excedente de los viajeros, para lo que se dispone como base del estudio realizado al respecto en el epígrafe 8.6.3 y del análisis del ejemplo de aplicación presentado en el epígrafe 9.3.6.1.
- Valoración de los costes externos soportados por el conjunto de la sociedad, originados no solo por la operación de los propios modos de transporte público sino también —y fundamentalmente— por los diferentes volúmenes de viajes realizados en vehículos motorizados privados en cada uno de los escenarios. En relación con este tipo de costes, se incluirían al menos los siguientes aspectos:
  - Emisiones de contaminantes de efecto local y de gases de efecto invernadero, precursores del cambio climático. Al respecto se cuenta con la posibilidad de utilizar resultados que se derivan del modelo, como el número total de veh-km realizados anualmente en los distintos modos motorizados y el reparto por tipo de alimentación de energía. Estos resultados deberían ser combinados con los correspondientes factores de emisiones (habitualmente en g/km) y con el coste social unitario (generalmente por tonelada) de cada tipo de emisión para obtener una valoración total de esta clase de costes externos.
  - Ruido o contaminación acústica. En este sentido se partiría también de resultados relacionados con los volúmenes de tráfico y la composición del mismo (por ejemplo, según tipos de motorización) para determinar una estimación de los niveles de ruido generados. Estos resultados tendrían que ser combinados con datos sobre la población expuesta en las inmediaciones de cada corredor, eje o itinerario y con el coste social unitario por persona expuesta según el nivel de ruido soportado, de forma que se obtuviese finalmente la valoración total del coste externo por ruido o contaminación acústica generado por la circulación de vehículos. No obstante, sería preciso valorar también los efectos del ruido producido durante la construcción de las infraestructuras necesarias para la implantación de cada uno de los modos de transporte público de capacidad intermedia.

- Siniestralidad en la circulación. Se partiría al respecto de resultados del modelo referentes al número total de veh-km (o, en su caso, personas-km) calculado para cada uno de los modos de transporte, debiendo aplicarse sobre dichos resultados los datos sobre tasas medias de accidentalidad que estén disponibles para cada uno de los respectivos modos al objeto de estimar el número esperable de accidentes de circulación y de personas afectadas según la severidad de las consecuencias (lesiones leves, lesiones graves, fallecimientos, etc.). Sobre el número de afectados por nivel de severidad se aplicarían finalmente los costes unitarios por persona herida (leve, grave, etc.) o fallecida, los cuales suelen estimarse en proporción al valor de una vida estadística.

En el desarrollo de estas actividades o líneas de investigación debería idealmente mantenerse el mismo enfoque que en el modelo en lo que respecta al nivel de tratamiento metodológico de la incertidumbre, por lo que gran parte de las nuevas variables de entrada necesarias para completar la evaluación coste-beneficio tendrían que ser diseñadas como variables aleatorias sujetas a una determinada distribución de probabilidad.

Por otra parte, otra posible rama de líneas de investigación se basaría en un estudio sistematizado de múltiples casos de aplicación numérica (tales como el mostrado en el Capítulo 9), introduciendo variaciones sistemáticas en los valores de las principales variables de entrada del modelo y analizando el comportamiento de los resultados ante dichas variaciones. En este sentido, se podría estudiar la sensibilidad de los resultados ante diferentes valores de variables tales como —entre otras— la longitud de la línea analizada, el número anual de pasajeros existente en el año base para dicha línea, las cuotas de reparto modal de las que parte el servicio de transporte público en el año base, la distancia media de viaje, el coste unitario del tiempo, las capacidades viarias (antes y después de la intervención) en el respectivo eje, corredor o itinerario, etc. El análisis de estas series de resultados podría conducir al desarrollo de procedimientos simplificados (plasmados posiblemente en forma de tablas, gráficos, etc.) que permitiesen, de una forma aproximada pero relativamente rápida y sencilla, estimar cuál de las principales alternativas disponibles en materia de sistemas de transporte público urbano y metropolitano resultaría más adecuada en cada caso concreto desde el punto de vista de su rentabilidad socioeconómica.

Por último, otra posibilidad en cuanto a líneas de investigación —aunque ya desligada de los resultados de este modelo— consistiría en elaborar otro modelo de similar planteamiento general, pero específicamente diseñado para el análisis comparativo de sistemas de transporte público urbano y metropolitano de alta capacidad (*Rapid Transit*), dotados de infraestructuras de circulación de categoría A (es decir, de infraestructuras exclusivas o a distinto nivel). Por tanto, se modelizarían y compararían escenarios en los que hipotéticamente se implantaría o bien algún tipo de modo ferroviario de estas características (*'Light Rail Rapid Transit'*, metro, o incluso ferrocarril de cercanías) o bien un sistema análogo basado en autobuses (*'full-BRT'* de alta capacidad) con elevados estándares de calidad y nivel de servicio.



# Publicaciones del autor relacionadas con la tesis doctoral

## a) Artículos publicados en revistas del Journal Citation Reports (JCR)

### Como primer autor o autor principal

Conles, E., Novales, M., Orro, A., & Anta, J. (2014). Buses with High Level of Service in Nantes, France. Characteristics and Results of the BusWay Compared with Light Rail Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2418, pp. 66-73. DOI: 10.3141/2418-08

## b) Artículos publicados en otras revistas/publicaciones indexadas (no JCR)

### Como coautor

Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2012). Medium-capacity Transit Systems: Some Reflections About Making The Right Choice. *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol. 128 (Urban Transport XVIII), pp. 269-280. DOI: 10.2495/UT120241

## c) Capítulos de libros

### Como coautor

Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2014). Medium-capacity transit systems: some reflections about making the right choice. In: *Public Mobility Systems*. Pratelli, A. (ed.). WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, Vol. 78, pp. 85-96. ISBN 978-1-84564-908-1 / eISBN 978-1-84564-909-8. <https://www.witpress.com/books/978-1-84564-908-1>

## d) Comunicaciones presentadas en congresos nacionales e internacionales

### Como primer autor o autor principal

Conles, E., Novales, M., Orro, A., & Anta, J. (2014). *Bus with High Level of Service in Nantes, France. Characteristics and results of the BusWay in relation to Light-Rail Transit*. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. Washington, D.C. (EE. UU.), 12-16 de enero de 2014. Tipo de comunicación: ponencia escrita y póster.

Conles, E., Novales, M., Anta, J., & Orro, A. (2014). *Revisión de estudios económicos de comparación de costes asociados a sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia (LRT y BHLS)*. XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014). Santander, 9-11 de junio de 2014. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral.

Conles, E. (2015). *Sub-modelo estocástico integrado de demanda, características de la operación del servicio (oferta) y precio medio generalizado para el usuario destinado a la evaluación coste-beneficio de proyectos alternativos en sistemas de transporte urbano y metropolitano de capacidad intermedia*. I Campus Científico del Foro de Ingeniería del Transporte. Cercedilla (Madrid), 23-24 de abril de 2015. Tipo de comunicación: presentación oral.

### Como coautor

Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2012). *Medium-capacity transit systems: some reflections about making the right choice*. 18th International Conference on Urban Transport and the Environment (Urban Transport 2012). A Coruña, 15-17 de mayo de 2012. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral.

Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2012). *¿Autobús de alto nivel de servicio o metro ligero? Reflexiones sobre los criterios de decisión*. X Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2012). Granada, 20-22 de junio de 2012. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral.

- Anta, J., Novales, M., Conles, E., & Orro, A. (2014). *Influencia de los aspectos psicológicos en la elección de modo de transporte: modos ferroviarios frente al autobús con alto nivel de servicio*. XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014). Santander, 9-11 de junio de 2014. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral.
- Anta, J., Novales, M., Conles, E., & Orro, A. (2014). *Diseños experimentales eficientes: Revisión metodológica y aplicación a un caso de estudio para la captación de viajeros en sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia*. XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería del Tránsito, Transporte y Logística (PANAM-2014). Santander, 11-13 de junio de 2014. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral.
- Orro, A., Anta, J., Conles, E., & Novales, M. (2016). *¿Es el metro ligero más atractivo que al autobús de alto nivel de servicio?* XII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2016). Valencia, 7-9 de junio de 2016. Tipo de comunicación: ponencia escrita y presentación oral. DOI: 10.4995/CIT2016.2016.4067



# Referencias

- Abrahamse, W., & Keall, M. (2012). Effectiveness of a web-based intervention to encourage carpooling to work: A case study of Wellington, New Zealand. *Transport Policy*, Vol. 21, May 2012, pp. 45-51. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.01.005
- Akçelik, R. (1991). Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time dependent form and alternative travel time function. *Australian Road Research*, Vol. 21, Issue 3, pp. 49-59. ISSN: 0005-0164.
- Alstom. (2012). *Citadis Compact*. Product sheet.
- Alstom. (2014). *Citadis on the move. The tram solution for each city*. Sales brochure.
- Alstom. (2016). *Citadis X05. The latest evolution of Citadis*. Product sheet.
- An, J.-H. (2011). *Le choix d'un système de transport durable: analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface*. PhD thesis, Université Paris-Est, France. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00834819/document>
- ANFAC [Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones]. (2017). *Nota de prensa. 1 de agosto de 2017*. <http://www.faconauto.com/wp-content/uploads/2017/08/NP-Matriculaciones-turismos-julio-2017.pdf>
- ANFAC [Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones]. (2019). *Informe Anual 2018*. <https://anfac.com/wp-content/uploads/2019/07/ANFAC-Informe-Anual-2018.pdf>
- Anta, J. (2016). *Estudio comparativo de los factores relacionados con la elección modal en redes de transporte con sistemas de capacidad intermedia: influencia de la imagen percibida de los modos ferroviarios frente al autobús de alto nivel de servicio*. Tesis doctoral, Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/17536>
- AOPJA [Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía]. (2017). *Operación Metro Granada*. Nota de prensa 09/02/2017. [http://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia\\_estructura/92201714427.pdf](http://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia_estructura/92201714427.pdf)
- APTA BRT Working Group. (2010). *Designing Bus Rapid Transit Running Ways*. APTA-BTS-BRT-RP-003-10. APTA Standards Development Program, Recommended Practice. American Public Transportation Association. [https://nacto.org/wp-content/uploads/2016/05/2-7\\_APTA-Designing-Bus-Rapid-Transit-Running-Ways\\_2010.pdf](https://nacto.org/wp-content/uploads/2016/05/2-7_APTA-Designing-Bus-Rapid-Transit-Running-Ways_2010.pdf)
- Arrow, K.J., Cline, W.R., Mäler, K.-G., Munashinghe, M., Squitieri, R., & Stiglitz, J.E. (1996). Intertemporal equity, discounting, and economic efficiency. Chapter 4th in: *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Contribution of working group III to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Bruce, J.P., Lee, H., & Haites, E.F. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 9780521568548.
- Arrow, K.J., & Lind, R.C. (1970). Uncertainty and the Evaluation of Public Investment Decisions. *The American Economic Review*, Vol. 60, No. 3, pp. 364-378. <https://www.jstor.org/stable/1817987>
- ARUP, Institute for Transport Studies (University of Leeds) & Accent. (2015). *Provision of market research for value of travel time savings and reliability: Phase 2 Report*. Department for Transport, UK. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/470231/vtts-phase-2-report-issue-august-2015.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470231/vtts-phase-2-report-issue-august-2015.pdf)
- Asensio, J., & Matas, A. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, Issue 6, pp. 1074-1085. DOI: 10.1016/j.tre.2007.12.002
- Atkins Ltd. (2017). *The potential introduction of trams to Bath. Initial evidence-based study*. <https://democracy.bathnes.gov.uk/documents/s49556/Tram%20Report.pdf>
- ATOC [Association of Train Operating Companies]. (2005). *Passenger Demand Forecasting Handbook (v4.1)*. Passenger Demand Forecasting Council, Association of Train Operating Companies. London, UK.
- Axhausen, K.W., Haupt, T., & Heidl, U. (2001). Searching for the Rail Bonus: Results from a panel SP/RP study. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol. 1, No. 4, pp. 353-369. ISSN 1567-7141. DOI: 10.18757/ejtir.2001.1.4.3504

- Batarce, M., Muñoz, J.C., Ortúzar, J.D., Raveau, S., Mojica, C., & Ríos, R.A. (2015). Use of mixed stated and revealed preference data for crowding valuation on public transport in Santiago, Chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2535, pp. 73-78. DOI: 10.3141/2535-08
- Bates, J. (2001). Reliability – The missing model variable. Chapter 31st in: *Travel behaviour research: The leading edge*. Hensher, D.A. (ed.). Emerald Group Publishing Limited. ISBN 0080439241 / 9780080439242.
- Bates, J., Ashley, D., & Hyman, G. (1987). The Nested Incremental Logit Model: Theory and Application to Modal Choice. *Transportation planning methods: proceedings of Seminar C held at the PTRC summer annual meeting*. University of Bath, England, UK. 7-11 September, 1987. ISBN 0860501752 / 9780860501756.
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, Issues 2-3, pp. 191-229. DOI: 10.1016/S1366-5545(00)00011-9
- Batley, R., & Ibáñez, N. (2009). *Randomness in preferences, outcomes and tastes; an application to journey time risk*. International Choice Modelling Conference 2009. March 30 – April 1, 2009. Harrogate, UK.
- Beirão, G., & Sarsfield-Cabral, J.A. (2007). Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. *Transport Policy*, Vol. 14, Issue 6, pp. 478-489. DOI: 10.1016/j.tranpol.2007.04.009
- Ben-Akiva, M., & Morikawa, T. (2002). Comparing ridership attraction of rail and bus. *Transport Policy*, Vol. 9, Issue 2, pp. 107-116. DOI: 10.1016/S0967-070X(02)00009-4
- Bentley, J., Collins, B.S., Buchanan, P., Tyler, N., & McArthur, J. (2016). *Emerging Technologies for Rapid Transit: Part One. Future-proofing Investment Decisions*. The Joint Modelling Application Centre Board, Report 2016/01. [https://at.govt.nz/media/1971157/jmac\\_report2016-01\\_emergingtechrapidtransit-part1\\_apr16.pdf](https://at.govt.nz/media/1971157/jmac_report2016-01_emergingtechrapidtransit-part1_apr16.pdf)
- Berlingerio, M., Ghaddar, B., Guidotti, R., Pascale, A., & Sassi, A. (2017). The GRAAL of carpooling: GReen And sociAL optimization from crowd-sourced data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 80, pp. 20-36. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.025
- Betancor, O., Moral, E., & Campos, J. (2009). *Estimación de los costes del productor y del usuario en la evaluación de proyectos de transporte*. Documento de trabajo del proyecto 'Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte' (Ref. PT-2007-001-02IAPP). <http://www.evaluaciondeproyectos.es/EsWeb/Resultados/DocTrab/PDF/Actividad3/Es3-2.pdf>
- Bickel, P., Friedrich, R., Burgess, A., Fagiani, P., Hunt, A., De Jong, G., Laird, J., Lieb, C., Lindberg, G., Mackie, P., Navrud, S., Odgaard, T., Ricci, A., Shires, J., & Tavasszy, L. (2006). *Proposal for Harmonised Guidelines (2nd revision)*. Deliverable 5, Project HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment). [http://www.kbsz.hu/dokumentumok/20070411\\_0.2-HEATCO\\_D5.pdf](http://www.kbsz.hu/dokumentumok/20070411_0.2-HEATCO_D5.pdf)
- Bishop, J.D.K., Doucette, R.T., Robinson, D., Mills, B., & McCulloch, M.D. (2011). Investigating the technical, economic and environmental performance of electric vehicles in the real-world: A case study using electric scooters. *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Issue 23, pp. 10094-10104. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.08.021
- Black, I., & Chin, T.K. (2007). *Forecasting Travel Time Variability in Urban Areas. Deliverable D1: Data Analysis and Model Development*. Hyder Consulting Ltd., Report No: 0010-GD01017-TCF-02. Department for Transport, UK.
- Black, I., Fearon, J., & Gilliam, C. (2009). *Forecasting and Appraising Travel Time Variability in Urban Areas: A Link-based Approach*. European Transport Conference 2009: Conference Papers. Noordwijkerhout, Netherlands. Association for European Transport. <https://aetransport.org/public/downloads/3Lf55/3966-514ec5cb8b814.pdf>
- Black, I., & Towriss, J.G. (1993). *London Congestion Charging: Demand effects of travel time reliability*. Department for Transport, UK.
- Bloomberg New Energy Finance. (2017). *Electric Vehicle Outlook 2017*. Executive Summary. Bloomberg New Energy Finance's annual long-term forecast of the world's electric vehicle market. [https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF\\_EVO\\_2017\\_ExecutiveSummary.pdf](https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF_EVO_2017_ExecutiveSummary.pdf)
- Bombardier Transportation. (2006). *Bombardier FLEXITY Swift: London-Croydon, United Kingdom*. [https://web.archive.org/web/20120306013907/http://www.flexity2.bombardier.com/pdf/en/FLEXITY\\_Swift\\_Croydon\\_0965\\_LRV\\_Feb06\\_en.pdf](https://web.archive.org/web/20120306013907/http://www.flexity2.bombardier.com/pdf/en/FLEXITY_Swift_Croydon_0965_LRV_Feb06_en.pdf)

- Bowman, L.A., & Turnquist, M.A. (1981). Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research Part A: General*, Vol. 15, Issue 6, pp. 465-471. DOI: 10.1016/0191-2607(81)90114-X
- BPR [Bureau of Public Roads]. (1964). *Traffic Assignment Manual for Application with a Large, High Speed Computer*. U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division.
- Brand, C., & Preston, J. (2006). *TEST – A tool for evaluating strategically integrated public transport*. European Transport Conference 2006: Conference Papers. Strasbourg, France. Association for European Transport.
- Bruun, E. (2005). Bus Rapid Transit and Light Rail: Comparing Operating Costs with a Parametric Costs Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1927, pp. 11-21. DOI: 10.1177/0361198105192700102
- Bruun, E., Allen, D., & Givoni, M. (2018). Choosing the right public transport solution based on performance of components. *Transport*, Vol. 34, Issue 4, pp. 1017-1029. DOI: 10.3846/transport.2018.6157
- Buliung, R.N., Soltys, K., Bui, R., Habel, C., & Lanyon, R. (2010). Catching a ride on the information super-highway: toward an understanding of internet-based carpool formation and use. *Transportation*, Vol. 37, Issue 6, pp. 849-873. DOI: 10.1007/s11116-010-9266-0
- Bunschoten, T. (2012). *To tram or not to tram. Exploring the existence of the tram bonus*. Master graduation thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Bunschoten, T., Molin, E., & van Nes, R. (2013). *Tram or bus; does the tram bonus exist?* European Transport Conference 2013: Conference Papers. Frankfurt, Germany. Association for European Transport. <https://aetransport.org/public/downloads/Ss-M2/213-521f8da6b6d31.pdf>
- Cain, A., Darido, G., Baltés, M.R., Rodríguez, P., & Barrios, J.C. (2006). *Applicability of Bogotá's TransMilenio BRT System to the United States*. Report FL-26-7104-01. Federal Transit Administration. [https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/Bogota\\_Report\\_Final\\_Report\\_May\\_2006.pdf](https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/Bogota_Report_Final_Report_May_2006.pdf)
- Cain, A., Flynn, J., McCourt, M., & Reyes, T. (2009). *Quantifying the Importance of Image and Perception to Bus Rapid Transit*. Report FTA-FL-26-7109.2009.03. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, Office of Research, Demonstration and Innovation (TRI). [https://nrti.org/wp-content/uploads/2017/05/NBRTI-BRT-Image-Study-March-2009\\_Final-Draft\\_highres.pdf](https://nrti.org/wp-content/uploads/2017/05/NBRTI-BRT-Image-Study-March-2009_Final-Draft_highres.pdf)
- Cambridge Systematics Inc., The Urban Institute, Sydec Inc., Levinson, H.S., & Lea and Elliot. (1992). *Characteristics of Urban Transportation Systems*. Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/13694>
- Carbone 4. (2016). *Tramways or Bus Rapid Transit. Which is greener? A study of the lifecycle CO<sub>2</sub> emissions of tramway & BRT systems*. Carbone 4 study, sponsored by Alstom. <https://www.intelligenttransport.com/wp-content/uploads/tramwaysvsbrt.pdf>
- Carmona, G. (2015). Tranvías y otros sistemas de transporte urbano. Despilfarros y aciertos. *Revista Carril Bus*, Informe especial Febrero 2015. [https://www.aetiva.es/wp-content/uploads/2015/02/informe\\_tranvias.pdf](https://www.aetiva.es/wp-content/uploads/2015/02/informe_tranvias.pdf)
- Carrion, C., & Levinson, D. (2012). Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, Issue 4, pp. 720-741. DOI: 10.1016/j.tra.2012.01.003
- Cascajo, R. (2004). *Metodología de evaluación de efectos económicos, sociales y ambientales de proyectos de transporte guiado en ciudades*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. [http://oa.upm.es/1926/1/ROCIO\\_CASCAJO\\_JIMENEZ.pdf](http://oa.upm.es/1926/1/ROCIO_CASCAJO_JIMENEZ.pdf)
- Ceder, A. (2007). *Public Transit Planning and Operation. Theory, Modelling and Practice*. 1st edition. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-6166-9.
- Chan, N.D., & Shaheen, S.A. (2012). Ridesharing in North America: Past, Present, and Future. *Transport Reviews*, Vol. 32, No. 1, pp. 93-112. DOI: 10.1080/01441647.2011.621557
- Chen, Y.-J., Li, Z.-C., & Lam, W.H.K. (2015). Modeling transit technology selection in a linear transportation corridor. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 49, Issue 1, pp. 48-72. DOI: 10.1002/atr.1262

- CICCP [Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos]. (2008). *Sistemas de transporte en plataformas reservadas*. Cuaderno n° 4 de la Comisión de Transportes. Grupo de trabajo: Bigas, J.M., Fanlo, J., Rocci, S., Sánchez-Direitinho, E., Sastre, J., & Zamorano, C. ISBN 978-84-380-0407-4.  
[http://www.ciccp.es/ImgWeb/Sede%20Nacional/Transportes/Plataformas\\_Reservadas\\_N4.pdf](http://www.ciccp.es/ImgWeb/Sede%20Nacional/Transportes/Plataformas_Reservadas_N4.pdf)
- CICCP [Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos]. (2009). *Tranvitrén y tren-tranvía: Hacia una mejora del aprovechamiento de las infraestructuras ferroviarias*. Cuaderno n° 6 de la Comisión de Transportes. Grupo de trabajo: Botella, J., González-García, J.D., Juliá, J., López-Pita, A., Moncholí, D., Novales, M., Pérez de Lama, J.R., Pérez-Revenga, J.M., Rodríguez-Bugarín, M., Sánchez-Direitinho, E., Sastre, J., & Zamorano, C. ISBN 978-84-380-0719-7.  
[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21549/Novales\\_Margarita\\_Bugarin\\_MiguelR\\_Tranvitren\\_Tren-Tranvia\\_Cuaderno\\_CICCP.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21549/Novales_Margarita_Bugarin_MiguelR_Tranvitren_Tren-Tranvia_Cuaderno_CICCP.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Conles, E., Novales, M., Anta, J., & Orro, A. (2014a). *Revisión de estudios económicos de comparación de costes asociados a sistemas de transporte metropolitano de capacidad intermedia (LRT y BHLS)*. XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014). Santander, 9-11 de junio de 2014.
- Conles, E., Novales, M., Orro, A., & Anta, J. (2014b). Buses with High Level of Service in Nantes, France. Characteristics and Results of the BusWay Compared with Light Rail Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2418, pp. 66-73. DOI: 10.3141/2418-08
- Copley, G., Murphy, P., & Pearce, D. (2002). *Understanding and valuing journey time variability*. European Transport Conference 2002: Conference Papers. Cambridge, UK. Association for European Transport.  
<https://aetransport.org/public/downloads/Zj1XX/586-514ec4f3633ac.pdf>
- CORES [Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos]. (2016). *Informe estadístico anual 2016*.  
<https://www.cores.es/sites/default/files/archivos/publicaciones/informe-estadistico-anual-2016.pdf>
- COST Action TU0603. (2011). *Buses with High Level of Service. Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research. Results from 35 European cities*. Final Report of COST action TU0603. Finn, B., Heddebaut, O., Kerkhof, A., Rambaud, F., Sbert, O., & Soulas, C. (eds.). ISBN 978-2-11-099577-3.  
[https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/BHLS\\_COST\\_final\\_report\\_October2011.pdf](https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/BHLS_COST_final_report_October2011.pdf)
- Currie, G. (2005). The Demand Performance of Bus Rapid Transit. *Journal of Public Transportation*, Vol. 8, Issue 1, pp. 41-55. DOI: 10.5038/2375-0901.8.1.3
- Currie, G., & Delbosc, A. (2013). Exploring Comparative Ridership Drivers of Bus Rapid Transit and Light Rail Transit Routes. *Journal of Public Transportation*, Vol. 16, Issue 2, pp. 47-65. DOI: 10.5038/2375-0901.16.2.3
- Currie, G., & Wallis, I. (2008). Effective ways to grow urban bus markets – a synthesis of evidence. *Journal of Transport Geography*, Vol. 16, Issue 6, pp. 419-429. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.04.007
- Czioska, P., Mattfeld, D.C., & Sester, M. (2017). GIS-based identification and assessment of suitable meeting point locations for ride-sharing. *Transportation Research Procedia*, Vol. 22, pp. 314-324.  
 DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.038
- Daly, A., Fox, J., & Patrui, B. (2011). *Pivoting in travel demand models*. European Transport Conference 2011: Conference Papers. Glasgow, UK. Association for European Transport.  
<https://aetransport.org/public/downloads/wi7gy/5071-514ec5fe5a430.pdf>
- De Bruijn, H., & Veeneman, W. (2009). Decision-making for light rail. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 43, Issue 4, pp. 349-359. DOI: 10.1016/j.tra.2008.11.003
- de Jong, G., Daly, A., Pieters, M., & van der Hoorn, T. (2007). The logsum as an evaluation measure: Review of the literature and new results. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 41, Issue 9, pp. 874-889. DOI: 10.1016/j.tra.2006.10.002
- de Rus, G., Betancor, O., & Campos, J. (2006). *Manual de evaluación económica de proyectos de transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D. C.  
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Manual-de-evaluaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-proyectos-de-transporte.pdf>
- de Rus, G., Betancor, O., Campos, J., Eugenio, J.L., Socorro, P., Matas, A., Raymond, J.L., González-Savignat, M., Brey, R., Nombela, G., Benavides, J., Valido, J., Hernández, A., Expósito, J.F., Suárez, A., Cabrera, M., Alonso, A., Moral, E., Ruíz, A., & Demellas, R. (2010). *Evaluación Económica de Proyectos de Transporte. Manual*. Documento del

- proyecto 'Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte' (Ref. PT-2007-001-02IAPP). ISBN 978-84-694-9846-0.  
<http://www.evaluaciondeproyectos.es/EsWeb/Resultados/Manual/PDF/EsManual.pdf>
- de Rus, G., Campos, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del transporte*. Antoni Bosch editor. ISBN 978-84-95348-08-1.
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., Domínguez, A., & González, F. (2012). Passenger preference analysis: light rail transit or bus versus car. *Transport*, Vol. 27, Issue 3, pp. 276-285. DOI: 10.3846/16484142.2012.719839
- Deng, T., & Nelson, J.D. (2011). Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature. *Transport Reviews*, Vol. 31, Issue 1, pp. 69-96. DOI: 10.1080/01441647.2010.492455
- DfT [Department for Transport]. (2014). *TAG (Transport Analysis Guidance) Unit A1.3. User and Provider Impacts*. Transport Appraisal and Strategic Modelling (TASM) Division, Department for Transport. London, UK.  
[https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20181210020149/https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/603749/webtag-tag-unit-a1-3-user-and-provider-impacts-november-2014.pdf](https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20181210020149/https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/603749/webtag-tag-unit-a1-3-user-and-provider-impacts-november-2014.pdf)
- DfT [Department for Transport]. (2017a). *TAG data book, July 2017*. Department for Transport. London, UK.  
[https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20181113233030/https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/648897/TAG\\_data\\_book\\_jul\\_2017.xls](https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20181113233030/https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/648897/TAG_data_book_jul_2017.xls)
- DfT [Department for Transport]. (2017b). *TAG (Transport Analysis Guidance) Unit A1.1. Cost-Benefit Analysis*. Transport Appraisal and Strategic Modelling (TASM) Division, Department for Transport. London, UK.  
[https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20180718035858/https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/712741/tag-unit-a1.1-cost-benefit-analysis-dec2017.pdf](https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20180718035858/https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/712741/tag-unit-a1.1-cost-benefit-analysis-dec2017.pdf)
- DfT [Department for Transport]. (2017c). *TAG (Transport Analysis Guidance) Unit A1.3. User and Provider Impacts*. Transport Appraisal and Strategic Modelling (TASM) Division, Department for Transport. London, UK.  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/603254/webtag-tag-unit-a1-3-user-and-provider-impacts-march-2017.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/603254/webtag-tag-unit-a1-3-user-and-provider-impacts-march-2017.pdf)
- DG COMM [Directorate-General for Communication, European Commission]. (2013). *Attitudes of Europeans towards urban mobility*. Special Eurobarometer 406 / Wave EB79.4. Conducted by TNS Opinion & Social at the request of the Directorate-General for Mobility and Transport (DG MOVE).  
[https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/archives/ebs/ebs\\_406\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/archives/ebs/ebs_406_en.pdf)
- DGT [Dirección General de Tráfico]. (2017). *Parque de vehículos – Anuario y Tablas Auxiliares – 2016*. Dirección General de Tráfico, Ministerio del Interior.  
<http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/2016/>
- DOE/EERE [U.S. Department of Energy / Office of Energy Efficiency and Renewable Energy]. (2010). *Fact #613: Vehicle Occupancy Rates*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.  
<https://energy.gov/eere/vehicles/fact-613-march-8-2010-vehicle-occupancy-rates>
- DOE/EERE [U.S. Department of Energy / Office of Energy Efficiency and Renewable Energy], & EPA [U.S. Environmental Protection Agency]. (2017). *Fuel Economy Guide. Model Year 2017*.  
<https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/FEG2017.pdf>
- EC-DGRP [European Commission – Directorate General Regional Policy]. (2008). *Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects*. [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/guides/cost/guide2008\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/guides/cost/guide2008_en.pdf)
- EEA [European Environment Agency]. (2000). *Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environment integration in the EU*. TERM 2000. Environmental issues series, No. 12. European Environment Agency, Copenhagen. ISBN 92-9167-206-8.
- EEA [European Environment Agency]. (2010). *Occupancy rates of passenger vehicles*. European Environment Agency, Copenhagen.  
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/occupancy-rates-of-passenger-vehicles/occupancy-rates-of-passenger-vehicles-1>
- Eliasson, J. (2004). *Car drivers' valuations of travel time variability, unexpected delays and queue driving*. European Transport Conference 2004: Conference Papers. Strasbourg, France. Association for European Transport.

- EMEP/EEA [UNECE/EMEP Task Force on Emissions Inventories and Projections / European Environment Agency]. (2016). *Air Pollutant Emissions Inventory Guidebook 2016. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv. Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles*. EEA Report No 21/2016, Part B, 1.A.3.b.i-iv Road Transport 2016.
- ETSC [European Transport Safety Council]. (2003). *Transport Safety Performance in the EU – A Statistical Overview*. European Transport Safety Council, Brussels, Belgium. ISBN 90-76024-154.  
[https://etsc.eu/wp-content/uploads/2003\\_transport\\_safety\\_stats\\_eu\\_overview.pdf](https://etsc.eu/wp-content/uploads/2003_transport_safety_stats_eu_overview.pdf)
- Eugenio, J.L. (2010). *Los impactos sobre la equidad distributiva y espacial de los proyectos de infraestructura de transporte*. Documento de trabajo del proyecto 'Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte' (Ref. PT-2007-001-02IAPP).  
<http://www.evaluaciondeproyectos.es/EsWeb/Resultados/DocTrab/PDF/Actividad5/Es5-1.pdf>
- European Commission. (2007). *Libro Verde 'Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana'*. Bruselas, 25.9.2007. COM(2007) 551 final.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0551&from=ES>
- European Commission. (2009). *Action Plan on Urban Mobility*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 30.9.2009. COM(2009) 490 final.  
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0490:FIN:EN:PDF>
- European Commission. (2011). *Libro Blanco 'Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible'*. Bruselas, 28.3.2011. COM(2011) 144 final.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN>
- European Commission. (2013). *Together towards competitive and resource-efficient urban mobility*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 17.12.2013. COM(2013) 913 final.  
[https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/doc/ump/com%282013%29913\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/doc/ump/com%282013%29913_en.pdf)
- European Commission. (2016). *A European Strategy for Low-Emission Mobility*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 20.7.2016. COM(2016) 501 final.  
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/EN/1-2016-501-EN-F1-1.PDF>
- European Commission. (2017). *European Urban Mobility: Policy Context*. Directorate - General for Mobility and Transport; Directorate - Investment, Innovative & Sustainable Transport; Unit B4 - Sustainable & Intelligent Transport. ISBN 978-92-79-57527-3. DOI: 10.2832/827766  
<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-sustainable-urban-mobility-policy-context.pdf>
- Fabregas, A., Lin, P.-S., Gonzalez-Velez, E., Datz, A., & Zhou, H. (2011). Safety and Operational Assessment of Yield-to-Bus Electronic Warning Signs on Transit Buses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2218, pp. 1-9. DOI: 10.3141/2218-01
- Federal Transit Administration. (2012). *Circular FTA C 5010.1D 'Grant Management Requirements'*. Rev. 1, August 27, 2012. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration.  
[https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/C\\_5010\\_1D\\_Grant\\_Management\\_Requirements.pdf](https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/C_5010_1D_Grant_Management_Requirements.pdf)
- FEMP [Federación Española de Municipios y Provincias], MARM [Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino], & GEA21, S.L. (2010). *La Estrategia Española de Movilidad Sostenible y los Gobiernos Locales*. ISBN 978-84-92494-23-1.  
<http://www.redciudadesclima.es/sites/default/files/2a7fb70e4f9cfdd19fbd05d0240327b0.pdf>
- FGSV [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen]. (2008). *Hinweise zu Systemkosten von Busbahn und Straßenbahn bei Neueinführung*. FGSV Verlag GmbH, Cologne, Germany. ISBN 978-3-939715-60-3.
- Fosgerau, M., & Karlström, A. (2010). The value of reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, Issue 1, pp. 38-49. DOI: 10.1016/j.trb.2009.05.002
- Fuhs, C.A. (1990). *High-occupancy Vehicle Facilities: A Planning, Design, and Operation Manual*. Parsons Brinckerhoff, Inc. New York, U.S.

- Gálvez, T.E., & Jara-Díaz, S.R. (1998). On the Social Valuation of Travel Time Savings. *International Journal of Transport Economics / Rivista Internazionale Di Economia Dei Trasporti*, Vol. 25, No. 2, pp. 205-219. <https://www.jstor.org/stable/42747271>
- Garrigue, D. (2009). *BHLS Description: The BusWay – Nantes*. COST action TU0603, annex 2 of the WP1 guideline.
- Gentle, J.E. (2003). *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*. 2nd edition. Springer, New York, U.S. ISBN 978-0-387-00178-4 (print) / 978-0-387-21610-2 (online). DOI: 10.1007/b97336
- Gibson, J., Munizaga, M.A., Schneider, C., & Tirachini, A. (2016). Estimating the bus user time benefits of implementing a median busway: Methodology and case study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 84, pp. 72-82. DOI: 10.1016/j.tra.2015.07.011
- Gilliam, C., Chin, T.K., Black, I., & Fearon, J. (2008). *Forecasting and Appraising Travel Time Variability in Urban Areas*. European Transport Conference 2008: Conference Papers. Noordwijkerhout, Netherlands. Association for European Transport. <https://aetransport.org/public/downloads/7VCga/3640-514ec5be2aa94.pdf>
- Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2012). *COPERT 4: Computer programme to calculate emissions from road transport. User manual (version 9.0)*. Emisia SA.
- Global Industry Analysts. (2017). *Motorcycles, Scooters and Mopeds - Global Strategic Business Report*. Report ID: 338746. Research and Markets, July 2017.
- Global Market Insights. (2017). *Electric Motorcycles & Scooters Market Size By Product (Motorcycles, Scooters), By Battery (SLA, Li-ion, NiMH), Industry Analysis Report, Regional Outlook (U.S., Canada, Germany, UK, France, China, India, Japan, Brazil, Mexico), Growth Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2016 – 2024*. Report ID: GMI218. Global Market Insights, Inc., March 2017.
- Gomez-Ibanez, J.A. (1985). A Dark Side to Light Rail? The Experience of Three New Transit Systems. *Journal of the American Planning Association*, Vol. 51, Issue 3, pp. 337-351. DOI: 10.1080/01944368508976421
- Gorham, R. (2009). *Demystifying Induced Travel Demand*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Germany. [https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/B\\_Technical-Documents/GIZ\\_SUTP\\_TD1\\_Demystifying-Induced-Travel-Demand\\_EN.pdf](https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/B_Technical-Documents/GIZ_SUTP_TD1_Demystifying-Induced-Travel-Demand_EN.pdf)
- Grimaldi, R., Beria, P., & Laurino, A. (2014). A Stylised Cost-Benefit Model for the Choice between Bus and Light Rail. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 48, Issue 2, pp. 219-239. <https://www.jstor.org/stable/24396327>
- Hamer, R., de Jong, G., Kroes, E., & Warffemius, P. (2005). *The Value of Reliability in Transport: Provisional values for the Netherlands based on expert opinion*. TR-240-AVV. Prepared for AVV, Transport Research Centre of the Dutch Ministry of Transport. <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/15278/reliability-in-transport.pdf>
- Hass-Klau, C., Crampton, G., Biereth, C., & Deutsch, V. (2003). *Bus or Light Rail: Making the Right Choice. A Financial, Operational and Demand Comparison of Light Rail, Guided Buses, Busways and Bus Lanes*. 2nd edition. Environmental and Transport Planning, Brighton, UK. ISBN 0951962086.
- He, W., Hwang, K., & Li, D. (2014). Intelligent Carpool Routing for Urban Ridesharing by Mining GPS Trajectories. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, Issue 5, pp. 2286-2296. DOI: 10.1109/TITS.2014.2315521
- HEATCO [Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment]. (2006). *Deliverable 5: Proposal for Harmonized Guidelines*. Project HEATCO (FP6-2002-SSP-1/502481), SSP 3.2. [https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/HEATCO\\_D5\\_eng.pdf](https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/HEATCO_D5_eng.pdf)
- Heddebaut, O., Finn, B., Rabuel, S., & Rambaud, F. (2010). The European Bus with a High Level of Service (BHLS): Concept and Practice. *Built Environment*, Vol. 36, No. 3, pp. 307-316. <https://www.jstor.org/stable/23289720>
- Henke, C. (2013). Designing BRT for Future Rail Conversion: Issues, State of Practice, and Project Considerations. *Urban Public Transportation Systems 2013* (Third International Conference on Urban Public Transportation Systems. November 17-20, 2013. Paris, France), pp. 309-317. DOI: 10.1061/9780784413210.027
- Hensher, D.A. (1977). *Value of Business Travel Time*. Pergamon Press. ISBN-10 0080218563 / ISBN-13 978-0080218564.

- Hensher, D.A. (1999). A Bus-Based Transitway or Light Rail? Continuing the Saga on Choice versus Blind Commitment. *Road & Transport Research*, Vol. 8, No. 3 (Sept. 1999), pp. 3-21. ISSN 1037-5783.
- Hensher, D.A. (2000). Urban Public Transport Challenges. *The Drawing Board: An Australian Review of Public Affairs*, Vol. 1, No. 2 (Nov. 2000), pp. 47-62. ISSN 1443-8607.
- Hensher, D.A. (2011). Valuation of Travel Time Savings. Chapter 7th in: *A Handbook of Transport Economics*. de Palma, A., Lindsey, R., Quinet, E., & Vickerman, R. (eds.). Edward Elgar Publishing. ISBN 9781847202031. DOI: 10.4337/9780857930873.00014
- Hensher, D.A. (2016). Why is Light Rail Starting to Dominate Bus Rapid Transit Yet Again? *Transport Reviews*, Vol. 36, Issue 3, pp. 289-292. DOI: 10.1080/01441647.2016.1155851
- Hensher, D.A., Balbontin, C., Ho, C., & Mulley, C. (2019). Cross-cultural Contrasts of Preferences for Bus Rapid Transit and Light Rail Transit. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 53, No. 1, pp. 47-73.
- Hensher, D.A., Ho, C., & Mulley, C. (2015). Identifying preferences for public transport investments under a constrained budget. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 72, pp. 27-46. DOI: 10.1016/j.tra.2014.12.002
- Hensher, D.A., & Mulley, C. (2015). Modal image: candidate drivers of preference differences for BRT and LRT. *Transportation*, Vol. 42, Issue 1, pp. 7-23. DOI: 10.1007/s11116-014-9516-7
- Hensher, D.A., & Waters II, W.G. (1994). Light rail and bus priority systems: Choice or blind commitment? *Research in Transportation Economics*, Vol. 3, pp. 139-162. DOI: 10.1016/S0739-8859(09)80008-5
- Hess, D.B., Taylor, B.D., & Yoh, A.C. (2005). Light Rail Lite or Cost-Effective Improvements to Bus Service?: Evaluating Costs of Implementing Bus Rapid Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1927, pp. 22-30. DOI: 10.1177/0361198105192700103
- Hodgson, P. (2011). *An Assessment of the Cost and Environmental Performance of Light Rail and an Equivalent Bus-Based System*. PhD thesis, The Open University, UK.
- Hodgson, P., Potter, S., Warren, J., & Gillingwater, D. (2013). Can bus really be the new tram? *Research in Transportation Economics*, Vol. 39, Issue 1, pp. 158-166. DOI: 10.1016/j.retrec.2012.06.009
- Horowitz, A.J. (1991). *Delay/Volume Relations for Travel Forecasting Based upon the 1985 Highway Capacity Manual*. Prepared for the Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. [https://pdfs.semanticscholar.org/f5d3/8f221b1bd17e2cd629b6077bec39469528e.pdf?\\_ga=2.186932840.1596187121.1574240625-1046353469.1564654082](https://pdfs.semanticscholar.org/f5d3/8f221b1bd17e2cd629b6077bec39469528e.pdf?_ga=2.186932840.1596187121.1574240625-1046353469.1564654082)
- Hsu, L.R. (2013). Cost Estimating Model for Mode Choice between Light Rail and Bus Rapid Transit Systems. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 139, Issue 1, pp. 20-29. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000466
- Hunt, A. (2006). *General Issues in Costing Analysis: Units of account, Base years, and Currency conversion*. Project HEATCO, Annex B to HEATCO Deliverable 5.
- IEA [International Energy Agency]. (1997). *Indicators of energy use and efficiency: understanding the link between energy and human activity*. International Energy Agency. ISBN 9264149198 / 9789264149199.
- Ingvardson, J.B., & Nielsen, O.A. (2018). Effects of new bus and rail rapid transit systems – an international review. *Transport Reviews*, Vol. 38, Issue 1, pp. 96-116. DOI: 10.1080/01441647.2017.1301594
- Jolliffe, J.K., & Hutchinson, T.P. (1975). A Behavioural Explanation of the Association Between Bus and Passenger Arrivals at a Bus Stop. *Transportation Science*, Vol. 9, Issue 3, pp. 248-282. DOI: 10.1287/trsc.9.3.248
- Jou, R.-C., Hensher, D.A., Liu, Y.-H., & Chiu, C.-S. (2010). Urban Commuters' Mode-switching Behaviour in Taipei, with an Application of the Bounded Rationality Principle. *Urban Studies*, Vol. 47, Issue 3, pp. 650-665. DOI: 10.1177/0042098009351939
- Kain, J.F. (1988). Choosing the wrong technology: Or how to spend billions and reduce transit use. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 21, Issue 3, pp. 197-213. DOI: 10.1002/atr.5670210303
- King, R.D. (2003). *TCRP Synthesis 49. Yield to Bus – State of the Practice*. Transit Cooperative Research Program, Project J-7, Topic SA-13. Transportation Research Board of the National Academies. ISSN 1073-4880. ISBN 0-309-06969-6. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp\\_syn\\_49.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_syn_49.pdf)



- Kohli, S., & Daly, A. (2006). *The use of logsums in welfare estimation: application in PRISM*. European Transport Conference 2006: Conference Papers. Strasbourg, France. Association for European Transport. [https://pdfs.semanticscholar.org/a0a2/9b060512dfca1dad22b26220b1a7fb8532f0.pdf?\\_ga=2.82271702.1596187121.1574240625-1046353469.1564654082](https://pdfs.semanticscholar.org/a0a2/9b060512dfca1dad22b26220b1a7fb8532f0.pdf?_ga=2.82271702.1596187121.1574240625-1046353469.1564654082)
- Kotz, S., & van Dorp, J.R. (2004). *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions with Bounded Support and Applications*. World Scientific Publishing. ISBN 978-981-256-115-2 (hardcover) / 978-981-4481-24-3 (ebook). DOI: 10.1142/5720
- Kouwenhoven, M., de Jong, G., Koster, P., van den Berg, V.A.C., Verhoef, E.T., Bates, J., & Warffemius, P. (2014). New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands. *Research in Transportation Economics*, Vol. 47, pp. 37-49. DOI: 10.1016/j.retrec.2014.09.017
- Kroes, E., Kouwenhoven, M., Debrincat, L., & Pauget, N. (2014). Value of crowding on public transport in Île-de-France, France. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2417, pp. 37-45. DOI: 10.3141/2417-05
- Kühn, F. (2002). Bus rapid or light rail transit for intermediate cities? In: *Urban Mobility for All: La Mobilité Urbaine pour Tous* (Proceedings of the X international CODATU conference. Lomé, Togo, 12-15 November, 2002). Godard, X., & Fatonzoun, I. (eds.). Swets & Zeitlinger BV, Lisse, The Netherlands. ISBN 90 5809 399 9. <http://www.codatu.org/wp-content/uploads/Bus-rapid-or-light-rail-transit-for-intermediate-cities-F-KUHN.pdf>
- Kumar, A. (1980). Use of Incremental Form of Logit Models in Demand Analysis. *Transportation Research Record*, Vol. 775, pp. 21-27. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1980/775/775-005.pdf>
- Levine, J., Singer, M., Merlin, L., & Grengs, J. (2018). Apples to apples: Comparing BRT and light rail while avoiding the "BRT-Lite" trap. *Transport Policy*, Vol. 69, Issue C, pp. 20-34. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.05.015
- Levinson, H.S. (1983). Analyzing Transit Travel Time Performance. *Transportation Research Record*, Vol. 915, pp. 1-6. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/915/915-001.pdf>
- Li, X., & Preston, J. (2015). Reassessing the financial and social costs of public transport. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, Vol. 168, Issue 4, pp. 356-369. DOI: 10.1680/tran.12.00096
- Li, Z., & Hensher, D.A. (2011). Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*, Vol. 18, Issue 6, pp. 880-887. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.06.003
- Li, Z., Hensher, D.A., & Rose, J.M. (2010). Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, Issue 3, pp. 384-403. DOI: 10.1016/j.tre.2009.12.005
- Lillo, E., Wensell, U., & Willumsen, L. (2003). Innovación en el transporte urbano: Bus Transit Systems. *Economía Industrial*, No. 353, pp. 65-72.
- Litman, T. (2008). Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, Vol. 11, No. 2, pp. 43-63. DOI: 10.5038/2375-0901.11.2.3
- López-Gutiérrez, M.A. (2018). *Comparativa entre dos sistemas de transporte urbano de capacidad media: autobuses de tránsito rápido y tren ligero. Caso de estudio: Línea 1 del Metrobús y Tren Ligero de la Ciudad de México*. Trabajo para la obtención del grado académico de licenciatura en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/15437>
- López-Lambas, M.E., Giuffrida, N., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2017). Comparison between Bus Rapid Transit and Light-Rail Transit Systems: A Multi-criteria Decision Analysis Approach. *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol. 176, pp. 143-154 (23rd International Conference on Urban Transport and the Environment, 2017; Rome, Italy; 5-7 Sept. 2017). DOI: 10.2495/UT170131
- López-Lambas, M.E., & Valdés, C. (2013). BHLS, bus, tram: thesis, antithesis, synthesis. *Ingegneria Ferroviaria*, Vol. 68, No. 6, pp. 569-585.
- Lovejoy, K., & Handy, S. (2011). Social networks as a source of private-vehicle transportation: The practice of getting rides and borrowing vehicles among Mexican immigrants in California. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 45, Issue 4, pp. 248-257. DOI: 10.1016/j.tra.2011.01.007

- Mackett, R.L., & Edwards, M. (1998). The impact of new public transport systems: Will the expectations be met? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 32, Issue 4, pp. 231-245. DOI: 10.1016/S0965-8564(97)00041-4
- Mackie, P.J., Wardman, M., Fowkes, A.S., Whelan, G., Nellthorp, J., & Bates, J. (2003). *Values of Travel Time Savings in the UK*. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 567. Report to Department for Transport, UK. [http://eprints.whiterose.ac.uk/2079/2/Value\\_of\\_travel\\_time\\_savings\\_in\\_the\\_UK\\_protected.pdf](http://eprints.whiterose.ac.uk/2079/2/Value_of_travel_time_savings_in_the_UK_protected.pdf)
- Mahmassani, H.S. (2011). *Application to the New York Metropolitan Region of an Integrated Model of User Responses to Pricing and Reliability with a State of the Art Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Tool*. Presentation to NYMTC; New York City, NY, August 10, 2011.
- Manheim, M.L. (1979). *Fundamentals of Transportation Systems Analysis, Volume 1: Basic Concepts*. MIT Press. Cambridge, MA. ISBN: 9780262131292 / 9780262632898.
- Martin, W.A., & McGuckin, N.A. (1998). *Travel Estimation Techniques for Urban Planning*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 365. National Academy Press, Washington, D.C. ISBN 0-309-05365-X. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_365.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_365.pdf)
- McBrayer, D.B. (2003). Blurring the Light Rail Transit - Bus Rapid Transit Boundaries: Rapid Light Transit. *Transportation Research Circular E-C058: 9th National Light Rail Transit Conference*, pp. 135-147. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISSN 0097-8515. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec058/ec058.pdf>
- McCormick Rankin Corp. (2008). *Hamilton Rapid Transit Feasibility Study*. RTFS, Phase 1. May 23, 2008. City of Hamilton, Canada.
- Mercedes-Benz/EvoBus. (2015). *Die Citaro Stadtbusse. Technische Information*.
- MFOM [Ministerio de Fomento]. (1996). *Manual para la evaluación de inversiones de transporte en las ciudades*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento. ISBN 84-498-0249-0.
- MFOM [Ministerio de Fomento]. (2014). *Nota de servicio 3/2014 sobre prescripciones y recomendaciones técnicas relativas a los contenidos mínimos a incluir en los Estudios de Rentabilidad de los Estudios Informativos de la Subdirección General de Estudios y Proyectos*. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda; Secretaría General de Infraestructuras; Dirección General de Carreteras; Subdirección General de Estudios y Proyectos. [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/ns\\_32014.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/ns_32014.pdf)
- MFOM [Ministerio de Fomento]. (2015). *Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) 2012-2024*. [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/E35B8D33-F3B6-4695-9012-C22229966FA0/130944/PITVI20122024.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/E35B8D33-F3B6-4695-9012-C22229966FA0/130944/PITVI20122024.pdf)
- MFOM [Ministerio de Fomento], & MARM [Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino]. (2009). *Estrategia Española de Movilidad Sostenible*. [https://www.fomento.es/recursos\\_mfom/pdf/149186F7-0EDB-4991-93DD-CFB76DD85CD1/46435/EstrategiaMovilidadSostenible.pdf](https://www.fomento.es/recursos_mfom/pdf/149186F7-0EDB-4991-93DD-CFB76DD85CD1/46435/EstrategiaMovilidadSostenible.pdf)
- Ministerio de la Presidencia. (2003). *Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo*. Boletín Oficial del Estado (BOE) núm. 306, de 23 de diciembre de 2003, pp. 45684-45772. <https://www.boe.es/boe/dias/2003/12/23/pdfs/A45684-45772.pdf>
- Minkoff, M., & Martin, L. (2014). *System-Specific Spare Bus Ratios Update*. Transit Cooperative Research Program Synthesis 109. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISSN 1073-4880. ISBN 978-0-309-27119-6. DOI: 10.17226/22409. <https://www.nap.edu/read/22409/chapter/1>
- Moccia, L., Allen, D.W., & Bruun, E. (2018). A technology selection and design model of a semi-rapid transit line. *Public Transport*, Vol. 10, Issue 3, pp. 455-497. DOI: 10.1007/s12469-018-0187-1
- Moccia, L., Giallombardo, G., & Laporte, G. (2017). Models for technology choice in a transit corridor with elastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 104, pp. 733-756. DOI: 10.1016/j.trb.2017.06.001
- Moccia, L., & Laporte, G. (2016). Improved models for technology choice in a transit corridor with fixed demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 83, pp. 245-270. DOI: 10.1016/j.trb.2015.11.001

- Molinero, A.R., & Sánchez, L.I. (2005). *Transporte público: Planeación, diseño, operación y administración*. 1ª reimpresión, enero 2005. Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN 968-835-353-1.
- MVA Consultancy. (1996). *Benefits of reduced travel time variability*. MVA ref. 02/C/2923. Report for Department for Transport, UK.
- Navigant Consulting. (2015a). *Projected electricity-powered two-wheeler sales in the United States in 2015 and 2024, by type (in units)*. In: Statista - The Statistics Portal. Retrieved August 24, 2017, from: <https://www.statista.com/statistics/445019/us-sales-of-electricity-powered-two-wheelers-by-type/>
- Navigant Consulting. (2015b). *Projected global electricity-powered two-wheeler sales in 2015 and 2024, by type (in millions)*. In: Statista - The Statistics Portal. Retrieved August 24, 2017, from: <https://www.statista.com/statistics/445004/worldwide-sales-of-electricity-powered-two-wheelers/>
- NCHRP [National Cooperative Highway Research Program]. (2012). *NCHRP Report 716. Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques*. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISSN 0077-5614. ISBN 978-0-309-21400-1. DOI: 10.17226/14665
- Nellthorp, J., & Hyman, G. (2001). *Alternatives to the Rule of a Half in matrix-based appraisal*. European Transport Conference 2001: Conference Papers. Cambridge, UK. Association for European Transport. <https://aetransport.org/public/downloads/4r0Ne/373-514ec4d86ee1d.pdf>
- Nellthorp, J., Sansom, T., Bickel, P., Doll, C., & Lindberg, G. (2001). *Valuation Conventions for UNITE*. Project UNITE (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency), Deliverable 5, Annex 3. Institute for Transport Studies, University of Leeds. [http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D5\\_Annex3.pdf](http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D5_Annex3.pdf)
- Noland, R.B., Small, K.A., Koskenoja, P.M., & Chu, X. (1998). Simulating travel reliability. *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 8, Issue 5, pp. 535-564. DOI: 10.1016/S0166-0462(98)00009-X
- Novales, M. (2004). *Análisis y desarrollo de las adaptaciones tecnológicas en infraestructura y vehículos para la implantación de un sistema de tranvitrén sobre líneas de Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE)*. Tesis doctoral, Universidade da Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/15570>
- Novales, M. (2011). Light Rail Systems Free of Overhead Wires. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2219, pp. 30-37. DOI: 10.3141/2219-04
- Novales, M., & Conles, E. (2014). First tram-train experience on Spanish conventional railway lines: Cádiz Bay tram-train / Prima esperienza tram-treno sulle linee ferroviarie spagnole convenzionali: Il tram-treno della Baia di Cadice. *Ingegneria Ferroviaria*, Vol. 69, No. 2, pp. 129-149.
- Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2012). *¿Autobús de alto nivel de servicio o metro ligero? Reflexiones sobre los criterios de decisión*. X Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2012). Granada, 20-22 de junio de 2012.
- Novales, M., Orro, A., Conles, E., & Anta, J. (2014). Medium-capacity transit systems: some reflections about making the right choice. In: *Public Mobility Systems*. Pratelli, A. (ed.). WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, Vol. 78, pp. 85-96. DOI: 10.2495/978-1-84564-908-1/008
- Novales, M., Orro, A., & Rodríguez-Bugarín, M. (2010). Track Geometry for Light Rail Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2146, pp. 18-25. DOI: 10.3141/2146-03
- NZTA [New Zealand Transport Agency]. (2016). *Economic evaluation manual*. First edition, Amendment 1. NZ Transport Agency, Wellington, New Zealand. ISBN 978-0-478-40782-2 (online). <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/economic-evaluation-manual/economic-evaluation-manual/docs/eem-manual-2016.pdf>
- Observatorio TUC. (2017). *Informe Anual del Observatorio de Costes y Financiación del Transporte Urbano Colectivo 2014-2015*. Observatorio de Costes y Financiación del Transporte Urbano Colectivo, Móstoles, Madrid. ISBN 978-84-941823-7-2. <https://www.atuc.es/sites/default/files/comunicados/INFORME-OBSERVATORIO-2014-2015-WEB.pdf>
- Ortúzar, J.D., & Román, C. (2003). El problema de modelación de demanda desde una perspectiva desagregada: el caso del transporte. *Revista EURE*, Vol. 29, No. 88, pp. 149-171. DOI: 10.4067/S0250-71612003008800007
- Ortúzar, J.D., & Willumsen, L.G. (2008). *Modelos de transporte (3ª edición)*. Traducción por: Ibeas- Portilla, A., & Dell'Olio, L. PUBliCan, Ediciones de la Universidad de Cantabria. ISBN 978-84-8102-512-5.

- Ortúzar, J.D., & Willumsen, L.G. (2011). *Modelling Transport (Fourth Edition)*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, West Sussex, UK. ISBN 978-0-470-76039-0.
- Oser, A. (2009). *Report of a Busway visit. 3 days with the local authority Nantes Metropole and the operator Semitan*. COST Action TU-0603-Buses with High Level of Service.
- Overgaard, K.R. (1967). Urban Transportation Planning: Traffic Estimation. *Traffic Quarterly*, Vol. 21, No. 2, pp. 197-218.
- Pickrell, D.H. (1992). A Desire Named Streetcar. Fantasy and Fact in Rail Transit Planning. *Journal of the American Planning Association*, Vol. 58, Issue 2, pp. 158-176. DOI: 10.1080/01944369208975791
- Pierce, J.T. (1995). *System-Specific Spare Rail Vehicle Ratios*. Transit Cooperative Research Program, Synthesis of Transit Practice 15. National Academy Press, Washington, D.C. ISSN 1073-4880. ISBN 0-309-05869-4. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tsyn15.pdf>
- Pierce, J.T., & Moser E.K. (1995). *System-Specific Spare Bus Ratios*. Transit Cooperative Research Program, Synthesis of Transit Practice 11. National Academy Press, Washington, D.C. ISSN 1073-4880. ISBN 0-309-05856-2. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tsyn11.pdf>
- Portney, P.R., & Weyant, J.P. (1999). *Discounting and intergenerational equity*. Resources for the Future. ISBN 0-915707-89-6.
- Prieto, M., Baltas, G., & Stan, V. (2017). Car sharing adoption intention in urban areas: What are the key sociodemographic drivers? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 101, pp. 218-227. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.012
- Prud'homme, R., Koning, M., & Kopp, P. (2011). Substituting a tramway to a bus line in Paris: Costs and benefits. *Transport Policy*, Vol. 18, Issue 4, pp. 563-572. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.01.012
- Puchalsky, C.M. (2005). Comparison of Emissions from Light Rail Transit and Bus Rapid Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1927, pp. 31-37. DOI: 10.1177/0361198105192700104
- Ravuel, S. (2009). *Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France: domaines de pertinence en zone urbaine*. Mobilités et Transports: Le pont sur. Fiche n° 12, Novembre 2009. CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques). [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/11/fiche\\_CERTU\\_LepointSur\\_pertinence\\_TCSP\\_cle5e1217.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/11/fiche_CERTU_LepointSur_pertinence_TCSP_cle5e1217.pdf)
- Rizelioglu, M., & Arslan, T. (2019). A comparison of LRT with an imaginary BRT system in performance: Bursa example. *Case Studies on Transport Policy*, Available online 23 January 2019 (Article in Press). DOI: 10.1016/j.cstp.2019.01.007
- Rodríguez, A. (2012). Translohr, tranvía ligero de rodadura neumática. *Revista Vía Libre*, n° 559 (enero 2012), pp. 38-42. [https://www.vialibre-ffe.com/pdf/8702\\_38a41-559.pdf](https://www.vialibre-ffe.com/pdf/8702_38a41-559.pdf)
- Rongviriyapanich, T., & Suppatrakul, C. (2005). Effects of Motorcycles on Traffic Operation on Arterial Streets. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 137-146. DOI: 10.11175/easts.6.137
- Sánchez, D., Martínez, S., & Domingo-Ferrer, J. (2016). Co-utile P2P ridesharing via decentralization and reputation management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 73, pp. 147-166. DOI: 10.1016/j.trc.2016.10.017
- Savvides, S. (1994). Risk analysis in investment appraisal. *Project Appraisal Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 3-18. DOI: 10.1080/02688867.1994.9726923
- Scherer, M. (2010). Is Light Rail More Attractive to Users Than Bus Transit? Arguments Based on Cognition and Rational Choice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2144, pp. 11-19. DOI: 10.3141/2144-02
- Scherer, M. (2011). *The image of bus and tram: first results*. Conference paper, 11th Swiss Transport Research Conference. May 11-13, 2011. Monte Verità, Ascona, Switzerland.
- Scherer, M., & Dziekan, K. (2012). Bus or Rail: An Approach to Explain the Psychological Rail Factor. *Journal of Public Transportation*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-93. DOI: 10.5038/2375-0901.15.1.5

- Scherer, M., & Weidmann, U. (2011). Differences in Travel Behavior and Demand Potential of Tram and Bus-Based Neighborhoods: Evidence from a Cluster Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2217, pp. 1-10. DOI: 10.3141/2217-01
- Shires, J.D., & de Jong, G. (2006). *An international meta-analysis of values of time*. Project HEATCO, Annex A to HEATCO Deliverable 5.
- Small, K.A. (1982). The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. *The American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467-479.
- Small, K.A., & Rosen, H.S. (1981). Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models. *Econometrica*, Vol. 49, No. 1, pp. 105-130. <https://www.jstor.org/stable/1911129>
- Small, K.A., & Verhoef, E.T. (2007). *The Economics of Urban Transportation*. Routledge, Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-415-28514-8 / 978-0-415-28515-5 / 978-0-203-64230-6.
- Smock, R. (1962). An Iterative Assignment Approach to Capacity Restraint on Arterial Networks. *Highway Research Board Bulletin*, Issue No. 347, pp. 60-66. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/347/347-006.pdf>
- Sonmez, R., & Ontepeli, B. (2009). Predesign cost estimation of urban railway projects with parametric modeling. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 15, Issue 4, pp. 405-409. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.405-409
- Spencer, A.H., & Andong, W. (1996). Light rail or busway? A comparative evaluation for a corridor in Beijing. *Journal of Transport Geography*, Vol. 4, Issue 4, pp. 239-251. DOI: 10.1016/S0966-6923(96)00027-0
- Spiess, H. (1990). Conical Volume-Delay Functions. *Transportation Science*, Vol. 24, Issue 2, pp. 153-158. DOI: 10.1287/trsc.24.2.153
- St. Jacques, K., & Levinson, H.S. (1997). *Operational Analysis of Bus Lanes on Arterials*. Transit Cooperative Research Program (TCRP), Report 26. National Academy Press, Washington, D.C. ISSN 1073-4872. ISBN 0-309-06250-0. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp\\_rpt\\_26-a.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_26-a.pdf) [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp\\_rpt\\_26-b.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_26-b.pdf)
- Stone, J.R., Allen, J.D., Moerz, A., & Gardner, B. (1992). Transit system evaluation: Guideway bus vs. light rail transit. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 26, Issue 3, pp. 213-240. DOI: 10.1002/atr.5670260303
- Stutsman, J.M. (2002). Bus rapid transit or light rail transit - How to decide?: Los Angeles case study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1793, pp. 55-61. DOI: 10.3141/1793-08
- TCRP [Transit Cooperative Research Program]. (2013). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (Third Edition)*. Transit Cooperative Research Program, Report 165. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISSN 1073-4872. ISBN 978-0-309-28344-1.
- Tirachini, A., Hensher, D.A., & Jara-Díaz, S.R. (2010a). Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transit network. *Research in Transportation Economics*, Vol. 29, Issue 1, pp. 231-242. DOI: 10.1016/j.retrec.2010.07.029
- Tirachini, A., Hensher, D.A., & Jara-Díaz, S.R. (2010b). Restating modal investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, Issue 6, pp. 1148-1168. DOI: 10.1016/j.tre.2010.01.008
- Tirachini, A., Hensher, D.A., & Rose, J.M. (2013). Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 53, pp. 36-52. DOI: 10.1016/j.tra.2013.06.005
- Tirachini, A., Sun, L., Erath, A., & Chakirov, A. (2016). Valuation of sitting and standing in metro trains using revealed preferences. *Transport Policy*, Vol. 47, pp. 94-104. DOI: 10.1016/j.tranpol.2015.12.004
- Train, K.E. (2009). *Discrete choice methods with simulation. Second edition*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-76655-5 (hardback) / 978-0-521-74738-7 (pbk.). DOI: 10.1017/CBO9780511805271
- Transport for London. (2010). *Traffic Modelling Guidelines. TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice. Version 3.0*. Smith, J., & Blewitt, R. (eds.). <http://content.tfl.gov.uk/traffic-modelling-guidelines.pdf>
- TRB [Transportation Research Board]. (1985). *Highway Capacity Manual 1985*. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISBN 0-309-03821-9 / 978-0-309-03821-8.

- TRB [Transportation Research Board]. (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISBN 0-309-06681-6 / 978-0-309-06681-5.
- TRB [Transportation Research Board]. (2010). *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISBN 0-309-16077-4 / 978-0-309-16077-3.
- TRB [Transportation Research Board]. (2016). *Highway Capacity Manual, 6<sup>th</sup> Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Transportation Research Board, Washington, D.C. ISBN 0-309-36997-5 / 978-0-309-36997-8.
- UITP [Union Internationale des Transports Publics]. (2015). *Light Rail in Figures. Statistics Brief*. International Association of Public Transport. October 2015. [https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP\\_Statistic\\_Brief\\_4p-Light%20rail-Web.pdf](https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP_Statistic_Brief_4p-Light%20rail-Web.pdf)
- UK Tram. (2012). *Briefing paper. Costs of Light Rail Schemes*. UK Tram. [https://uktram.com/wp-content/uploads/2018/07/Briefing\\_Paper\\_-\\_Costs\\_of\\_Light\\_Rail\\_Schemes.pdf](https://uktram.com/wp-content/uploads/2018/07/Briefing_Paper_-_Costs_of_Light_Rail_Schemes.pdf)
- UK's Committee on Climate Change. (2019). *Net Zero: The UK's contribution to stopping global warming*. Committee on Climate Change, London, UK. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2019/05/Net-Zero-The-UKs-contribution-to-stopping-global-warming.pdf>
- UN-WCED [United Nations - World Commission on Environment and Development]. (1987). *Our Common Future ("Brundtland Report")*. United Nations, General Assembly, A/42/427, 4 August 1987. <https://undocs.org/en/A/42/427>
- UNECE [United Nations Economic Commission for Europe]. (2011). *Agreement: Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions. Addendum 106: Regulation No. 107. Uniform provisions concerning the approval of category M<sub>2</sub> or M<sub>3</sub> vehicles with regard to their general construction*. E/ECE/324/Rev.2/Add.106/Rev.3-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.106/Rev.3. United Nations.
- Van Hool. (n.d.). *Van Hool Public Transport Folder*.
- Van Hool. (2013). *Exqui.City. BRT Solution*. <http://www.exquicity.be/media/723/folder-exquicity-2013-mail.pdf>
- van Oort, N. (2011). *Service reliability and urban public transport design*. PhD thesis, TU Delft, The Netherlands. ISBN 978-90-5584-142-4. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:68f6dd34-53cf-4792-81e7-799c3d552b94>
- Verma, A., Raturi, V., & Kanimozhee, S. (2018). Urban Transit Technology Selection for Many-to-Many Travel Demand Using Social Welfare Optimization Approach. *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 144, Issue 1. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000409
- Vuchic, V.R. (1981). *Urban Public Transportation: Systems and Technology*. Prentice-Hall. ISBN 978-0139394966.
- Vuchic, V.R. (2002). Bus Semirapid Transit. Mode Development and Evaluation. *Journal of Public Transportation*, Vol. 5, No. 2, pp. 71-95. DOI: 10.5038/2375-0901.5.2.4
- Vuchic, V.R. (2005). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, U.S. ISBN 978-0-471-63265-8.
- Walker, P.D., & Roser, H.M. (2015). Energy consumption and cost analysis of hybrid electric powertrain configurations for two wheelers. *Applied Energy*, Vol. 146, pp. 279-287. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.02.009
- Wardman, M. (2001). A review of British evidence on time and service quality valuations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, Issues 2-3, pp. 107-128. DOI: 10.1016/S1366-5545(00)00012-0
- Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, Vol. 11, Issue 4, pp. 363-377. DOI: 10.1016/j.tranpol.2004.05.001
- Wardman, M. (2013). *Value of Time Multipliers: A Review and Meta-analysis of European-wide Evidence*. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting Compendium of Papers. January 13-17, 2013. Washington D.C., U.S.
- Wardman, M., & Whelan, G. (2011). Twenty Years of Rail Crowding Valuation Studies: Evidence and Lessons from British Experience. *Transport Reviews*, Vol. 31, Issue 3, pp. 379-398. DOI: 10.1080/01441647.2010.519127
- Whelan, G., & Crockett, J. (2009). *An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding*. International Choice Modelling Conference 2009. March 30 – April 1, 2009. Harrogate, UK.

- 
- Williams, H.C.W.L. (1977). On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and Planning A: Economy and Space*, Vol. 9, Issue 3, pp. 285-344. DOI: 10.1068/a090285
- Wood, E., Shelton, D.S., & Shelden, M. (2006). Designing Bus Rapid Transit for Light Rail Transit Convertibility: Introduction for Planners and Decision Makers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1955, pp. 47-55. DOI: 10.1177/0361198106195500106
- Zamorano, C., Bigas, J.M., & Sastre, J. (2006). *Manual de Tranvías, Metros Ligeros y Sistemas en Plataforma Reservada*. Consorcio Regional de Transportes de Madrid. ISBN 978-84-86803-61-2.
- Zhang, M. (2009). Bus versus Rail: Meta-Analysis of Cost Characteristics, Carrying Capacities, and Land Use Impacts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2110, pp. 87-95. DOI: 10.3141/2110-11

