



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la operativa de sistemas de recarga para autobuses eléctricos

Treball realitzat per:

Alejandro Ramos Pérez

Dirigit per:

Miquel Àngel Estrada Romeu

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 20 de septiembre de 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Abstract

Improving air quality is one of the main challenges facing urban mobility in the 21st century; electric vehicles have proven to have the potential to be the solution to this problem. The public transport that will change most will be the bus; the technology upgrade of the vehicles will be accompanied by the enhancement in the network performance.

This work seeks to analyse the new electric recharge operations and determine the conditions that guarantee a regular service. Thus, based on classic models for the calculation of the stops capacity, it seeks to incorporate the electrical needs and determine the necessary infrastructure to maintain the service throughout the day with on-street recharging. Given the limited capacity of the batteries, this operation must always be completed; for this reason, the irregularities in bus arrivals are taken into account and gap times will be introduced to mitigate their effects. This will determine the performance metrics for regular lines with electric buses without disturbing their schedules.

Finally, the agency costs are estimated against the current alternative of motor buses; considering the social costs of transportation. The results should facilitate decision-making in the substitution of traditional networks.

Thanks to the data provided by Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) and participants in the Zero Emissions bUs Systems (ZeEUS) project, the analysis of the H6 and H16 lines of the new Barcelona bus network is carried out. The results will show that, nowadays, electric buses are completely viable in regular services.

Resumen

La mejora de la calidad del aire es uno de los principales retos a los que se enfrenta la movilidad urbana en el siglo XXI; los vehículos eléctricos han demostrado tener el potencial de ser la solución a este problema. El modo de transporte público que más cambios sufrirá será el autobús; la actualización de la tecnología de los vehículos vendrá acompañada de mejoras en la operativa de la red.

Este trabajo busca analizar las nuevas operaciones de recarga eléctrica y determinar las condiciones que garanticen un servicio regular. De este modo, partiendo de modelos clásicos del cálculo de la capacidad de las paradas, se busca incorporar las necesidades eléctricas y determinar la infraestructura necesaria para mantener el servicio a lo largo de la jornada mediante recargas en el recorrido. Dada la limitada capacidad de las baterías, esta operación siempre debe completarse; por este motivo se tienen en cuenta las irregularidades en las llegadas de autobuses y se introducen márgenes de tiempo para mitigar sus efectos. Con esto, se determinarán los parámetros de servicio para líneas regulares con autobuses eléctricos sin perturbar sus horarios.

Finalmente, se estima el coste para el operador del autobús eléctrico frente a la alternativa actual de autobuses con motores de combustión; considerando los costes sociales del transporte. Los resultados deberán facilitar la toma de decisiones en la sustitución de las redes tradicionales.

Gracias a los datos aportados por *Transports Metropolitans de Barcelona* (TMB) y participantes en el proyecto *Zero Emissions bUs Systems* (ZeEUS), se lleva a cabo el análisis de las líneas H6 y H16 de la nueva red de bus de Barcelona. Los resultados mostrarán que, en la actualidad, los autobuses eléctricos son completamente viables en los servicios regulares.

Acrónimos y abreviaturas

3iBS	<i>The Intelligent, Innovate Integrated Bus Systems</i>
A	<i>Angle</i>
BEB	<i>Battery Electric Buses – Autobuses con baterías eléctricas</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit – Sistema de autobús de tránsito rápido</i>
CT	<i>Collective Transportation – Transporte Colectivo</i>
DT	<i>Drive-Through</i>
EBSF	<i>European Bus System of the Future</i>
EV	<i>Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine – Motor de Combustión Interna</i>
IPT	<i>Inductive Power Transfer – Transferencia de energía por inducción</i>
IT	<i>Individual Transportation – Transporte Individual</i>
L	<i>Linear</i>
LRT	<i>Light Rail Transit – Sistema de ferrocarril ligero</i>
MB	<i>Motor Buses – Autobuses de propulsión con motor</i>
OLEV	<i>On-Line Electric Vehicle</i>
PATH	<i>Partner for Advanced Transit and Highways</i>
ROW	<i>Right Of Way – Prioridad de paso</i>
S	<i>Sawtooth</i>
SOC	<i>State-of-Charge – Estado de carga</i>
UITP	<i>Union Internationale des Transports Publics</i>
VCC	<i>Vehicle Continuous Charging – Carga Continua del Vehículo</i>
ZEBRA	<i>Zero Emission Battery Research Activity</i>
ZeEUS	<i>Zero Emission Urban Bus System</i>

Nomenclatura de variables utilizadas

β	Valor del tiempo
γ	Número de cabeceras con recarga
Δ	Tiempo de transbordo
θ	Tiempo de descanso de los conductores
λ	Demanda de pasajeros
$\sigma_{\bar{h}}$	Desviación estándar de la diferencia entre la llegada teórica y la real
σ_{t_d}	Desviación estándar de los tiempos de parada
A	Superficie ocupada por las paradas
a	Aceleración del autobús
B	Capacidad de la línea
B_l	Capacidad de una zona de carga individual
B_s	Capacidad de la parada de bus
C	Energía eléctrica o combustible consumido
C_B	Capacidad de la batería
C_O	Coste del operador
C_t	Tiempo de ciclo de la línea
c	Capacidad del carril derecho en la intersección siguiente
c_l	Coste por unidad de distancia para IT
c_d	Coste por unidad de distancia para CT
c_r	Capacidad del giro a la derecha en la intersección siguiente
c_v	Coefficiente de variación del tiempo de parada
D	Conductores contratados para el servicio
E	Distancia desde la entrada de la instalación hasta la zona de carga
f_c	Factor de consumo
f_{ca}	Factor de carga
f_e	Factor reductor de la eficiencia
f_l	factor de localización de la parada
f_m	factor de ajuste de tráfico mixto
f_r	factor de ajuste de giros a la derecha
GHG	Emisiones de contaminantes
g/C	Ratio de tiempo en verde
H	Intervalo de paso
\bar{h}	Promedio de la diferencia entre la llegada teórica y la real
h	Distancia de reincorporación al carril de circulación en una parada Sawtooth
h_1	Distancia de incorporación a un carril mixto en una parada Linear
h_2	Distancia de reincorporación al carril de circulación en una parada Linear
h_{om}	Intervalo de margen de operación
L	Longitud de la ruta entre dos puntos de recarga consecutivos
L_R	Longitud de la ruta completa en los 2 sentidos
L_x	Distancia recorrida desde el punto de carga hasta la posición actual
l	Longitud del recorrido
l_B	Longitud del autobús
M	Número de autobuses de la flota
N	Número de zonas de carga
N_{el}	Número efectivo de zonas de carga
P	Potencia máxima
P_a	Número de pasajeros que bajan por la puerta con mayor uso
P_b	Número de pasajeros que suben por la puerta con mayor uso

R	<i>Resistencia interna de la batería</i>
S	<i>Distancia desde la zona de carga hasta la salida de la instalación</i>
T	<i>Tiempo de recarga</i>
T_e	<i>Tiempo de alimentación</i>
T_m	<i>Tiempo de maniobra para conectarse/desconectarse de la alimentación</i>
T_{op}	<i>Tiempo de operación</i>
T'_{op}	<i>Tiempo de operación para un M determinado</i>
T_R	<i>Tiempo de recorrido de los 2 sentidos</i>
t_a	<i>Tiempo de servicio por pasajero que baja</i>
t_b	<i>Tiempo de servicio por pasajero que sube</i>
t_c	<i>Tiempo de despeje</i>
t_{coord}	<i>Tiempo de coordinación</i>
t_d	<i>Tiempo de parada medio</i>
t_{es}	<i>Tiempo de parada vacía</i>
t_{om}	<i>Tiempo de margen de operación</i>
t_{o/c}	<i>Tiempo de abrir y cerrar las puertas</i>
t_s	<i>Tiempo de parada intermedia</i>
t_y	<i>Tiempo de reincorporación</i>
V_{OC}	<i>Tensión de circuito abierto</i>
v	<i>Volumen de tráfico del carril derecho en la intersección siguiente</i>
v_c	<i>Velocidad comercial</i>
v_p	<i>Velocidad punta</i>
v_r	<i>Volumen de giros a la derecha en la intersección siguiente</i>
v_w	<i>Velocidad a pie</i>
Z	<i>Desviación normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso deseada</i>
z*	<i>Mínimo coste total generalizado</i>
€_A	<i>Coste unitario diario por uso de suelo</i>
€_C	<i>Coste unitario diario por consumo</i>
€_D	<i>Coste unitario diario por personal</i>
€_{GHG}	<i>Coste unitario diario por las externalidades</i>
€_M	<i>Coste unitario diario de la flota</i>
€_N	<i>Coste unitario diario de la infraestructura</i>

Contenido

Abstract	I
Resumen.....	II
Acrónimos y abreviaturas	III
Nomenclatura de variables utilizadas	IV
1. Introducción	1
1.1. Medios de transporte colectivo e individual: Economías de escala y reducción de la congestión	3
1.2. Bus Rapid Transit vs Light Rail Transit.....	6
1.3. El autobús eléctrico como alternativa.....	10
2. Electrificación del autobús	11
2.1. Métodos de electrificación.....	12
2.2. Batería: Métodos de recarga.....	16
2.3. Comparativa Diésel-Eléctrico. Proyecto ZeEUS.....	18
2.4. Conceptos teóricos asociados a las baterías	19
3. Modelización de la operativa de autobuses eléctricos	22
3.1. Hipótesis.....	23
3.2. Operativa tradicional en las paradas.....	24
3.3. Incorporación de nuevas variables eléctricas.	32
3.4. Operativa de las líneas	34
3.5. Caracterización de las paradas de estudio	42
3.6. Estrategias de recarga	51
4. Aplicación del modelo	53
4.1. Líneas de estudio.....	54
4.2. Casos de estudio.....	62
4.3. Validación de la recarga eléctrica	71
5. Costes del operador	72
6. Evaluación de los costes.....	76
7. Conclusiones.....	79
Bibliografía	81
Índice de figuras	84
Índice de tablas	86
Anejos.....	87

1. Introducción

Desde hace décadas la planificación del transporte urbano en las grandes ciudades ha sido objeto de estudio de muchos técnicos y un frente de debate para múltiples agentes políticos y grupos de presión.

Uno de los grandes desarrollos que influyó en los viajes y el entorno urbano fue el uso generalizado del automóvil privado, que introdujo drásticos cambios en las condiciones de las ciudades. La gran comodidad del coche para usuarios particulares fue el motivo de su auge; sin embargo, el espacio requerido por el automóvil es mucho mayor que cualquier otro modo de transporte. La congestión de la vía pública se convirtió en un problema importante. Esto conllevó ineficiencias en el transporte y un mayor impacto en la calidad ambiental de las ciudades. Esto puede verse como la “colisión de ciudades y coches”. (Vuchic, 1999)

La confrontación entre vehículos privados y medios de transporte público colectivo tiene su origen décadas atrás. Desde las inversiones en infraestructuras para el coche después de la II Guerra Mundial hasta las actuales restricciones de circulación por matrículas, las administraciones han aplicado políticas en beneficio de un modo u otro. Como resultado de estas decisiones la demanda y el coste de los viajes variará.

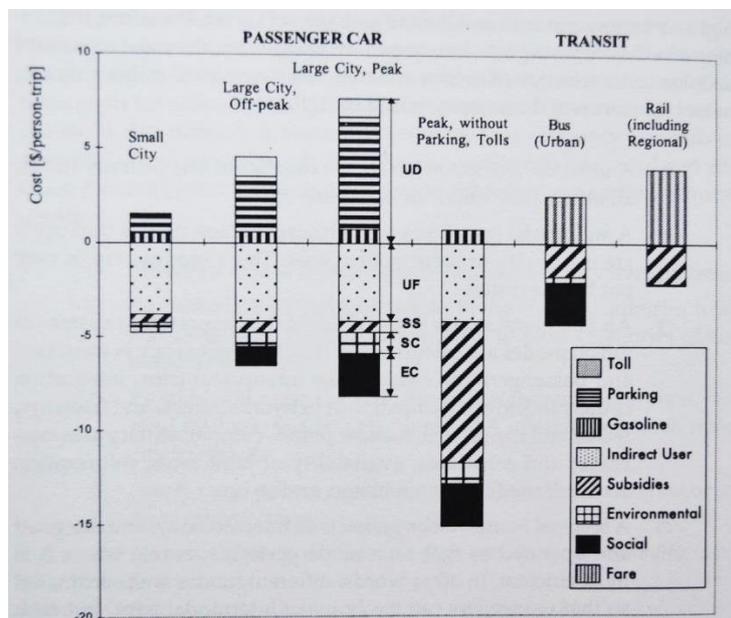


Figura 1 Coste total de los viajes urbanos por diferentes modos y situaciones.

Los signos negativos se utilizan para distinguir los costes directos de los indirectos; no implican valores negativos.

Fuente: (Vuchic, 1999).

A pesar del mayor conocimiento sobre los costes del transporte, el vehículo privado aún conserva una importante posición por encima del transporte colectivo; debido a la poca visibilidad de los costes indirectos de cada trayecto. Dado que los conductores privados no

llegan a pagar el coste total del viaje (incluyendo externalidades), el transporte público debe ser subsidiario para atraer pasajeros potenciales.

Para afrontar los retos futuros, el transporte urbano puede mejorar su servicio a través de una serie de incentivos y medidas a medio y largo plazo. Entre ellas está la mejora de las conexiones entre diferentes modos de transporte, facilitando la evolución a una red multimodal eficiente. Las problemáticas más urgentes que deberán resolverse en las ciudades y zonas metropolitanas son: la congestión resultante de tener grandes demandas, la interacción entre diferentes modos de transporte y el aumento del consumo energético y de las emisiones.

Para visualizar el desarrollo en fases de estos modos y los problemas que presenta el transporte urbano de pasajeros se recurre a un modelo de evolución de los sistemas de transporte en un área urbana tipo propuesto en (Vuchic, 2007). Con el crecimiento demográfico y urbanístico de pueblos (<100.000 hab) a ciudades pequeñas (<500.000 hab) se intensifica el tráfico de pequeños vehículos (todos ellos particulares) y las calles estrechas se suelen congestionar. Para aumentar la capacidad del sistema se pueden hacer dos modificaciones básicas: el ensanchamiento de las calles o el uso de vehículos de mayor tamaño.

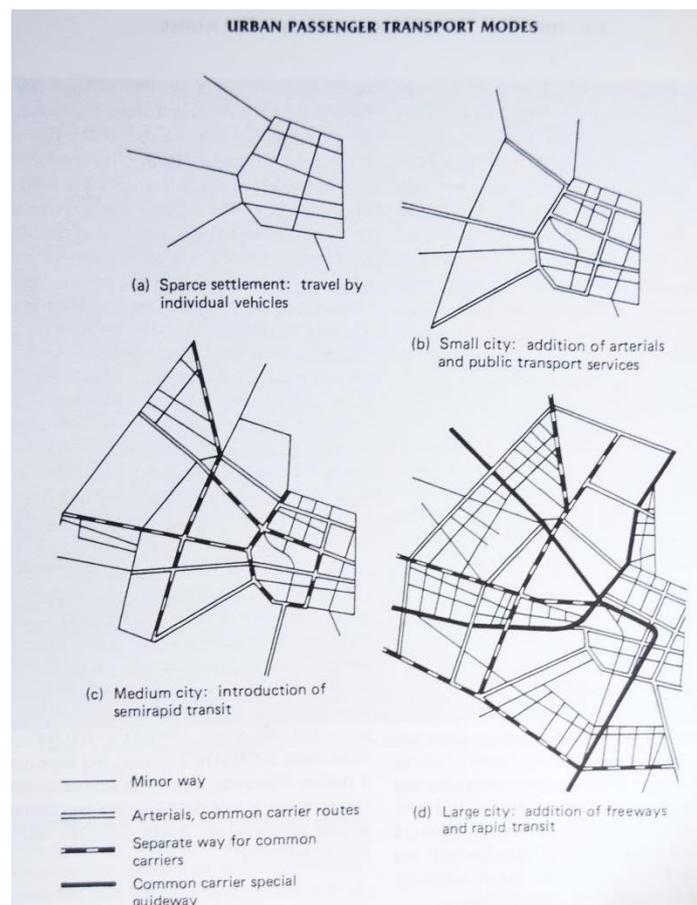


Figura 2 Evolución de los sistemas de transporte con crecimiento del área urbana. Fuente: (Vuchic, 2007).

Si se alcanza una demanda que supera el óptimo de capacidad y se introducen vehículos de mayores dimensiones, el coste unitario de transporte se reducirá para todos los modos de transporte. Con la redistribución de la demanda se reducen la congestión y todas las externalidades derivadas en cuanto a ruido y contaminación medioambiental. Estos vehículos tan solo pueden ser introducidos bajo la forma de servicios de transporte público colectivo, por no poder obligar a propietarios privados a llevar a pasajeros.

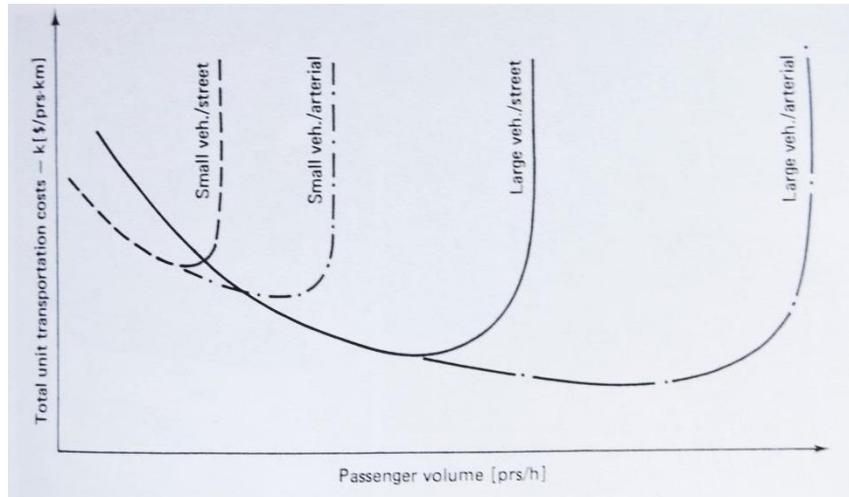


Figura 3 Impacto de la capacidad de las calles y el tamaño de los vehículos en el coste unitario. Fuente: (Vuchic, 2007).

1.1. Medios de transporte colectivo e individual: Economías de escala y reducción de la congestión

Los modos de transporte urbano se agrupan en dos grandes familias: el transporte colectivo (en adelante CT) y el transporte individual (en adelante IT). Dentro de cada una existe una gran diversidad de ellos; las diferencias tienen su origen tanto en el medio de propulsión como en la forma de dar servicio.

Por ello, no se puede establecer una comparativa generalista entre ambos grupos. Para valorar las virtudes y carencias que ofrece el CT frente al IT se debe hacer un análisis más preciso que debe enmarcarse en una única situación: se escoge un caso teórico de sistema 2D asimilable al de una ciudad, postulado por (Daganzo, 2010). Como condiciones de contorno se asume que la demanda (λ) es uniforme; en el CT se permiten transferencias y no se saltan paradas; en el IT se espera un comportamiento similar al de un taxi.

$$\left(\frac{z^*}{\beta} - \frac{l}{v_p}\right) = \Delta + 2\sqrt{\frac{lt_s}{v_w}} + 6\left(\frac{c_d}{\beta\lambda v_w}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.1)$$

$$\left(\frac{z^*}{\beta} - \frac{l}{v_c}\right) = c_l \frac{l}{\beta} \quad (1.2)$$

donde:

z^* =Mínimo coste total generalizado [€]

β =Valor del tiempo [€/h]

l =Longitud del recorrido [km]

v_p =Velocidad punta [km/h]

v_c =Velocidad comercial [km/h]

Δ =Tiempo de transbordo [h]

t_s =Tiempo de parada intermedia [h]

v_w =Velocidad a pie [km/h]

λ =Demanda de pasajeros [pax/h]

c_d =Coste por unidad de distancia para CT [€/pax·km]

c_l =Coste por unidad de distancia para IT [€/km]

Las ecuaciones 1.1 y 1.2 representan los costes medios del CT y del IT respectivamente. La parte de la izquierda tiene en cuenta los costes fijos por salvar una distancia, mientras que en la derecha están representados los costes variables. La economía de escala se da porqué en el CT los costes variables son inversamente proporcionales a la raíz cúbica de la demanda; relación que no existe en el IT.

Como consecuencia directa, las metrópolis escogerán el CT como medio de desplazamiento preferente debido a su elevada población y la demanda generada. Sin embargo, hay que tener en cuenta otros factores, como puede ser el poder adquisitivo promedio de la región, el tiempo de acceso...

Dejando de lado la cuestión económica del transporte, otra de las diferencias más importantes entre el CT y el IT es la congestión que inducen en la vía pública. Las redes de transporte no están aisladas entre sí, hay que tener en cuenta la co-existencia de las mismas en la vía pública así como la interferencia entre los vehículos. Por ello, es comprensible que el mayor beneficio de cara a evitar la congestión se obtendrá de aquellos sistemas ofrecidos con vehículos de mayor capacidad; como se puede observar la comparación en las calles de Seattle realizada por la consultoría *International Sustainable Solutions*.

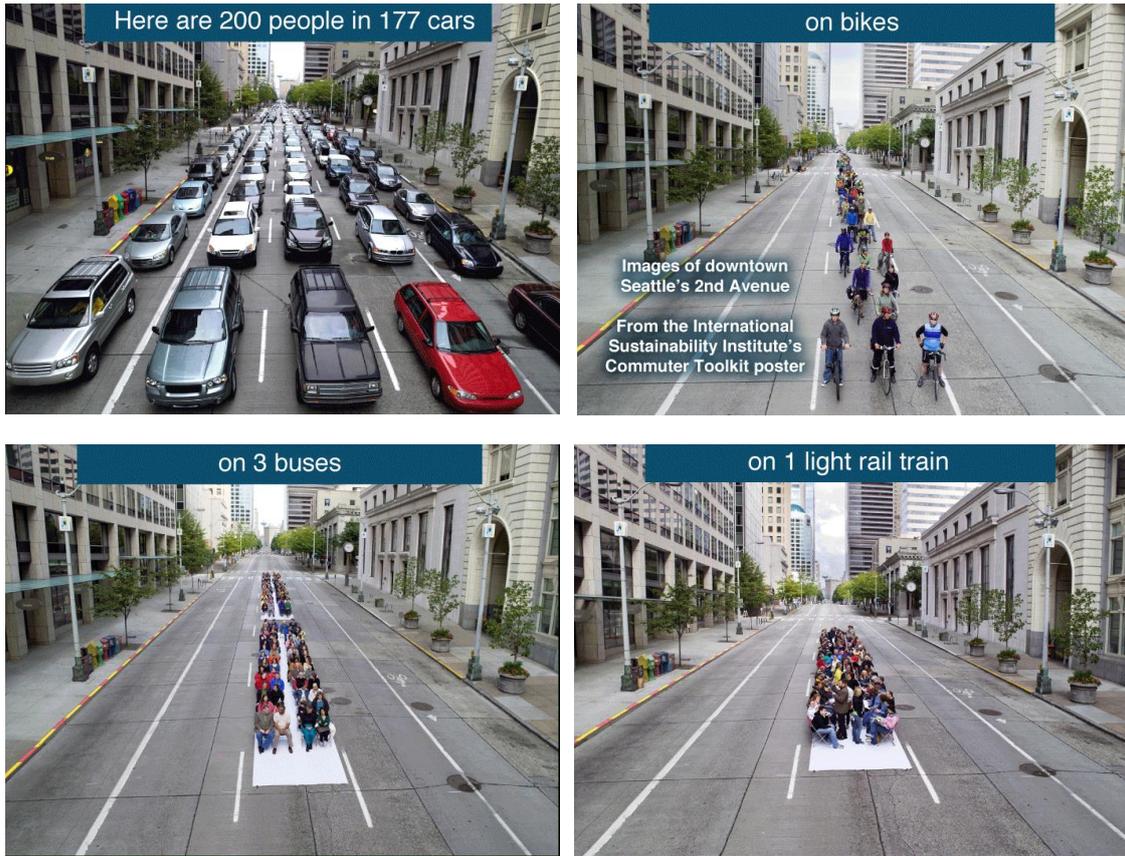


Figura 4 Espacio ocupado por 200 pasajeros en diferentes modos de transporte.
Fuente: (International Sustainable Solutions, 2015).

1.2. Bus Rapid Transit vs Light Rail Transit

Centrando el estudio en los modos de transporte colectivo, se pueden establecer categorías según su integración en el espacio público. En (Vuchic, 2005) se establecen tres categorías en función del ROW (*Right-Of-Way*):

- **Tipo C:** Representa al transporte en superficie por calles con tráfico mixto. El transporte público puede tener tratamiento preferente, como pueden ser carriles VAO o preferentes no exclusivos.
- **Tipo B:** Incluye aquellos tipos de ROW que longitudinalmente están separados por bordillos, barreras, separación de nivel... o normativamente exclusivos.
- **Tipo A:** Completamente segregado sin ningún cruce o acceso legal de otros vehículos o peatones.

El foco de interés de este trabajo se centra en el autobús, concretamente en la logística de los BRT (*Bus Rapid Transit*) de carga eléctrica. Dicho modo se clasificaría como ROW B, pese al cambio de MB (*Motor Buses*) a BEB (*Battery Electric Buses*). Actualmente muchas ciudades europeas apuestan por la modificación del uso de la vía pública, definiendo *carriles bus* que permiten la segregación del transporte urbano colectivo del transporte privado. Son pocos los casos que incluyen barreras físicas mediante las cuales estos carriles queden aislados.

En la misma categoría se situarían los LRT (*Light Rail Transit*), la alternativa más próxima. Pese a tener una infraestructura propia y tramos que pueden estar parcialmente aislados, este modo de transporte puede compartir el mismo espacio público que otros modos y que los peatones. La manera como estos interaccionan en sus cruces es lo que los sitúa en la misma categoría que el BRT.

Tabla 1 Clasificación de los modos de transporte público urbano por categoría ROW y tecnología. (Vuchic, 2007)

Tecnología ROW	Conducción asistida por carretera	Neumático guiado, parcialmente guiado	Ferroviario	Especializado
C	Paratránsito Bus lanzadera Bus regular	Trolebús	Tranvía	Ferry <i>Hydrofoil</i>
B	<i>Bus rapid transit</i> (BRT)	Bus guiado	<i>Light rail transit</i> (LRT)	(Tren cremallera)
A	Bus en carriles bus exclusivamente (no operativo)	Metro de neumáticos Monorraíl de neumáticos <i>Automated Guided Transit</i> (AGT)	<i>Light rail rapid transit</i> Metro Ferrocarril regional Monorraíl	Tren cremallera Funicular Tranvía aéreo

En la misma publicación de Vuchic se hace un análisis de las diferencias entre ambos sistemas. En este estudio se utiliza un criterio de signos contrario al propuesto en su libro para mostrar en positivo los beneficios del autobús. El BRT, comparado con el LRT, presenta las siguientes ventajas (+) y desventajas (-):

1. (-) Debido a los carriles de ferrocarril en vez de carriles por carretera, el uso segregado para el LRT es más fácil de diseñar y no requiere supervisión para que se respete, tal como es necesaria en el BRT.
2. (-) Debido a la tracción eléctrica, el LRT tiene un mejor rendimiento que el BRT.
3. (-) El LRT no produce ninguna emisión a lo largo de la línea y emite mucho menor ruido que el BRT.
4. (-) El LRT tiene mejor integración en calles y áreas peatonales que el BRT.
5. (-) El LRT puede ir bajo tierra, mientras que el BRT no.
6. (-) Los vehículos del LRT disponen de más espacio, son más cómodos y tienen una mejor calidad en la conducción.
7. (-) El LRT tiene mejor imagen, es más popular y atrae a más pasajeros
8. (-) El LRT tiene un mayor impacto positivo en el desarrollo urbano que el BRT.
9. (+) Las inversiones para el LRT son superiores al BRT
10. (+) Por ser una técnica diferente, el LRT requiere una mayor construcción de infraestructuras, nuevos equipamientos y una implantación más larga.
11. (+) Para la implementación de la primera línea de LRT en una ciudad, la introducción de una nueva tecnología requiere nuevos espacios para su uso e instalaciones de mantenimiento.
12. (+) Los servicios de LRT están limitados a la infraestructura de la red y requiere más transferencias que los autobuses.

A la comparativa anterior se le puede añadir algunas reflexiones que muestran que el balance expuesto por Vuchic puede cambiar a favor del BRT.

En cuanto al primer y al séptimo punto, se ven afectados por la sociedad y la ciudad en la que implantan estos sistemas; un entorno amigable con el transporte público puede convertir ambos puntos en favorables para el BRT.

Respecto al segundo, las nuevas tecnologías están demostrando que el rendimiento técnico de los motores eléctricos está superando a sus homólogos de combustión. Es cuestión de tiempo que esta desventaja quede en el pasado junto con los modelos antiguos. En esta misma línea está el tercer punto, ya que se pierde la más destacada de las externalidades del transporte actual, el consumo de combustible fósiles y la emisión de gases contaminantes.

Gracias a los puntos del noveno al decimoprimeros se puede destacar una de las grandes ventajas de una red BRT: el ahorro económico y la eficiencia del espacio ocupado en la vía pública. Pensando en el transporte como componente fundamental de las sociedades modernas, se puede extrapolar que la ausencia de infraestructuras rígidas aporta versatilidad a la red y dota a la ciudad de resiliencia; característica aún difícil de valorar a día de hoy.

Por último, cabe remarcar la bondad del autobús que se presenta con el último punto; la cobertura territorial del BRT es superior y puede modificarse fácilmente, lo que puede ser el argumento clave para posicionarlo como modo de transporte preferente para su categoría.

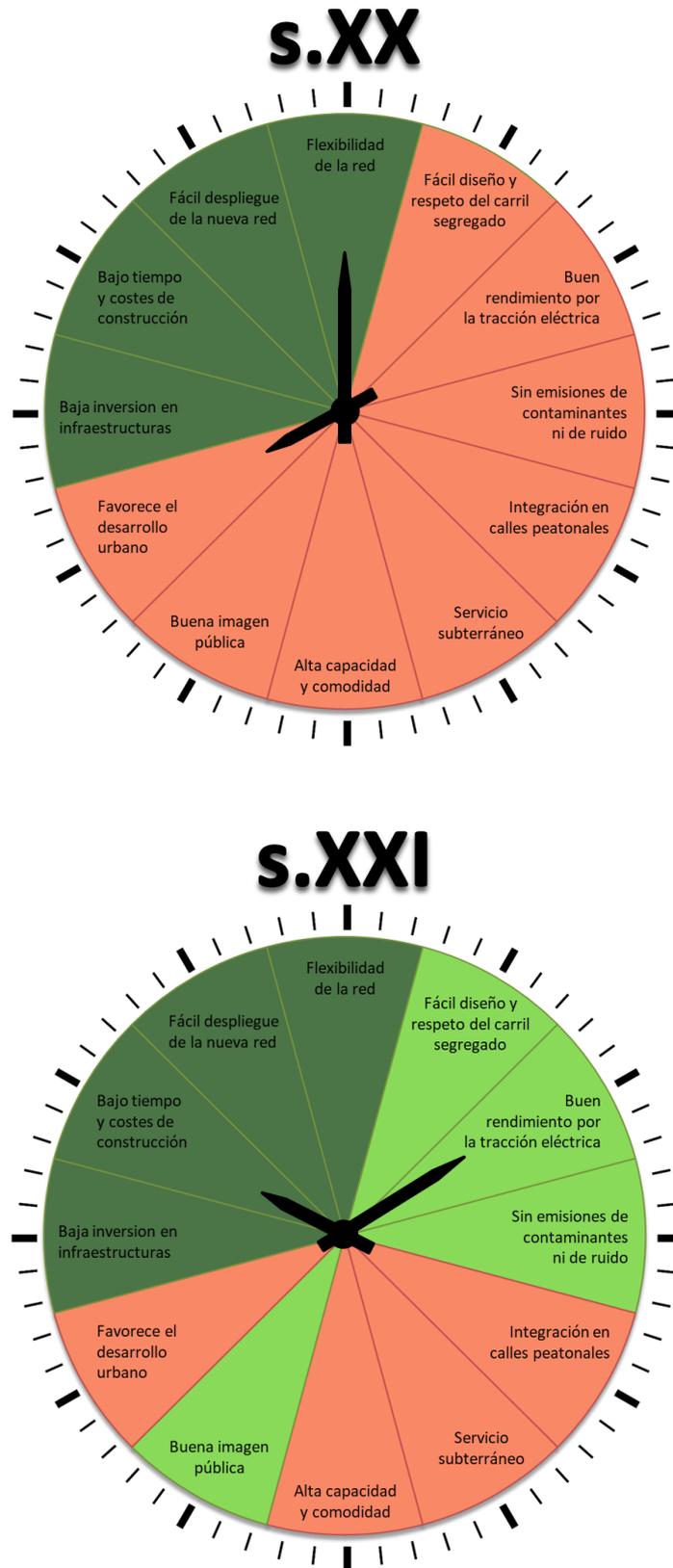


Figura 5 Beneficios del BRT frente al LRT. Arriba, con la tecnología del s.XX. Abajo, con las mejoras del s.XXI.
Fuente: Elaboración propia.

1.3.El autobús eléctrico como alternativa

La comparativa de los modos de transporte público del autobús y el tranvía muestra los beneficios que aporta cada uno de ellos, pero también da pie a analizar una de las mayores externalidades que ha jugado en detrimento del autobús tradicional: la contaminación.

Ya a principio de los años 70 se tenía en cuenta el consumo energético y la contaminación de los modos de transporte. En (Hoffman, 1972) se establece una comparativa entre 3 casos de vehículos rodados de diferentes categorías: motocicleta, automóvil estándar de uso particular y autobús de 6 ruedas diésel. Los dos primeros casos se plantean desde una perspectiva eléctrica, ya que en aquel entonces podía asumirse viable su producción por el tamaño del parque de vehículos. Este no era el caso del bus diésel; sin ninguna alternativa eléctrica con una viabilidad comercial real, se consideraba el más perjudicial de la terna: tanto por emisiones, como por ruido y por su coste energético.

Desde entonces, y como norma general, el autobús no ha visto revoluciones importantes en su diseño para reducir contaminación, ruido, peso... mientras que los automóviles particulares sí que han recibido mejoras año tras año. Si bien es cierto que los autobuses han acumulado una serie de pequeñas innovaciones, el gran salto vendrá cuando los BEB dispongan de baterías con suficiente capacidad y poco peso como para permitir su implantación total en las redes urbanas. Mientras tanto, si se cuantifica económicamente la externalidad de la contaminación, el autobús presenta desventajas frente al resto de modos.

Teniendo en cuenta la inviabilidad económica de implantar una red férrea en sustitución del autobús que sea capaz de asumir su demanda con múltiples O/D de toda una ciudad, la electrificación será el elemento clave para alcanzar la sostenibilidad socioeconómica que necesita el autobús. Los nuevos modelos de autobús supondrán una reducción directa de las emisiones de gases invernadero y partículas nocivas, lo que derivará en una mejora de la salud pública y del medio ambiente. Además, existe una serie de mejoras técnicas que se expondrán en apartados posteriores y son muestra de un inminente salto tecnológico que puede mejorar la eficiencia del servicio.

Finalmente, merece la pena recordar los beneficios que supone apostar por el transporte público, en forma de autobús eléctrico, frente al vehículo privado. La masiva dependencia del coche ha derivado en un elevado consumo de espacio público. En las zonas urbanas, donde el espacio es más escaso día a día, un automóvil consume 285 m²min/pax-km; mientras que un autobús varía de 17 m²min/pax-km (en carriles prioritarios) a 8 m²min/pax-km (en tráfico mixto), lo que convierte al autobús en el modo de viajar más eficiente en cuanto a ocupación de espacio público. Por otra parte, y de acuerdo a lo expuesto anteriormente, el autobús presenta una reducción de los costes totales de viaje frente a los vehículos privados; teniendo además la ventaja de la economía de escala. (Corazza et al., 2016)

2. Electrificación del autobús

El cambio de autobuses tradicionales o híbridos a los nuevos modelos totalmente eléctricos es un proyecto de futuro compartido por las más altas instituciones europeas. En el marco del *7th Framework Program* de la Comisión Europea se han desarrollado diferentes proyectos de investigación en relación al autobús eléctrico. Coordinados por la UITP (*Union Internationale des Transports Publics*) destacan tres de ellos: EBSF (*European Bus System of the Future*), 3iBS (*the Intelligent, Innovative Integrated Bus Systems*) y ZeEUS (*Zero Emission bUs Systems*).

El objetivo es mejorar la imagen de los sistemas de autobús urbanos y zonas suburbanas a través del desarrollo de nuevas tecnologías en vehículo e infraestructuras en combinación con las mejores prácticas operativas.

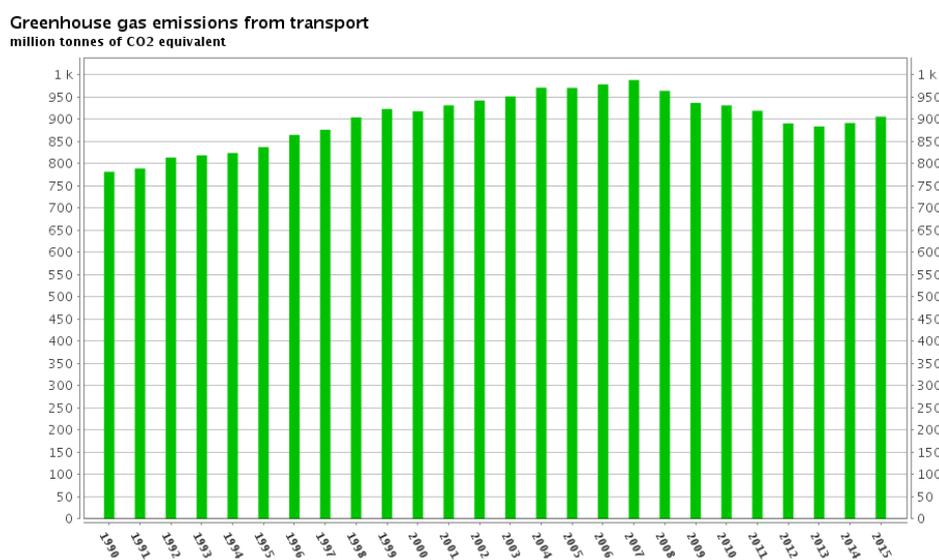


Figura 6 Emisiones de gases de efecto invernadero por el transporte (carretera, ferrocarril, navegación interior y aviación nacional) en Europa 1990-2015.

Fuente: (Eurostat, 2017).

Esta inversión en investigación es necesaria dado el peso que tiene el transporte, en conjunto, en la emisión de contaminantes. El consumo de combustibles fósiles en el transporte representó un 20.2% de todas las emisiones de gases invernadero en la Europa de los 28 en 2011 (Corazza et al., 2016). De acuerdo a los datos disponibles en (Eurostat, 2017), desde 1990 hasta 2007 las emisiones aumentaron un 26%, pico histórico previo a la crisis económica de 2008. Los datos más actualizados muestran que, pese a bajar las emisiones a lo largo de todos los años de crisis económica, estas vuelven a incrementarse una vez finalizada esta etapa; en el año 2015 se emitieron un 16% más de emisiones respecto al valor de referencia de 1990.

A falta de nuevos datos con la evolución en los dos últimos años, la Figura 6 muestra una relación entre el crecimiento económico y las emisiones; dado que los datos esperados son desfavorables, la investigación y la aplicación de nuevas tecnologías para desarrollar redes de transporte público con vehículos eléctricos es una prioridad estratégica para los países comunitarios y la sociedad en general.

2.1. Métodos de electrificación

Es lógico pensar que la tecnología que ha alimentado los sistemas eléctricos de propulsión ha cambiado a lo largo de los años. Para hacer un estudio más detallado y comprensible de estas técnicas hay que considerar otros ámbitos de aplicación, más allá del autobús; el desarrollo de las baterías, por ejemplo, no habría seguido la misma evolución si no estuviera vinculado con los vehículos privados.

Los tres métodos de electrificación más destacados que se exponen en el presente documento son: la catenaria, las baterías y la inducción.

2.1.1. Catenaria

El sistema de carga por catenaria se basa en la existencia de una red de alimentación eléctrica aérea, a la cual se conectan los autobuses mediante unas plumas. Al estar conectado en todo momento a la alimentación, se puede clasificar como VCC (*Vehicle Continuous Charging*).

Este método presenta una ventaja bastante clara: los bajos costes, tanto de inversión en infraestructuras (en comparación a otros modos como el tranvía) como en componentes (baterías).

Pese a todo, las desventajas que presenta son importantes. Primero, el recorrido de los autobuses está restringido a la red de catenarias existente por lo que no aporta gran flexibilidad. Segundo, la motricidad de estos autobuses está limitada al suministro constante de electricidad; en caso de corte del suministro o fallo en la conexión el vehículo se quedaría inmóvil si no dispusiera de una batería o motor auxiliar.

Desde el punto de vista de la integración en el entorno urbano, merece la pena destacar el importante impacto visual que tienen las catenarias en el perfil de las calles de la ciudad. Este sistema lleva asociado una red de cableado que afecta a la estética de la ciudad e introduce limitaciones de altura y de seguridad para otras actividades.



Figura 7 Autobús con catenaria.

Fuente: Primicia Diario. 28 de Noviembre de 2013.

2.1.2. Baterías

Las baterías son un elemento bastante complejo, ya que pueden ser tratadas según el tipo de materiales utilizados en ellas y también según los métodos de carga que emplean. Para simplificar su explicación, se aborda el tema de los materiales en este punto y los métodos específicos de carga y recarga física para autobús en la sección 2.2.

La historia de las baterías eléctricas se remonta hasta 1859, con la invención de las baterías de plomo por Gaston Planté y su comercialización en automóviles en 1881; efímera etapa que comenzó a desaparecer con la comercialización del Ford T en 1912 y los bajos costes de éste. Desde aquella época se han desarrollado diferentes modelos, que podrían agruparse en 3 grandes familias de baterías recargables: las plomo-ácido (*lead-acid*), las de níquel y las ion-litio.

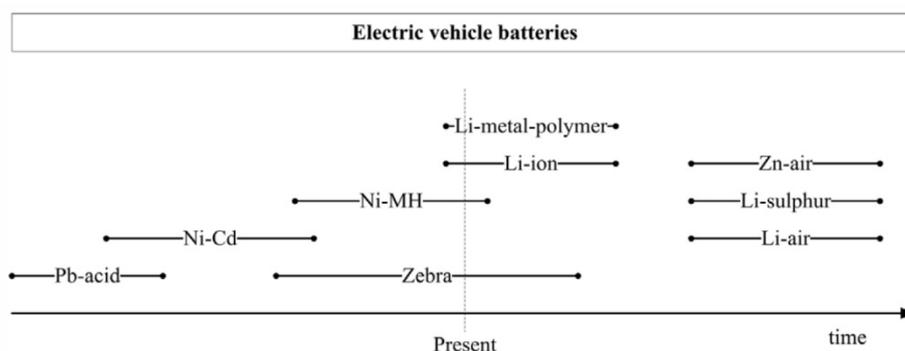


Figura 8 Desarrollo histórico de las baterías para vehículos eléctricos.
Fuente: (Yong et al., 2015)

Las **plomo-ácido** (*Pb-acid*) se componen de un cátodo de dióxido de plomo, una placa de plomo como ánodo y un electrolito de ácido sulfúrico diluido. La tecnología empleada es madura y barata, con la posibilidad de un reciclaje al final de su vida útil. Sin embargo, existen algunos inconvenientes como pueden ser la baja densidad de energía, su elevado peso, los largos tiempos de carga, los costes de inspección del nivel del electrolito y el impacto ambiental en caso de no tratar su reciclaje adecuadamente.

El siguiente grupo es el de las baterías basadas en el níquel; destacan las **níquel-cadmio** (*Ni-Cd*) y las **níquel-hidruro metálico** (*Ni-MH*). Se considera que esta tecnología también está bastante desarrollada y tiene mejor densidad de energía que las de plomo, así como ciclos de vida superiores. Sin embargo, son poco eficientes en los procesos de carga y descarga, tienen efecto memoria y no funcionan bien en bajas temperaturas. Estos problemas de eficiencia la descartan como tecnología para vehículos eléctricos, en especial para aquellos destinados al transporte público. El impacto ambiental también es un gran inconveniente; la toxicidad del cadmio provocó que las *Ni-Cd* se prohibieran, como ejemplo, por el Parlamento Europeo el 9 de octubre de 2013. Un tercer modelo de la familia serían las **ZEBRA** (*Zero Emission Battery Research Activity*) ($Na-NiCl_2$) que se caracterizan por tener alta densidad de energía y poder específico, haciéndolas idóneas para su aplicación en el campo de los vehículos eléctricos, pero trabajando a temperaturas muy elevadas (245-350°C) se introducen factores de riesgo para la seguridad.

La familia de baterías que ha permitido el desarrollo de los vehículos eléctricos en los últimos años ha sido la basada en el Litio. Existen diferentes modelos: las de **ion de litio** (*Li-ion*), las de **polímero de litio** (*LiPo*) y las de **litio-ferrofosfato** (LiFePO_4). Como regla general se puede decir que tienen alta densidad de energía y poder específico; son ligeras, baratas y no son tóxicas. Además, la característica que las ha situado como el referente actual para la movilidad eléctrica es su carga rápida. Los inconvenientes (ya superados) que presentaban estas baterías hasta hace poco eran los problemas en su funcionamiento, que en algunos casos provocaron incendios e incluso explosiones.

Además de las tipologías mostradas hasta ahora, existen nuevas baterías experimentales con mejor rendimiento. Algunos de estos modelos son las baterías de **litio-azufre** (*Li-S*); las **zinc-aire** (*Zn-air*), que muestran gran potencial para sustituir a las *Li-ion*, y **litio-aire** (*Li-air*). Esta nueva generación de baterías presenta una densidad de energía suficientemente alta para competir con los motores de combustión interna.

Tabla 2 Comparativa de baterías para vehículos eléctricos. (Yong et al., 2015)

Tipo de batería	Voltaje nominal (V)	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de energía volumétrica (Wh/L)	Poder específico (W/kg)	Ciclo de vida	Coste de producción (\$/kWh)	Desarrollo de la tecnología	Impacto ambiental
Pb-acid	2.0	35 (baja)	100	180(Pesada)	1000	60	Muy desarrollada	Muy elevado
Ni-Cd	1.2	50-80	300	200	2000	250-300	Muy desarrollada	Muy elevado por el cadmio
Ni-MH	1.2	70-95	180-220	200-300	<3000	200-250	Muy desarrollada	Bajo
ZEBRA	2.6	90-120	160	155	>1200	230-345	Desarrollada	Bajo
Li-ion	3.6	118-250	200-400	200-430	2000	150	No está desarrollada del todo	Muy bajo
LiPo	3.7	130-225	200-450	260-450	>1200	150	No está desarrollada del todo	Muy bajo
LiFePO ₄	3.2	120	200	200-4500	>2000	350	No está desarrollada del todo	Muy bajo
Li-S	2.5	350	350	-	300	100-150	En desarrollo	-
Zn-air	1.65	1400	1400	80-140	200	90-120	En desarrollo	-
Li-air	2.9	1520-2000	1520-2000	-	100	-	En desarrollo	-

El consumo unitario de las baterías dependerá de muchas variables: la densidad de paradas, la congestión, la pendiente de la ruta, el clima... La autonomía de los BEB está limitada por su tecnología; actualmente pueden llegar a cubrir una jornada entera sin recarga, pero hay tan poco margen que la mala climatología podría suponer un corte de servicio.

2.1.3. Inducción

Cuando hablamos de la **inducción IPT** (*Inductive Power Transfer*), se tiene que tener en cuenta que la energía se sigue almacenando mediante baterías. La diferencia respecto al punto anterior recae en el método de la recarga: cuando hablemos de baterías, la recarga será física; en el caso de la inducción, la recarga será realizada mediante un campo electromagnético.

Sin entrar en muchos detalles, la teoría en la que se fundamenta este método es la siguiente: La electricidad pasa a través de unas bobinas situadas bajo la carretera en unas placas, generando un campo magnético. Este campo induce voltaje a través de las bobinas del autobús y se cargan las baterías del vehículo.

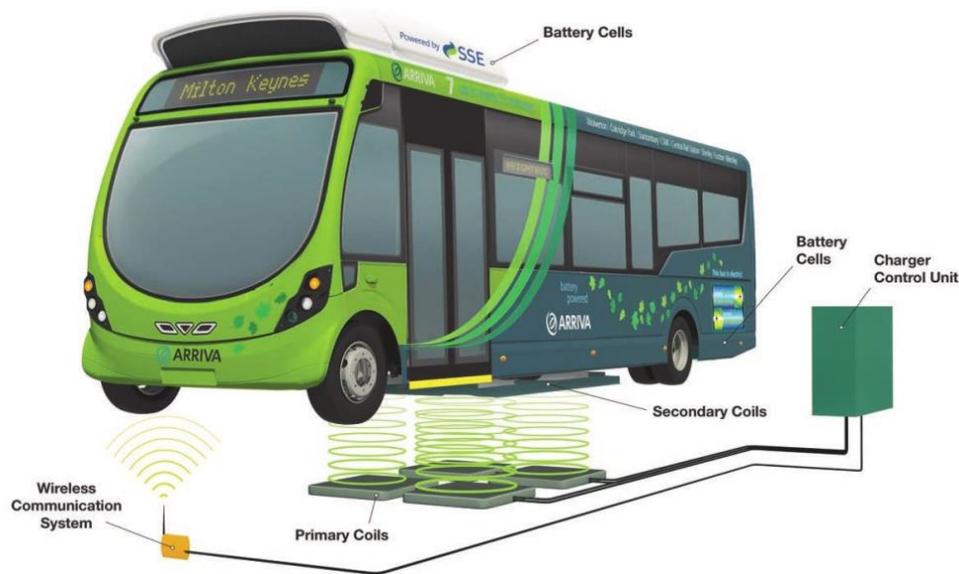


Figura 9 Esquema de funcionamiento de la tecnología de carga por inducción.

Fuente: (Wright Bus International, 2014)

La recarga se puede realizar en paradas o en la propia carretera mientras circulan los vehículos, si es que la infraestructura está preparada. Este método de recarga en recorrido no está completamente desarrollado, pero en teoría debería facilitar una fácil transición de los vehículos de combustión hacia los eléctricos. (Mercadal & Robusté, 2012)

Existen algunos ejemplos de sistemas IPT: En California el grupo PATH (*Partner for Advanced Transit and Highways*) desarrolló el sistema llamado *Road Powered Electric Vehicles* (RPEV) que alcanzaba una eficiencia del 60% de transferencia de energía con una separación de aire de 7.6cm; en 2010 se desarrolló el sistema *On-Line Electric Vehicle* (OLEV) basándose en el primero, consiguiendo una eficiencia del 74% con una separación de aire de 20cm.

2.2. Batería: Métodos de recarga

De los anteriores métodos de electrificación, el sistema de alimentación que presenta mayores ventajas para su implantación en las redes de autobús modernas es el de las baterías. En este punto se explican algunas de las características más importantes.

2.2.1. Procesos de carga

La seguridad, la durabilidad y el rendimiento de las baterías están estrechamente relacionados con la forma en la que se realizan sus ciclos de carga y descarga; por ello es importante analizar algunos de los procesos realizados actualmente (Young et al., 2013). Abusar de una batería puede reducir significativamente su vida útil y puede resultar peligroso.

- **Voltaje constante.** En este método se suministra a la batería una carga a voltaje constante. Es adecuado para todo tipo de baterías y probablemente tiene el sistema de carga más sencillo. La corriente de carga puede ser grande en una primera etapa y decrecer gradualmente hasta cero cuando la batería está totalmente cargada. La contrapartida de este método es la necesidad de energía muy alta en la prima etapa de carga.
- **Corriente constante.** En este método, el voltaje aplicado a la batería se controla para mantener una corriente constante. El SOC (*State-of-Charge*), concepto desarrollado en el punto 2.4, aumentará linealmente en función del tiempo para el método a corriente constante. La dificultad radica en determinar si se ha completado la carga con un SOC=100%. El momento de corte de la carga puede determinarse por la combinación del aumento de la temperatura, el aumento del gradiente de temperatura, el incremento del voltaje, la menor variación del voltaje y el tiempo de carga.
- **Combinación de voltaje y corriente constante.** Durante el proceso de carga de una batería se suelen usar ambos métodos. Primero se realiza una precarga a baja corriente constante (que permite detectar posibles malfuncionamientos) y entonces se carga a alta corriente constante. Cuando el voltaje alcanza cierto valor, se cambia a carga a voltaje constante. Proceso mostrado en la Figura 10.

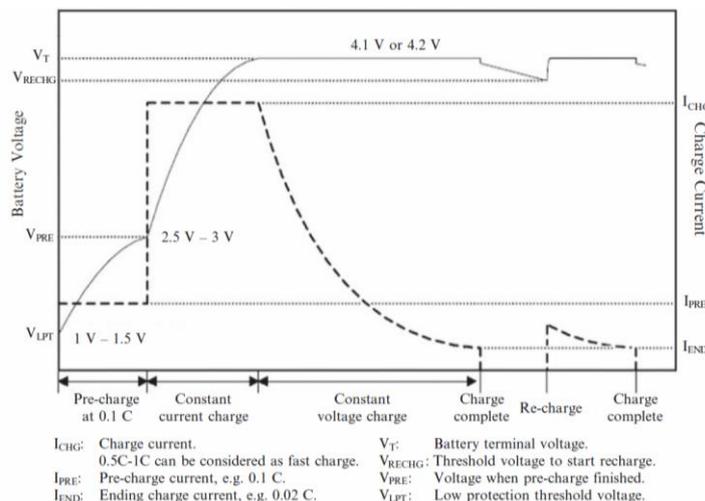


Figura 10 Típico perfil de carga de una celda Li-ion
Fuente: (Young et al., 2013)

2.2.2. Operativa de recarga

Una vez visto el proceso de carga desde la perspectiva de las baterías, conviene analizar cómo se pueden realizar físicamente los procesos de carga para el caso de estudio de este proyecto: los autobuses eléctricos.

- **Off-street.** Este tipo de recarga se realiza de noche en cochera cuando se acaba la jornada; por ello también se le conoce como el método *overnight*. Los BEB que trabajan con este método disponen de baterías con mayor capacidad y tienen mayor alcance, pero requiere largas recargas. Al hacer la recarga fuera de la ruta, el tiempo de ciclo de los autobuses no se ve afectado por esta operación.

El tiempo de la operación de carga puede llevar entre 2 y 5 horas a carga lenta. En el pasado ha sido utilizado cuando las baterías no eran suficientemente eficientes como para dar servicio toda la jornada ni existía recarga *on-street*; se realizaba una recarga rápida de una hora un par de veces al día. Este método se suele acompañar de una adquisición de más vehículos que los necesitados teóricamente.

- **On-street.** Conocido como *opportunity charging*. Existen dos metodologías para la recarga en calle: la primera es recargando en la parada final de línea, la segunda en paradas intermedias con pasaje en el interior. Los BEB que trabajan con este tipo de cargas se benefician de las cargas rápidas en ruta; por ello disponen de baterías de menor capacidad y tienen menor alcance. Al hacer la recarga en ruta, el tiempo de ciclo de los autobuses puede verse afectado por esta operación.
 - a. **Recarga en la parada final de la línea.** La operación de carga puede ser hecha en las paradas finales de cada dirección. Este proceso suele tomar entre 3 y 8 minutos. El tiempo de parada obligada para el descanso de los conductores puede ser aprovechado para realizar la operación de recarga sin aumentar el tiempo de ciclo de la ruta. Este proceso no aumenta el tiempo de viaje para el usuario, ya que ninguno está a bordo.
 - b. **Recarga en parada intermedia.** Se realiza con pasaje en el interior. La recarga conlleva un incremento del tiempo de ciclo respecto a los ICE; pero se puede compensar dado que los BEB tienen mayor aceleración, lo que significa menos tiempo invertido en alcanzar la velocidad punta. Pueden existir varios puntos de recarga a lo largo de la ruta y cada operación de recarga puede llevar entre 10 y 30 segundos, más otros 10-30 segundos de maniobras para cargar. Por esto, el número de puntos de recarga debe limitarse para que el tiempo de ruta no se incremente demasiado. Este proceso aumenta el tiempo de viaje para el usuario y, al tener personas en el interior, puede generar dudas sobre la seguridad del pasaje a la opinión pública.

2.3.Comparativa Diésel-Eléctrico. Proyecto ZeEUS.

Hasta este momento se han presentado las condiciones técnicas en las que se fundamenta el autobús eléctrico. Para el análisis que se hará en posteriores apartados es necesario saber las diferencias con los autobuses ICE.

Esta comparativa es objeto de estudio de un gran número de grupos de investigación en China, Estados Unidos, Europa... En este trabajo se hará referencia la investigación realizada en el proyecto **ZeEUS** (*Zero Emissions Urban Bus System*), cofinanciado por la Comisión Europea bajo el *7th Research & Innovation Framework Programme, Mobility & Transport Directorate General*.

En el diseño de la red de autobuses propuesto en (Estrada, 2017) se valoran los costes para el usuarios y los costes para la agencia.

El coste del usuario, proporcional al tiempo total de viaje, tiene dos componentes principales: un tiempo total de espera **W** y una penalización por caminar que depende del número total de transferencia **eT**, una distancia fija por transferencia **δ** y una velocidad caminando **w**.

El coste de la agencia tiene cuatro componentes: la longitud de la red **L**, los costes de operación, simplificados en el parámetro **V** (veh-km/h), el número de vehículos **M** y el coste asociado a la infraestructura eléctrica en la calle **Nc**.

El último de estos costes se incorpora cuando la red que se estudia está diseñada con autobuses eléctricos. Los valores que toma y las restricciones que se le pueden aplicar se explicarán cuando se hable de la operativa de operaciones de autobuses eléctricos, pero a grandes rasgos se tiene en cuenta si la operación de recarga se produce *off-street*, de acuerdo a lo descrito en el apartado anterior, y cuantifica el número de estaciones de recarga en todos los corredores de la red.

Además del coste en tiempo, la obligación de recargar implica una de las desventajas frente al ICE: se pierde flexibilidad en la asignación de recursos.

Otras de las diferencias entre los modelos ICE y BEB se encuentran en sus características técnicas:

- El coste unitario por vehículo-kilómetro mide el coste variable de servicio, principalmente el combustible o la electricidad consumida. Este coste es inferior en los vehículos eléctricos, ya que el coste de la electricidad es inferior y el índice de consumo de energía por kilómetro es inferior.
- El coste unitario por vehículo-hora considera los costes fijos de servicio, que incluyen la amortización de los vehículos y los salarios. En el caso de los BEB, este valor es superior al de los vehículos ICE por el elevado coste de las baterías.
- Para finalizar, existe una diferencia entre ambos vehículos en las fases de aceleración y desaceleración. El tiempo empleado en estas acciones está estrechamente relacionado con el valor del par motor del vehículo. Los vehículos eléctricos presentan valores del par más altos, por lo que pueden acelerar más rápido que autobuses diésel de las mismas características. Esta ventaja del autobús eléctrico se puede observar en la Figura 11.

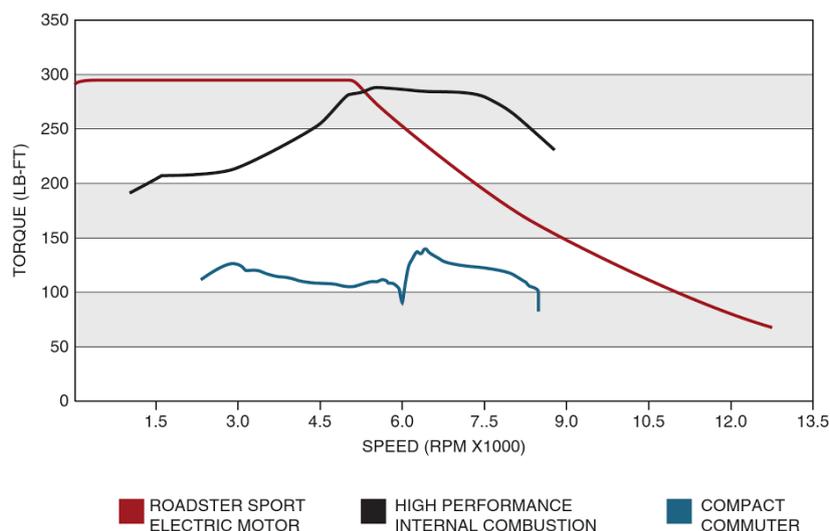


Figura 11 Comparativa del par motor entre un motor de combustión y un vehículo eléctrico.
Fuente: (Denton, 2016)

2.4. Conceptos teóricos asociados a las baterías

En los últimos apartados se ha aludido a una serie de características de las baterías. Aquí se explican algunas de ellas para facilitar el seguimiento del presente documento y para identificar la importancia que tienen de cara a una comercialización viable de vehículos eléctricos.

Celda, Módulo y Pack. Una celda individual es por sí una batería completa; es decir, contiene dos conductores de corriente y una cámara separa los electrodos a la vez que alberga el electrolito. Un módulo está compuesto por unas pocas celdas, ya sea por fijación física o por soldadura entre las celdas. Un pack de baterías se compone de módulos albergados en un único contenedor para la gestión térmica. Los EV (*Electric vehicle(s)*) pueden tener más de un pack de baterías y estar situados en diferentes lugares del coche.

Capacidad Amperio-hora. La capacidad amperio hora (Ah) es la carga total que puede ser descargada de una batería totalmente cargada bajo unas condiciones específicas. La capacidad Ah nominal indica la capacidad una nueva batería completamente cargada bajo unas condiciones establecidas por el fabricante.

Capacidad Wh. Medición utilizada en lugar de la capacidad amperio-hora para representar la capacidad de las baterías.

$$\text{Capacidad Wh nominal} = \text{Capacidad Ah nominal} \cdot \text{Voltage nominal} \quad (2.1)$$

Ratio-C. El valor nominal C se utiliza para representar un ratio de carga o descarga igual a la capacidad de la batería en una hora. Por ejemplo, para una batería de 1.4 Ah, C es igual a cargar o descargar la batería 1.4 A. Por tanto, para 0.1C se cargarían 0.14 A, y para 2C se cargarían 2.8 A.

Densidad de energía (gravimétrica), también llamada energía específica, se usa para definir cuánta energía puede almacenar una batería por unidad de masa. Se expresa en [Wh/kg]. Es el parámetro clave para determinar la máxima distancia que podrá recorrer un EV.

Poder específico. Es la potencia máxima por unidad de masa, expresada en [W/kg].

Resistencia interna. Es la resistencia equivalente global dentro de la batería. Es diferente para la carga y descarga y puede variar en función de las condiciones de carga.

Potencia máxima. Se puede definir como indica la ecuación 2.2, donde V_{OC} es la tensión de circuito abierto y R la resistencia interna de la batería.

$$P = \frac{2V_{OC}^2}{9R} \quad (2.2)$$

Tensión de corte. Es el mínimo voltaje permitido definido por el fabricante. Se puede interpretar como el estado “vacío” de la batería.

Ciclo de vida, número de ciclos. Es el número de ciclos de carga y descarga que una batería puede soportar, hasta un determinado nivel de descarga, antes de que el rendimiento se reduzca demasiado.

Estado de carga (SOC). El estado de carga se define como la capacidad restante de una batería y está afectado por las condiciones de funcionamiento tales como la corriente de carga y la temperatura.

$$SOC = \frac{\text{Capacidad Restante}}{\text{Capacidad Nominal}} \quad (2.3)$$

La variación de SOC puede expresarse como la pérdida desde la última parada en la que se realizó una recarga. Donde el SOC_x en la sección X es función de la distancia L_x recorrida desde el punto de recarga, de la carga en el último punto de recarga SOC_0 , del consumo medio por kilómetro f_c [KWh/km] y de la capacidad de la batería C_B .

$$SOC_x = SOC_0 - L_x \cdot \frac{f_c}{C_B} \quad (2.4)$$

El SOC es un importante indicador del estado de la batería, crucial para su gestión. Medir con precisión el SOC es bastante complicado, pero es la clave para el funcionamiento correcto y seguro de las baterías. La importancia de esta supervisión constante se debe a que el ciclo de vida de las baterías (el número de descargas y recargas) se maximiza cuando el SOC se mantiene entre ciertos valores recomendados por el fabricante. El rango utilizado normalmente es $0.4 < SOC < 0.8$.

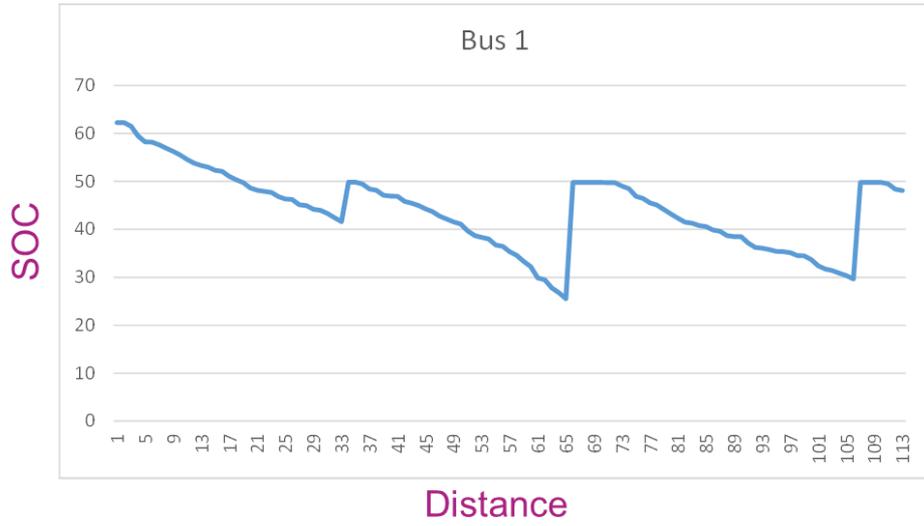


Figura 12 Diagrama de la evolución del SOC en función de la distancia.
Fuente: (Estrada, 2017)

3. Modelización de la operativa de autobuses eléctricos

El uso de autobuses eléctricos significa un gran avance tecnológico y aporta muchos beneficios frente a los tradicionales ICE; sin embargo, al planificar el servicio con los nuevos vehículos se tienen que considerar nuevos factores que modifican la operativa con la que se han diseñado las líneas actuales.

Uno de los puntos más importantes del proceso es la recarga de las baterías; el estudio se centrará en la operación *on-street*. Tal como se describió en el apartado 2.2.2, las instalaciones necesarias para realizar las operaciones de recarga pueden situarse en paradas intermedias o en paradas al final de la línea (las cabeceras). Independientemente del punto de la ruta donde se instalen, el tiempo de ciclo se ve directamente afectado; mientras que el tiempo en ruta de los usuarios puede, o no, verse incrementado en función de las decisiones de diseño que se tomen.

El objetivo de este apartado es construir una ecuación que determine el número de puntos de recarga eléctrica, partiendo desde una base teórica extensamente utilizada para calcular la capacidad de las paradas dada una demanda de pasajeros. Determinar esta cifra implicará obtener otros datos de interés que describan la operativa de las líneas que dan servicio con autobuses eléctricos.

Se calculará el tiempo invertido en realizar la recarga eléctrica; pudiendo identificar qué estrategia será mejor, recarga en una o ambas cabeceras.

Teniendo en cuenta la irregularidad en las llegadas de los autobuses, el modelo deberá ser capaz de introducir márgenes de seguridad para garantizar la recarga eléctrica en prácticamente todos los casos.

Finalmente, el modelo deberá permitir determinar la flota necesaria, junto al tiempo de coordinación añadido.

3.1.Hipótesis

Hasta el momento se ha presentado una amplia variedad de métodos de electrificación, del mercado de componentes eléctricos, de operaciones y puntos de recarga... Dado que resultaría imposible tener en cuenta todas las posibilidades, se asumirá una serie de hipótesis para limitar las variables a tener en cuenta.

1. El método de electrificación es mediante el uso de baterías recargables.
2. El modelo de autobús corresponde al *Solaris Urbino E 18*, con baterías ion-litio de una capacidad de 125kWh con opción de recarga mediante conexión *plug-in* y pantógrafo. (Solaris Bus & Coach, 2017)
3. La operación de recarga será *on-street* en la parada final de la línea, con una estación de carga modelo ULTRAFast de Endesa de carga rápida mediante pantógrafo. (Endesa, 2016)
4. La red de autobús será un sistema BRT, por lo que se garantiza el uso de carriles prioritarios para autobús en los que la circulación de vehículos privados queda prohibida.
5. Se analizarán paradas finales que den servicio a una única línea. El estudio quedará restringido a la eficiencia de las líneas y no a la red completa.
6. La localización de las paradas finales de línea corresponde a zonas con bajo volumen de circulación de vehículos y de personas.
7. Para no incrementar el coste para el usuario, el proceso de recarga tiene comienzo una vez todos los pasajeros han bajado del vehículo.
8. Se considera que en la última parada de cada sentido solo bajan pasajeros, sin que suba ninguno. Así mismo, en la primera parada de cada sentido solo suben pasajeros, sin que baje ninguno. La última parada y la primera del sentido contrario están asignadas a la misma zona, pero ocupan espacios físicos diferentes y sus operaciones no se afectan entre sí.
9. Se presuponen periodos estacionarios. El cambio de régimen de hora punta a hora valle no tiene influencia en el tiempo de ciclo de la ruta ni en el número de vehículos de la flota.
10. El operador de la línea no admite colas.

Teniendo en cuenta las hipótesis planteadas, y de acuerdo a las restricciones que conllevan, se desarrolla un modelo que parte desde la operativa tradicional y al cual se le añaden las variables eléctricas que afectan a la planificación del servicio.

3.2. Operativa tradicional en las paradas

Para estimar la capacidad de una parada, particularmente las cabeceras, se utiliza como referencia principal el *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (Transit Cooperative Research Program, 2003) para la definición de las variables utilizadas para su cálculo.

3.2.1. Tiempo de parada (Dwell Time)

El **tiempo de parada** (t_d) es el tiempo medio que un autobús está estacionado en una parada para dar servicio a los movimientos de los pasajeros. En esta cifra se incluye el tiempo de apertura y cierre de puertas y el tiempo de subida y bajada de pasajeros, donde se tiene en cuenta la eficiencia del pago de billete.

Hay cinco factores que influyen de manera significativa el valor del t_d :

- **La demanda de pasajeros.** La puerta con mayor volumen de pasajeros será la limitante. También se tiene en cuenta la relación entre los pasajeros que suben y los que bajan, ya que las interferencias entre ambos flujos incrementará el tiempo.
- **La distancia entre paradas.** El espaciado entre paradas está directamente relacionado con su número y cuanto menos haya, mayor será la concentración de pasajeros en cada parada.
- **Procedimiento de pago de la tarifa.** Cualquier sistema que reduzca el tiempo de pago o permita pagar en paralelo a más usuarios mejorará la operación.
- **Tipo de vehículo.** El diseño del vehículo puede afectar a los movimientos de los pasajeros; se incluyen tanto la accesibilidad para personas con movilidad reducida como la facilidad para el acceso al vehículo. Algunos elementos a considerar son escaleras, rampas, plataformas...
- **Circulación interior del vehículo.** El tiempo para subir al vehículo se incrementa cuando ya hay gente de pie en el interior que dificulta el movimiento.

$$t_d = P_a t_a + P_b t_b + t_{o/c} \quad (3.1)$$

donde:

t_d =Tiempo de parada medio [s]

P_a =Número de pasajeros que bajan por la puerta con mayor uso [pax]

t_a =Tiempo de servicio por pasajero que baja [s/pax]

P_b =Número de pasajeros que suben por la puerta con mayor uso [pax]

t_b = Tiempo de servicio por pasajero que sube [s/pax]

$t_{o/c}$ = Tiempo de abrir y cerrar las puertas [s]

Los incrementos de tiempo debidos al acceso de sillas de ruedas y bicicletas pueden ser tratados como parte de la variación del tiempo de parada siempre que sean fenómenos puntuales. En caso de ser habituales, se deberían incluir como un cuarto sumando.

En estos cálculos se asume un tiempo medio de parada. La realidad es que en cada vehículo y parada de la línea variará el número de pasajeros que suben o bajan, dicho efecto se tendrá en cuenta de acuerdo a su probabilidad. El valor se suele medir con el **coeficiente de variación del tiempo de parada (c_v)**:

$$c_v = \frac{\sigma_{t_d}}{t_d} \quad (3.2)$$

donde:

c_v =Coeficiente de variación del tiempo de parada

σ_{t_d} =Desviación estándar de los tiempos de parada

t_d =Tiempo de parada medio

Cuando el coeficiente de variación tiende a cero, todos los tiempos de parada son iguales. Cuando tiene a 1, la desviación estándar es tan grande como la media de los tiempos de parada; es decir, que un tercio de los autobuses tardará el doble que la media.

Asociado a este concepto se introduce la **tasa de fracaso**, que representa la frecuencia con la que un autobús llega a la parada y se encuentra las zonas de carga ocupadas. Si se fija una tasa determinada, se puede definir un **tiempo de margen de operación (t_{om})** que se añade a los otros tiempos para asegurar que no se supere el umbral de fiabilidad acordado.

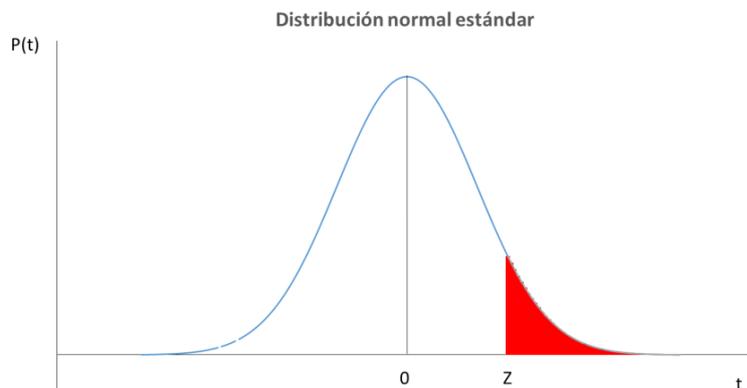


Figura 13 Distribución normal estándar. En rojo, la probabilidad de que el tiempo de parada supere una determinada cifra para una determinada tasa de fracaso

Fuente: *Elaboración propia*

$$t_{om} = Z\sigma_{t_d} = Zc_v t_d \quad (3.3)$$

donde:

t_{om} =Tiempo de margen de operación

Z =Desviación normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso deseada

σ_{t_d} =Desviación estándar de los tiempos de parada

c_v =Coeficiente de variación del tiempo de parada

t_d =Tiempo de parada medio

3.2.2. Tiempo de despeje (Clearance Time)

El **tiempo de despeje** (t_c) representa el período en el que la zona de carga no está disponible a causa del tiempo destinado a la aceleración para salir de la parada y al frenado para el acceso del siguiente bus. También se tienen en cuenta los retrasos causados por el volumen de tráfico en el carril de circulación y la dificultad para reincorporarse a estos.

Parte del tiempo de despeje es fijo; corresponde al tiempo necesario para que un autobús recorra su propia distancia y deje la zona de carga vacía.

Cuando un autobús debe incorporarse a un carril mixto, existe otra componente variable que mide el tiempo estimado hasta que se pueda acceder a dicho carril. Este tiempo depende del flujo de vehículos en el carril de circulación, así como de las leyes de prioridad de paso y circulación para los autobuses.

En el Anejo 1 se presenta de forma esquematizada el cálculo del tiempo de despeje para diversos diseños de parada; donde se tiene en cuenta la parte fija y la parte variable. A falta de datos del volumen de tráfico, se puede decir que el valor del tiempo de despeje se suele aproximar a 10 segundos para la componente fija y unos 7 segundos para la componente variable.

3.2.3. Sincronización de señales de tráfico

Ampliando el análisis más allá de la propia parada de autobús, existen unas condiciones de contorno que afectan a la operativa y, por tanto, a la capacidad que ofrecen las zonas de carga. Entre todas ellas, es importante destacar el efecto que tienen los semáforos en las maniobras de los vehículos en la entrada y salida de las paradas.

En las paradas lejanas (*far-side*) o a media distancia (*mid-block*) del semáforo del siguiente cruce, el acceso se ve restringido a cuando hay luz verde en el cruce aguas arriba. En las paradas cercanas (*near-side*) al semáforo, la salida tan solo se puede hacer cuando hay luz verde. Para introducir este efecto en los cálculos se define el **ratio g/C**, que indica la proporción de tiempo en verde sobre el total del ciclo del semáforo.

Cuando no existe ningún semáforo en los alrededores de la parada, se considera que el ratio g/C toma valor 1.

El resultado es que a mayor tiempo en verde, mayor será la capacidad de las paradas cercanas.

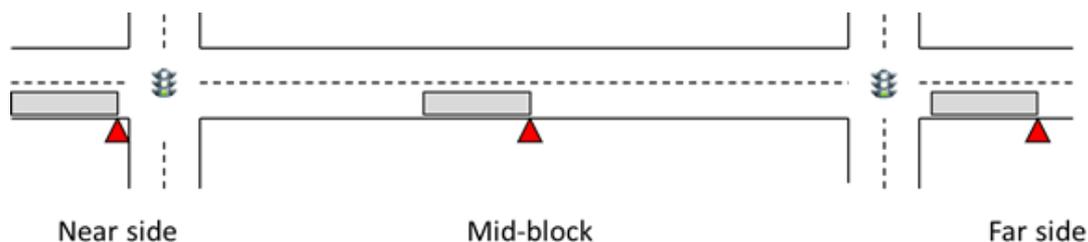


Figura 14 Posición de las paradas de autobús respecto a los semáforos.

Fuente: *Transit Capacity & Quality of Service Manual, 3rd Edition.*

3.2.4. Capacidad de las paradas

Las variables presentadas hasta este momento son suficientes para medir la capacidad de una parada de autobús (B_g) intermedia. Para calcular el tiempo requerido en realizar todo el proceso, se ordenan todas las acciones a realizar en una cadena lógica que consistiría en: una primera fase de frenado, un tiempo de parada para descargar y cargar nuevos pasajeros (teniendo en cuenta un tiempo margen de operación) y una última fase de aceleración y retorno a la circulación.

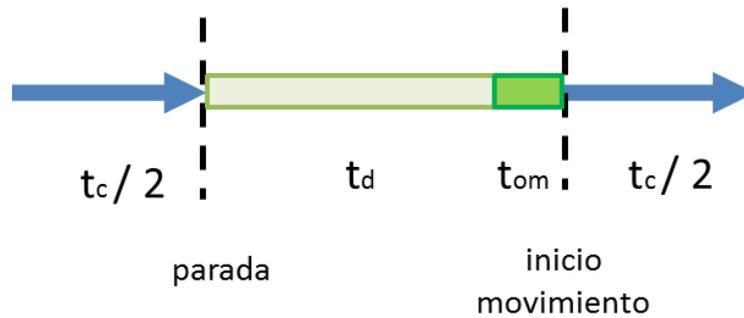


Figura 15 Diagrama del tiempo de operación para una parada intermedia.

Fuente: *Elaboración propia*

La suma de todos estos procesos indica el tiempo total que un autobús está utilizando la zona de carga y se denomina **Tiempo de operación (T_{op})**.

$$T_{op} = t_d + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)} \quad (3.4)$$

donde:

T_{op} =Tiempo de operación [s]

t_d =Tiempo de parada medio [s]

t_c =Tiempo de despeje [s]

t_{om} =Tiempo de margen de operación [s]

g/C =ratio de tiempo en verde [-]

Esta operación se realiza para una zona de carga, pero en una parada de autobús puede existir más de una. Además de la cantidad de zonas, existen diferentes diseños de paradas que las permiten funcionar con diferentes niveles de interacción hasta alcanzar un comportamiento totalmente independiente. El factor que mide el rendimiento de tener más de una zona de carga es el **Número efectivo de zonas de carga (N_{el})** y se tiene que multiplicar a la capacidad de una zona de carga para obtener la capacidad de la parada. En el punto 3.4.3 se desarrollará en detalle este factor y lo que supone para el dimensionamiento de puntos de recarga.

Incorporando este concepto al tiempo de operación, la capacidad de la parada sería:

$$B_s = N_{el} B_l = N_{el} \frac{3600 (\mathcal{G}/C)}{t_c + t_d (\mathcal{G}/C) + t_{om}} = N_{el} \frac{3600 (\mathcal{G}/C)}{t_c + t_d (\mathcal{G}/C) + Z c_v t_d} \quad (3.5)$$

donde:

B_s =Capacidad de la parada de bus [bus/h]

B_l =Capacidad de una zona de carga individual [bus/h]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

\mathcal{G}/C =ratio de tiempo en verde [-]

t_c = Tiempo de despeje [s]

t_d = Tiempo de parada medio [s]

t_{om} = Tiempo de margen de operación [s]

Z =Variable normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso escogida [-]

c_v =Coeficiente de variación del tiempo de parada [-]

Este cálculo representa la capacidad de una parada cualquiera del recorrido, pero no será suficiente para el caso que se plantea; cuando se trata de una cabecera, la operación varía ligeramente al incorporar nuevas variables. De acuerdo a la octava hipótesis, en la parada final no se permitirá el acceso de pasajeros. Lo esperado es que el tiempo de parada disminuya en comparación con otras zonas de carga del recorrido por realizarse exclusivamente bajada de pasajeros. Sin embargo, al final de la ruta se debe añadir un **tiempo de descanso de los conductores (θ)**; este tiempo es fijo y está sujeto a las condiciones laborales pactadas, pero se puede aproximar a 1 minuto por cada 3 kilómetros conducidos.

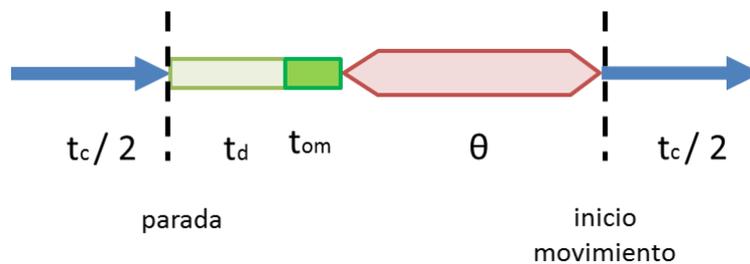


Figura 16 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera.

Fuente: *Elaboración propia*

En este caso, al introducir un nuevo proceso, el tiempo de operación sería:

$$T_{op} = t_d + \theta + \frac{t_c + t_{om}}{(\mathcal{G}/C)} \quad (3.6)$$

donde:

T_{op} = Tiempo de operación [s]

t_d =Tiempo de parada medio [s]

t_c =Tiempo de despeje [s]

t_{om} =Tiempo de margen de operación [s]

\mathcal{G}/C =ratio de tiempo en verde [-]

θ =Tiempo de descanso de los conductores [s]

Uno de los detalles que se pueden observar es que el ciclo semafórico no afecta a los tiempos en los que el autobús está totalmente parado. Este principio se asumirá en el caso eléctrico para operaciones similares.

Aplicando estos cambios a la ecuación 3.5, se obtiene una nueva expresión para el cálculo de la capacidad de las cabeceras:

$$B_s = N_{el} \frac{3600 (g/C)}{t_c + t_d (g/C) + Z c_v t_d + \theta (g/C)} \quad (3.7)$$

donde:

B_s =Capacidad de la parada de bus [bus/h]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

g/C =ratio de tiempo en verde [-]

t_c = Tiempo de despeje [s]

t_d = Tiempo de parada medio [s]

Z =Variable normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso escogida [-]

c_v =Coeficiente de variación del tiempo de parada [-]

θ =Tiempo de descanso de los conductores [s]

Con esta ecuación se completa el estudio de la capacidad de una cabecera en condiciones de explotación tradicional. Al construir este planteamiento se ha mantenido la máxima generalidad posible. Ejemplo de esto es que en ningún momento se ha utilizado la quinta hipótesis que limita el uso de la parada a una única línea: la capacidad de autobuses/h es una cifra que puede agrupar a múltiples líneas que converjan en el mismo destino.

El procedimiento que se ha planteado hasta el momento sirve principalmente para el análisis de redes de transporte ya establecidas, cuya trazado esté definido. Para aplicarlo se necesita conocer su diseño y el uso de la red. Por una parte es necesario recoger datos de la demanda para estimar los tiempos medios de parada; así como disponer de mediciones del movimiento de los autobuses para estimar el tiempo de despeje. Por otra parte debe incluirse información sobre las zonas de carga y aspectos legales en cuanto al tiempo de descanso de los conductores.

Al disponer de los datos suficientes, el operador puede caracterizar todas las paradas de una red de autobuses ICE fácilmente.

3.2.5. Factores de ajuste de la capacidad

El estudio básico de la capacidad de las paradas se centra en el tiempo de operación de los autobuses y puede ser utilizado para calcular la capacidad de las líneas. En un principio, la capacidad de una línea es el mínimo de entre todas las capacidades de parada del recorrido; pero en la realidad existen otros factores que pueden disminuir dicho valor. Normalmente, el origen de estos efectos se debe a la presencia de vehículos privados en el carril propio o adyacente y a la circulación de peatones en las calles transversales.

Estos factores no tienen mucha relevancia en el presente estudio, ya que uno de los objetivos es presentar una metodología para estimar la frecuencia máxima de autobuses que pueden circular con un determinado tiempo de ciclo dadas unas condiciones de recarga eléctrica que alteran la capacidad de las paradas. Los factores se aplican después de dicho cálculo, por lo que no tienen la misma significancia. Para no añadir más complejidad al problema, la frecuencia ($1/H$) se asume como un dato conocido; tal como se explica en el apartado 3.4.3. Por tanto, el dimensionamiento de la flota que se realice en capítulos posteriores será independiente del efecto de los factores de ajuste.

Se considera que las paradas finales de línea están, o deben estar, situadas en calles secundarias con poco volumen de circulación tanto de vehículos como de peatones; motivo que justifica el poco efecto que tienen en la metodología presentada. Por tanto, no se utilizarán factores de ajuste para el cálculo de la capacidad.

Dicho esto, se presentan los principales factores de ajuste que se tendrían que tener en cuenta en situaciones que no cumplan las hipótesis planteadas.

El primero es un **factor de ajuste de giros a la derecha (f_r)**, que se tendría que utilizar en aquellas paradas localizadas en una calle cuya siguiente intersección permita el giro a la derecha. Se asume que no hay tráfico mixto, es decir que el carril de giro coincide con un carril de uso exclusivo de autobús.

La capacidad de la línea de autobús se ve afectada en la medida que los vehículos privados deben incorporarse al carril donde circulan los autobuses para girar a la derecha y pueden provocar que queden parados. Además, esta interferencia se ve magnificada en aquellos casos con un gran flujo de personas que cruzan el paso de peatones de la calle del giro; retrasando el paso de los vehículos.

Las paradas que se ven más afectadas son aquellas que están cerca de la intersección (*near-side stop*), ya que existe la posibilidad de que la cola llegue hasta la zona de carga y no permita realizar al autobús la parada sin interferencias.

Los efectos sobre la capacidad se miden con el factor de ajuste, que tiene la siguiente expresión:

$$f_r = 1 - f_l \frac{v_r}{c_r} \quad (3.8)$$

donde:

f_r =factor de ajuste de giros a la derecha [-]

f_l =factor de localización de la parada [-] *El valor depende del tipo de vía y de la posición de la parada (near-side/mid-block/far-side) (Transit Cooperative Research Program, 2003)*

v_r =Volumen de giros a la derecha en la intersección siguiente [veh/h]

c_r =Capacidad del giro a la derecha en la intersección siguiente [veh/h]

Para recalcular la capacidad de la línea el factor se debe aplicar directamente a la capacidad de la parada, por el cálculo resultaría ser:

$$B = B_s f_m = N_{el} B_l f_r \quad (3.9)$$

donde:

B =Capacidad de la línea [bus/h]

B_s =Capacidad de la parada de bus [bus/h]

B_l =Capacidad de una zona de carga individual [bus/h]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

f_r =factor de ajuste de giros a la derecha [-]

El segundo es un **factor de ajuste de tráfico mixto** (f_m), que se tendría que utilizar en el caso en el que la circulación de los autobuses se realice en una calle con un único carril de circulación por sentido o en aquellas con dos carriles por sentido donde el carril derecho no sea de uso exclusivo de autobús.

El volumen de tráfico mixto afecta a la capacidad de la línea de autobús por dos motivos. Primero, en las paradas *off-line* se incrementa el retraso para reincorporarse a la circulación y debe contarse como un incremento del tiempo de despeje t_c . Segundo, la presencia de vehículos privados en el carril causa interferencias con las operaciones del autobús, sobre todo en las intersecciones, dificultando que el bus llegue a su parada o quede completamente parado detrás de una fila de coches. Este segundo valor es el que se contabiliza como el factor de ajuste:

$$f_m = 1 - f_l \frac{v}{c} \quad (3.10)$$

donde:

f_m =factor de ajuste de tráfico mixto [-]

f_l =factor de localización de la parada [-] *El valor depende del tipo de vía y de la posición de la parada (near-side/mid-block/far-side) (Transit Cooperative Research Program, 2003)*

v =Volumen de tráfico del carril derecho en la intersección siguiente [veh/h]

c =Capacidad del carril derecho en la intersección siguiente [veh/h]

La ecuación 3.11 es en esencia la misma que la utilizada para el factor de ajuste de giros a la derecha, pero al contar todo el tráfico suele ser más restrictivo. Para recalcular la capacidad de la línea se tendría que aplicar directamente a la capacidad de la parada, quedando:

$$B = B_s f_m = N_{el} B_l f_m \quad (3.11)$$

donde:

B =Capacidad de la línea [bus/h]

B_s =Capacidad de la parada de bus [bus/h]

B_l =Capacidad de una zona de carga individual [bus/h]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

f_m =factor de ajuste de tráfico mixto [-]

3.3. Incorporación de nuevas variables eléctricas.

Una vez conocido el proceso para determinar la capacidad de las paradas que dan servicio a una línea tradicional de autobuses ICE, se puede utilizar el mismo procedimiento para calcular la capacidad de las paradas con puntos de recarga eléctrica. Para ello, se deben introducir las variables que modifiquen el tiempo de operación debido a las operaciones de recarga.

De acuerdo al marco teórico expuesto en el apartado 2, el estado de carga (SOC) será el valor más importante a monitorizar, ya que en la operación de recarga se tiene que recuperar la energía consumida a lo largo del recorrido. Existen muchas variables que afectan al consumo de energía, pero a efectos prácticos será necesario medir el consumo total.

Para integrar la recuperación del SOC en el tiempo de operación se define el **Tiempo de recarga (T)** como el tiempo necesario para realizar toda la operación de conexión, alimentación y desconexión del terminal.

$$T = T_e + T_m \quad (3.12)$$

donde:

T =Tiempo de recarga [s]

T_e = Tiempo de alimentación [s]

T_m = Tiempo de maniobra para conectarse y desconectarse de la alimentación [s]

El tiempo de maniobra dependerá del tipo de conexión con la que se haya diseñado el vehículo, por lo que la estimación de este tiempo debería ser facilitada por el fabricante del autobús. Para el tándem de vehículo y cargador definidos en la segunda y tercera hipótesis, el valor de este tiempo se puede asumir como 45 segundos; la conexión se realizará mediante un pantógrafo instalado en la parte superior del autobús. (Estrada, 2017)

Por otra parte, el tiempo de alimentación dependerá del consumo que se haya realizado en esa ruta y de la velocidad de recarga. Esta información la debe aportar el operador de la red, ya que dispondrá de los datos reales de consumo para diferentes situaciones y del estado del SOC después de cada recarga. Para facilitar la estimación de este tiempo se propone una metodología de cálculo que establece una relación directa con la longitud de la ruta.

$$T_e = 60 \frac{L f_c}{f_{ca}} \quad (3.13)$$

donde:

T_e = Tiempo de alimentación [s]

L = Longitud de la ruta entre dos puntos de recarga consecutivos [Km]

f_c = Factor de consumo [Kwh/Km]

f_{ca} = Factor de carga [Kwh/min]

Una vez se ha definido el tiempo necesario para realizar la recarga, conviene enmarcarla correctamente en la operación de la parada. De acuerdo a la séptima hipótesis, el tiempo de recarga puede comenzar tan pronto como no haya pasajeros en el vehículo: puede realizarse inmediatamente después del tiempo de parada. Al realizarse en la última parada, puede recuperarse el diseño base que se había elaborado para la operativa tradicional en cabeceras.

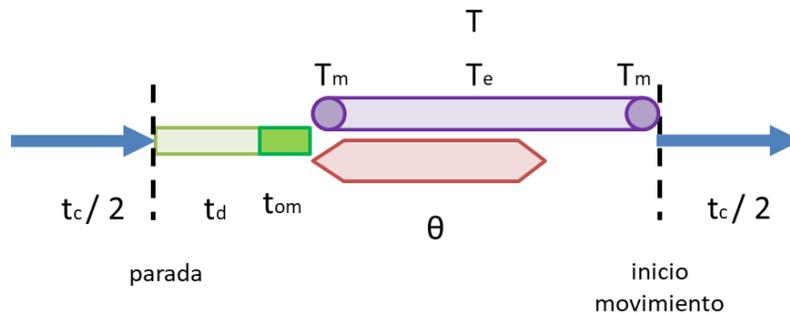


Figura 17 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera con recarga eléctrica.
Fuente: Elaboración propia

Una vez mostrado el proceso que se lleva a cabo, el tiempo de operación para este caso se obtiene con la siguiente definición:

$$T_{op} = t_d + \max\{T; \theta\} + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)} \quad (3.14)$$

donde:

T_{op} = Tiempo de operación [s]

t_d =Tiempo de parada medio [s]

t_c =Tiempo de despeje [s]

t_{om} =Tiempo de margen de operación [s]

g/C =ratio de tiempo en verde [-]

θ =Tiempo de descanso de los conductores [s]

T =Tiempo de recarga [s]

El mayor cambio que se puede observar respecto a la operativa tradicional es que ya no existe una única cadena lineal de sucesos; en el momento en el que comienza el proceso de recarga también comienza el periodo de descanso del conductor.

Si $\theta > T$, la recarga se realiza durante el tiempo de descanso del conductor y el proceso sería idéntico a la operación tradicional. Esto implica el que tiempo de ciclo de la ruta también se mantendría, independientemente del tipo de motor.

En cambio, si $\theta < T$, la recarga supera el tiempo de descanso y se alargaría el tiempo de operación y, consecuentemente, el tiempo de ciclo de la ruta.

Independiente de la situación que se dé, el cálculo de la capacidad de la parada de cabecera se realiza de manera similar a los casos anteriores:

$$B_s = \frac{N_{el}}{T_{op}} = N_{el} \frac{3600 (g/C)}{t_c + t_d (g/C) + Z c_v t_d + \max\{T; \theta\} (g/C)} \quad (3.15)$$

donde:

B_s =Capacidad de la parada de bus [bus/h]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

T_{op} = Tiempo de operación [h]

g/C =ratio de tiempo en verde [-]

t_c = Tiempo de despeje [s]

t_d = Tiempo de parada medio [s]

Z =Variable normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso escogida [-]

c_v =Coeficiente de variación del tiempo de parada [-]

θ =Tiempo de descanso de los conductores [s]

T =Tiempo de recarga [s]

De esta manera, se puede calcular la capacidad de las paradas con servicio de recarga eléctrica. Sin embargo, para dimensionar el número de puntos de recarga es necesario hacer otras consideraciones relacionadas con la operativa de las líneas y el diseño de las paradas. Por esto mismo, en el siguiente punto se abordan dichas cuestiones aprovechando el conocimiento generado hasta este momento.

3.4. Operativa de las líneas

Para realizar la planificación de la operativa de recarga no es suficiente con identificar y estimar el tiempo destinado a completar las operaciones de la parada del autobús y recarga de las baterías. La capacidad de las paradas calculada en la ecuación 3.15 se ha realizado teniendo en cuenta el tiempo que tarda un vehículo en realizar dicho proceso. Sin embargo, en el diseño de la línea y el dimensionamiento de los recursos, se tienen que tener en cuenta otros factores:

1. **Las fluctuaciones de las llegadas.** Al definir los tiempos de operación, todos los autobuses tendrán fijado un tiempo de llegada a la cabecera; pero habrá diferentes causas que harán que no se cumplan a la perfección dichos horarios.
2. **La coordinación de la flota.** De los cálculos se extraerá un número de vehículos teórico, pero al utilizar unidades enteras se tendrá que añadir un tiempo de coordinación para que los horarios queden compensados.
3. **La eficiencia de los procesos.** La organización de los autobuses en la entrada, la asignación y la salida de las zonas de carga será una decisión de diseño que afectará a la eficiencia de las paradas y el número total de zonas de carga necesarias para realizar la operación.

Una vez se tengan en cuenta estos factores, se podrá dimensionar correctamente la flota necesaria y el número de puntos de recarga en cabecera.

3.4.1. Margen operativo para los intervalos de diseño

El primero de los factores a incluir en el dimensionamiento son las fluctuaciones en las llegadas de los autobuses a la parada; esta consideración hará más realista la modelización de la operativa. En una situación estacionaria donde los autobuses funcionan con un intervalo determinado, cada uno de los vehículos tiene fijado un tiempo de llegada a la cabecera; sin embargo, existen condiciones externas (interacción con el flujo de vehículos privados, infracciones de los códigos de circulación, etc) que hacen que no se ajusten perfectamente a su hora.

Estas variaciones solo se podrán medir si se tienen el tiempo teórico de llegada y el tiempo real, obteniendo la diferencia entre dichos valores; por ello, la entidad que tiene capacidad para aportar esta información es el operador de la línea con un histórico de datos.

Para el cálculo se recurre a una definición similar a la utilizada en la estimación del tiempo de margen de operación (t_{om}). En aras de mantener una nomenclatura similar, la fluctuación de tiempo de llegadas se llamará **Intervalo de margen de operación (h_{om})** y tiene la siguiente expresión:

$$h_{om} = Z\sigma_{\bar{h}} + \bar{h} = Zc_v\bar{h} + \bar{h} \quad (3.16)$$

donde:

h_{om} =Intervalo de margen de operación [s]

Z =Desviación normal estándar correspondiente a la tasa de fracaso deseada [-]

\bar{h} =Promedio de la diferencia entre la llegada teórica y la real [s]

$\sigma_{\bar{h}}$ =Desviación estándar de la diferencia entre la llegada teórica y la real [s]

c_v =Coeficiente de variación [-]

En el cálculo del t_{om} se medía la variación de un valor promedio conocido; por lo tanto, el resultado tan solo mostraba el incremento de tiempo de otra variable del sistema. En este caso, el h_{om} indica la fiabilidad del sistema con la medición de variaciones en las llegadas; es independiente del resto de variables del sistema.

Dado que siempre existirán estas alteraciones en la regularidad, este es un nuevo parámetro a introducir en el cálculo del tiempo de operación (T_{op}). Se debe tener en cuenta antes del dimensionamiento de la flota, ya que afectará al número de vehículos, y la tasa de fracaso será un factor muy importante en los resultados y sus costes asociados, teniendo mayor importancia en la toma de decisiones.

3.4.2. Dimensionamiento de la flota y coordinación de los vehículos

El segundo de los factores a tener en cuenta en la operativa de la línea es el número de vehículos que darán servicio. Además de ser un resultado de interés para la agencia, el número de autobuses que circularán también condiciona el tiempo de operación a utilizar en el dimensionamiento del número de puntos de recarga.

De forma simplificada, el **Número de autobuses de la flota (M)** a utilizar será el necesario para cumplir el **Tiempo de Ciclo (C_t)** de la línea dado un intervalo. Dicho tiempo de ciclo se descompondrá según el interés del presente estudio. Habrá una componente que mida el tiempo de operación, correspondiente al invertido en la parada de cabecera, y otra que mida el tiempo de recorrido.

$$M = \left[\frac{C_t}{H} \right]^+ = \left[\frac{T_R + T_{op}}{H} \right]^+ = \left[\frac{3600 \cdot \frac{L_R}{v_c} + T_{op}}{H} \right]^+ \quad (3.17)$$

donde:

M =Número de autobuses de la flota [buses]

C_t =Tiempo de ciclo de la línea [s]

H =Intervalo de paso [s]

T_R =Tiempo de recorrido de los 2 sentidos [s]

T_{op} =Tiempo de operación [s]

L_R =Longitud de la ruta completa en los 2 sentidos [km]

v_c =Velocidad comercial [Km/h]

En esta ecuación se asume que el número de autobuses ha de ser el entero inmediatamente superior al resultado del cálculo. Esta afirmación, hecha por coherencia física, garantiza el mínimo del servicio necesario; sin embargo, al redondear los vehículos sin modificar el intervalo aumentará el tiempo de operación. Para ajustar el tiempo de operación a esta nueva situación se introduce una nueva variable: el **Tiempo de coordinación (t_{coord})**.

$$t_{coord} = T'_{op} - T_{op} \quad (3.18)$$

donde:

t_{coord} = Tiempo de coordinación [s]

T_{op} = Tiempo de operación calculado [s]

T'_{op} = Tiempo de operación para un M determinado [s]

Con la incorporación de los últimos dos apartados, el tiempo de operación que se tiene que considerar en la operativa de sistemas de recarga para autobuses eléctrico tendría la siguiente forma:

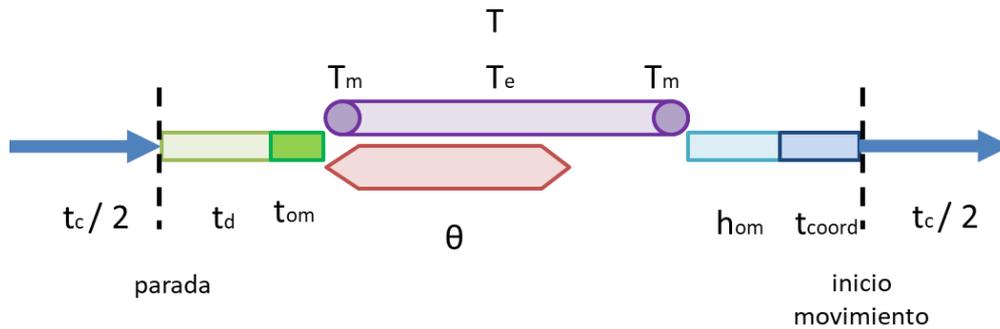


Figura 18 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera con recarga eléctrica respetando la operación de línea.

Fuente: *Elaboración propia*

$$T'_{op} = t_d + \max\{T; \theta\} + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)} + h_{om} + t_{coord} \quad (3.19)$$

donde:

T'_{op} = Tiempo de operación para un M determinado [s]

t_d = Tiempo de parada medio [s]

t_c = Tiempo de despeje [s]

t_{om} = Tiempo de margen de operación [s]

g/C = ratio de tiempo en verde [-]

θ = Tiempo de descanso de los conductores [s]

T = Tiempo de recarga [s]

h_{om} = Intervalo de margen de operación [s]

t_{coord} = Tiempo de coordinación [s]

3.4.3. Número de zonas de carga: eficiencia y dimensionamiento

Para analizar correctamente la operativa de los sistemas de recarga y su importancia en la toma de decisiones, conviene introducir algunas reflexiones sobre el número efectivo de zonas de carga.

Cuando se realiza la recarga eléctrica se requiere un punto físico de conexión. Asumiendo que las zonas de descarga de pasajeros en las cabeceras también tienen asignado un punto físico; el coste en uso de suelo urbano se ve incrementado si los procesos no comparten espacios.

Para una gestión eficiente del espacio público, la operación de descarga de pasajeros y de recarga de las baterías deberían realizarse en el mismo espacio físico; con el beneficio de no introducir nuevos movimientos de los autobuses. Esto supone una mayor complejidad en la planificación, pero facilita la comprensión del sistema para los usuarios y un menor número de acciones a realizar por el conductor. Al evitar este movimiento, se evita introducir otro tiempo en la ecuación con su respectivo coeficiente de variación; el tiempo de diseño será respetado con mayor facilidad.

Bajo esta premisa, en adelante los términos de zonas de carga y de recarga representarán el mismo espacio y la teoría que se aplica para el diseño de una, puede ser utilizada para el diseño de la otra. Esto permite hacer referencia a (Transit Cooperative Research Program, 2003) y la teoría expuesta sobre la eficiencia de tener múltiples zonas de carga en las paradas.

El primer paso para estudiar la eficiencia es la definición de los diseños de las paradas; existen cuatro categorías principales que los engloban: *Linear*, *Sawtooth*, *Drive-Through* y *Angle*. En la Figura 19 están representados sus esquemas.

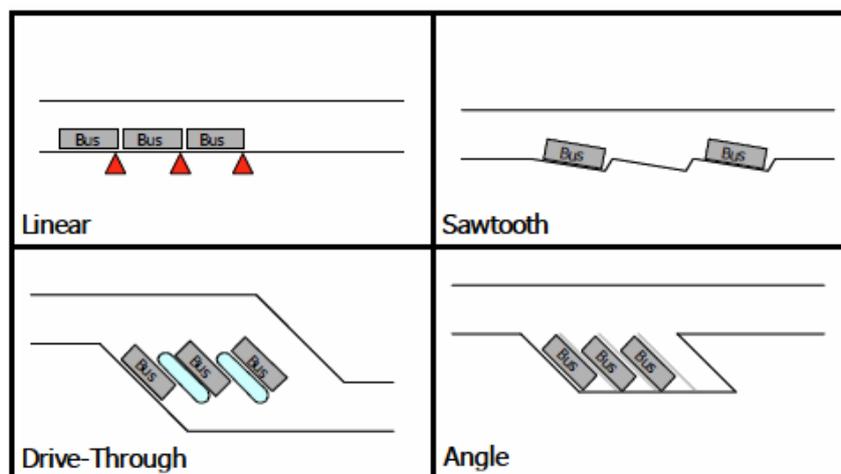


Figura 19 Categorías principales de diseños de las paradas.
Fuente: (Transit Cooperative Research Program, 2003)

Gracias a esta representación de los diseños se puede observar fácilmente que al añadir una nueva zona de carga se está consumiendo suelo urbano, espacio que variará según la categoría. Además, los movimientos de los autobuses también serán diferentes, lo que hará variar su tiempo de despeje. Los detalles de cada una de las categorías se expondrán posteriormente con el ánimo de facilitar la toma de decisiones entre ellos.

Una vez vistos los esquemas, es más fácil entender que las paradas de autobús no serán totalmente eficientes en la medida que el estacionamiento de ciertos vehículos interfiera con el movimiento de los otros. Existen tres motivos por los que una nueva zona de carga es menos eficiente que la anterior:

1. La última zona de carga será utilizada con menor frecuencia que la primera.
2. Al no saber en qué zona de carga parará el autobús, los pasajeros que quieran subir tendrán que caminar desde la señalización de la parada (usualmente en la primera zona de carga) hasta donde se posicione. Como resultado, para el mismo volumen de pasajeros, el tiempo de parada aumenta en las zonas de carga traseras.
3. Dependiendo de lo cerca que estén las zonas de carga y de la capacidad de adelantamiento de los autobuses, un autobús podría no dejar su zona de carga hasta que el siguiente lo hiciera.

Para el caso que ocupa el presente estudio, el tercer motivo es el que tiene mayor influencia; ya que tan solo se realiza descarga de pasajeros y no existe la posibilidad de un retraso en la subida de pasaje. Sin embargo, es importante destacar que estos motivos giran en torno a operaciones que ocurren dentro de la parada y representan una interacción entre el espacio físico asignado entre un autobús y otro.

Tal como se enunció al inicio del punto 3.2.4, el rendimiento de dichas zonas determinará el número total de puntos de recarga necesarios para una demanda determinada. Partiendo de la definición de la capacidad de una cabecera definida en la ecuación 3.15 e introduciendo el tiempo de operación que considera la operativa de la línea se obtiene que:

$$\frac{1}{B_s} = \frac{T'_{op}}{N_{el}} = \frac{t_d + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)}}{3600 * N_{el}} + \frac{\max\{T; \theta\} + h_{om} + t_{coord}}{3600 * N_{el}} \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{B_s} = \frac{t_d + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)}}{3600 * N \frac{1}{f_e}} + \frac{\max\{T; \theta\} + h_{om} + t_{coord}}{3600 * N} \quad (3.21)$$

$$B_s = N \frac{3600}{\underbrace{\left(t_d + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)} \right) f_e}_{\text{Tiempo de operaciones afectadas por el número de zonas de carga}} + \underbrace{\max\{T; \theta\} + h_{om} + t_{coord}}_{\text{Tiempo de operaciones fijo y debidos a la operativa de línea}}} \quad (3.22)$$

Se puede observar que el número efectivo de zonas de carga no será una variable de cálculo; con la transformación aplicada se utilizará directamente el número total. Con este cambio se garantiza que la reducción de la eficiencia tan solo se aplique a los valores que se ven afectados por el número de zonas de carga. Tanto el tiempo de recarga (T) como el tiempo de descanso de los conductores (θ) ocurren dentro de la parada, pero dependerán de la longitud

de la ruta, de las políticas... pero en ningún caso serán función del número de zonas de carga. Por otra parte, el intervalo de margen de operación (h_{om}) y el tiempo de coordinación (t_{coord}) se incluyen por cuestiones de la operativa de línea, y son totalmente independientes de las paradas.

Para aplicar la transformación se ha definido un **Factor reductor de la eficiencia** (f_e), cuyo valor puede obtenerse al relacionar el número de zonas de carga y su correspondiente número efectivo; estudio realizado por múltiples autores. Es importante destacar que el valor dependerá de N ; por ello se introduce cierto grado de iteración en el cálculo.

$$f_e = \frac{N}{N_{el}} \geq 1 \quad (3.23)$$

donde:

f_e =Factor reductor de la eficiencia [-]

N_{el} =Número efectivo de zonas de carga [-]

N =Número de zonas de carga [-]

Tras analizar el comportamiento y la importancia que tiene la eficiencia en el diseño de las paradas, queda cerrada toda la teoría necesaria para realizar el dimensionamiento de los puntos de recarga.

Se supondrán conocidas las variables del tiempo de operación T'_{op} . Éstas dependen del número de pasajeros, del tráfico por la vía donde se sitúa la parada, de las señales de tráfico, de la longitud de recorrido, del convenio profesional, de la fiabilidad de los horarios... datos a disposición de la agencia responsable de la explotación de la red de autobús.

Por otra parte, será necesario definir la capacidad que se desea obtener de la parada B_s , ya que el dimensionamiento se realizará para satisfacer una demanda de servicio o en respuesta a una determinada decisión política en relación con las frecuencias de llegada. De acuerdo a los apartados anteriores, se debe puntualizar que el cálculo la capacidad se había diseñado de tal manera que las cabeceras podían servir a múltiples líneas, lo que introduce una interacción entre diferentes intervalos de pasos de autobuses. Para simplificar el problema y centrarlo en el estudio de líneas independientes, se recurre a la quinta hipótesis planteada en el punto 3.1; donde se indica que las cabeceras estudiadas en este trabajo sirven a una única línea. En combinación con la décima hipótesis, donde se plantea que no pueden existir colas, se obliga a que las zonas de carga tengan capacidad suficiente para servir al flujo de autobuses que entran en la parada. Esto significa que, como máximo, un autobús debe salir en cuanto llegue el siguiente, sin necesidad de habilitar espacios adicionales para que esperen a entrar.

Con ello podemos definir la capacidad mínima como el flujo de autobuses de la línea a la que da servicio, por tanto:

$$B_s \geq \frac{1}{H} \quad (3.24)$$

donde:

B_s = Capacidad de la parada de bus [bus/h]

H = Intervalo de paso [h]

Finalmente, una vez fijada la capacidad a la que se debe dar servicio, el número de zonas de carga se puede calcular aislándolo tal como muestra la ecuación 3.25. Con ello quedaría cerrada la modelización de la operativa de autobuses eléctricos. A lo largo del desarrollo se ha indicado que el valor de algunas variables depende de algunas condiciones de contorno, básicamente de diseño.

$$N = \left[\frac{\left(t_d + \frac{t_c + t_{om}}{(g/C)} \right) f_e + \max\{T; \theta\} + h_{om} + t_{coord}}{H} \right]^+ \quad (3.25)$$

donde:

N =Número de zonas de carga [-]

g/C =ratio de tiempo en verde [-]

t_c = Tiempo de despeje [s]

t_d = Tiempo de parada medio [s]

t_{om} =Tiempo de margen de operación [s]

f_e =Factor reductor de la eficiencia [-]

θ =Tiempo de descanso de los conductores [s]

T =Tiempo de recarga [s]

h_{om} =Intervalo de margen de operación [s]

t_{coord} = Tiempo de coordinación [s]

H = Intervalo de paso [s]

Al obtener el número de zonas de carga, la parada queda dimensionada adecuadamente. Como conclusión conviene observar N es una variable discreta y esto implica que habrá un margen de tiempo en el que un cargador estará vacío: el **Tiempo de parada vacía** (t_{es}).

$$t_{es} = N \cdot H - T'_{op} \quad (3.26)$$

donde:

t_{es} = Tiempo de parada vacía [s]

N =Número de zonas de carga [-]

H = Intervalo de paso [s]

T'_{op} = Tiempo de operación para un M determinado [s]

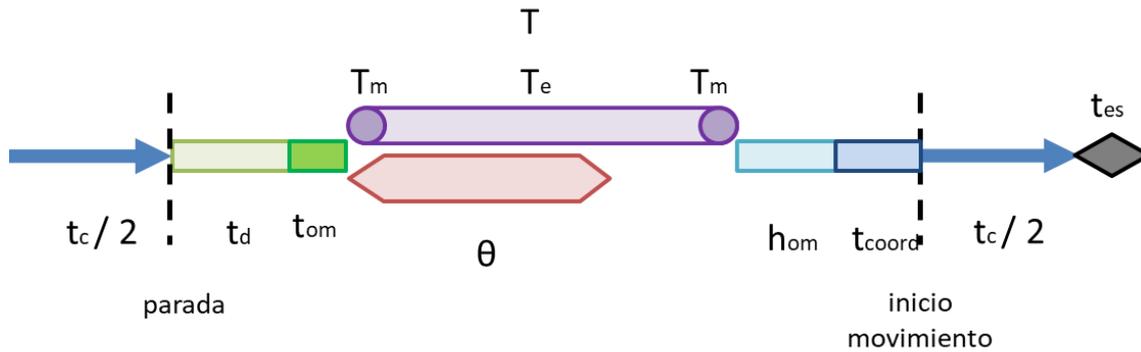


Figura 20 Diagrama de la distribución de tiempos de las operaciones en un intervalo NH.
Fuente: Elaboración propia

Esto representa el tiempo que falta para que otro vehículo tenga que ocupar la zona de carga para realizar sus operaciones.

Aun habiendo considerado unos márgenes por la irregularidad en las llegadas a las paradas, por el número de pasajeros que bajan y por el tiempo de coordinación de los vehículos de la línea... el t_{es} ofrece una última ventana de seguridad frente a incidencias imprevisibles.

Las primeras componentes se deben considerar porque son valores esperados y calculados en base a un *database* histórico de sucesos, por lo que se repetirán sistemáticamente. Este tiempo de parada vacía tan solo se debe a un ajuste numérico, por lo que permitirá absorber situaciones excepcionales sin perturbar la operativa de línea, lo que aumenta la seguridad de los operadores para mantener sus vehículos cargados entre unos márgenes tolerables.

3.5. Caracterización de las paradas de estudio

El objetivo principal de la modelización de la operativa de línea era determinar el número de puntos de recarga eléctrica para unas condiciones determinadas. Uno de los últimos factores analizados es la eficiencia de añadir un mayor número de zonas de carga.

En este punto se presentan algunos de los diseños de paradas más destacados según como se distribuyen sus zonas de carga. Se incluye una breve explicación de los movimientos de los autobuses y se muestran los valores de algunas de las variables de cálculo más destacadas: el tiempo de despeje y el factor reductor de la eficiencia.

Para contextualizar adecuadamente los diseños, se definen las dos categorías que tienen cada uno de ellos. La primera es sobre su situación en el tejido urbano y se relaciona directamente con la operativa de recarga eléctrica del punto 2.2.2:

- **Off-street.** Son aquellas paradas que están fuera de ruta, normalmente situadas en las afueras de la ciudad o en espacios con usos industriales, fuera del tejido urbano. Su uso sería mayoritariamente como cocheras o aparcamientos de largos recorridos. Su dimensionamiento no responde exclusivamente a una necesidad de capacidad, se incluyen necesidades de los conductores, de operaciones de mantenimiento, etc.

- **On-street.** Son aquellas paradas situadas en la ruta, integradas en el entramado urbano. El uso principal es servir como punto de acceso a la red de transporte y su dimensionamiento responde a necesidades de capacidad.

De acuerdo a la tercera hipótesis, todas las paradas estudiadas serán *on-street*.

La segunda categoría se relaciona con su situación respecto a los carriles con circulación de vehículos:

- **Off-line.** Son aquellas paradas que se sitúan fuera de los carriles de circulación y, por tanto, están menos afectadas por las perturbaciones del tráfico y no existe riesgo de que las zonas de carga estén ocupadas por vehículos externos. Sin embargo, se incrementa el tiempo de la reentrada a la circulación si en el carril de salida existe mucho tráfico.
- **On-line.** Son aquellas paradas que están en el carril de circulación del autobús. El riesgo de ocupación de las zonas de carga depende de la priorización del uso de la vía (carril bus) y del respeto que se tenga por dichas normas. El tiempo de reentrada a la circulación variará en función del número de zonas de carga, ya que existe interacción entre ellas.

Haciendo referencia a las cuatro categorías principales, normalmente se ha considerado que las *Sawtooth*, las *Drive-Through* y las *Angle* se utilizan para las paradas *off-street*. El motivo está claro, son más complejas y difíciles de encajar en el entramado urbano; obligan a cambiar el perfil de las calles y no todas pueden adaptarse a los cambios requeridos. Sin embargo, la geometría irregular de este grupo permite que la eficiencia de las zonas de carga sea máxima.

Precisamente las cabeceras son las paradas que tienen mayores posibilidades de trazarse con estos diseños. Pueden situarse en las afueras de la ciudad donde los perfiles urbanos son más diversos y, además, si los puntos de recarga se sitúan en áreas de intercambio modal se pueden agrupar para reducir costes de infraestructura. Todo ello lleva a considerar, en este trabajo, los tres diseños como posibles paradas *on-street*.

Por otra parte, las *Linear* son las usadas habitualmente para las paradas *on-street*. Se integran fácilmente en todo tipo de calles, ya que respetan los perfiles preestablecidos. Su contrapartida es la disminución de la eficiencia. El hecho de ocupar diferentes posiciones en el carril de circulación introduce importantes maniobras de adelantamiento, cosa que no pasa con los otros diseños.

Los diseños seleccionados se basan en estos principios y su estudio se desarrolla en el Anejo 1, presentándose en este punto unas breves observaciones.

3.5.1. Drive-Through (DT)

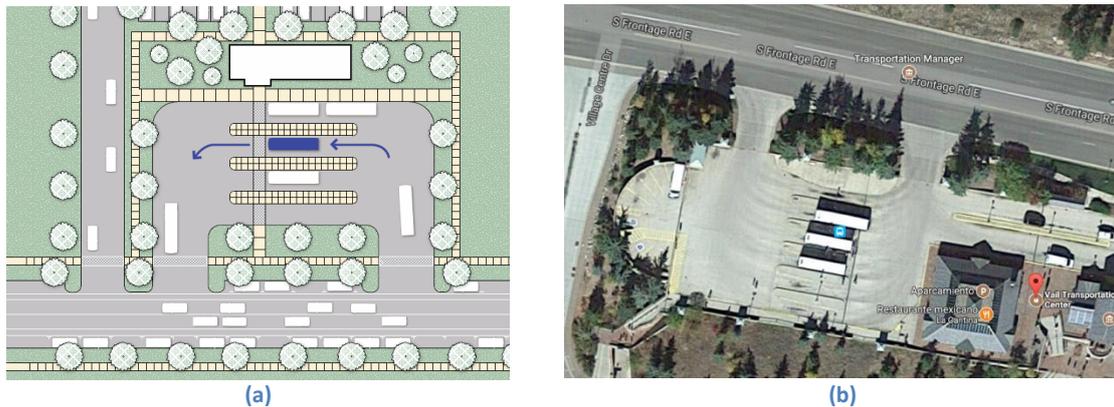


Figura 21 Planta de paradas *Drive-through off-line*.
(a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Vail (Colorado, EEUU)
Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) Google Maps

Las paradas clasificadas dentro de la categoría *Drive-Through*, en adelante DT, consumen mucha superficie, por lo que es difícil encontrar el espacio necesario para situarlas en el casco urbano. Por ello, los usos que puede tener se limitan sobre todo a paradas *off-street*.

Sin embargo, en la Figura 21b puede verse la construcción de una parada *on-street* y, como no puede ser de otra manera, *off-line*. Este tipo de paradas no se puede replicar directamente en una gran ciudad europea, ya que el ejemplo presentado se beneficia de la localización geográfica y del crecimiento urbano del municipio; pero algunos principios por los que se rigen se pueden utilizar para la red de bus urbano.

Las operaciones de los vehículos son totalmente independientes, por lo que el número de zonas de carga no afectará a su eficiencia. Además, el diseño de la parada hace que el número de maniobras sea escaso; dando como resultado que tan solo se requiera un doble giro en la entrada y un doble giro en la salida, sin ninguna marcha atrás.

Por ello, el DT cobra importancia cuando se tiene que dar servicio simultáneamente a una gran cantidad de vehículos en un intervalo pequeño. Las operaciones se realizan en paralelo, por lo que el retraso de una no afecta a las otras, y con los márgenes de seguridad que se incluyen en los cálculos es fácil que las fluctuaciones de servicio se auto-regulen con la asignación alterna de los puntos de recarga.



Figura 22 Distribución de autobuses *Drive-through*.

Fuente: Google+; Autor: Anthony Raynor; Fecha: Mayo 2017

En el Anejo 1 se presenta de forma esquematizada el cálculo del tiempo de despeje para paradas DT, así como su geometría tipo. A modo de conclusión se presentan los valores finales:

Tiempo de despeje:

$$t_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E + l_B}{a}} + \sqrt{\frac{2S}{a}}$$

Factor reductor de la eficiencia:

$$f_e = 1$$

Profundizando más allá de los campos a tratar en este estudio, este diseño aporta resiliencia frente a situaciones extraordinarias. Si se dieran las circunstancias adecuadas para que se generaran colas, una geometría con muchas zonas de carga tiene un espacio para maniobras lo suficientemente grande como para acoger a uno o dos vehículos sin que estos esperen en la vía y propaguen perturbaciones al resto del tráfico.

3.5.2. Angle (A)

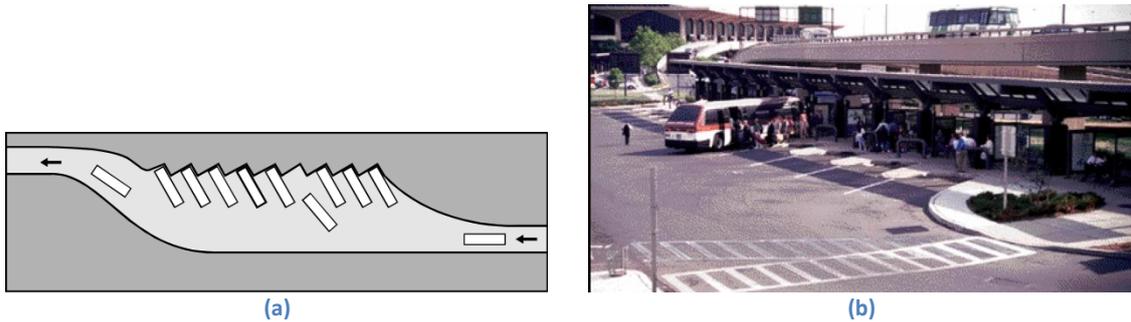


Figura 23 Planta de paradas *Angle*.
 (a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en el aeropuerto de Newark (New Jersey, EEUU)
 Fuente: (Transit Cooperative Research Program, 2003)

Las paradas clasificadas dentro de la categoría *Angle*, en adelante A, son muy compactas y permiten tener un gran número de zonas de carga en poca distancia; sin embargo, consumen mucha superficie en la carretera.

Los diseños A normalmente se utilizan cuando los autobuses ocuparán la parada durante largos períodos de tiempo, por ejemplo en terminales de autobuses interurbanos. Dado que los procesos de recarga eléctrica pueden alcanzar valores similares a estas paradas, siguen siendo una variante a estudiar.

Las operaciones de los vehículos son totalmente independientes, por lo que la eficiencia sigue siendo máxima. El punto negativo es el incremento del tiempo de maniobras; independientemente de cómo se diseñen los detalles, en las paradas A se tiene que maniobrar marcha atrás para reincorporarse a la circulación. Esto supone esperar a encontrar un hueco en el flujo de vehículos privados y mayor tiempo de posicionamiento.

En el Anejo 1 se presenta de forma esquematizada el cálculo del tiempo de despeje para paradas A, así como su geometría tipo. A modo de conclusión se presentan los valores finales:

Tiempo de despeje:

$$t_c = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{E + l_B}{a}} + \sqrt{\frac{l_B}{a}} \right) + \sqrt{\frac{2S}{a}}$$

Factor reductor de la eficiencia:

$$f_e = 1$$

3.5.3. Sawtooth (S)

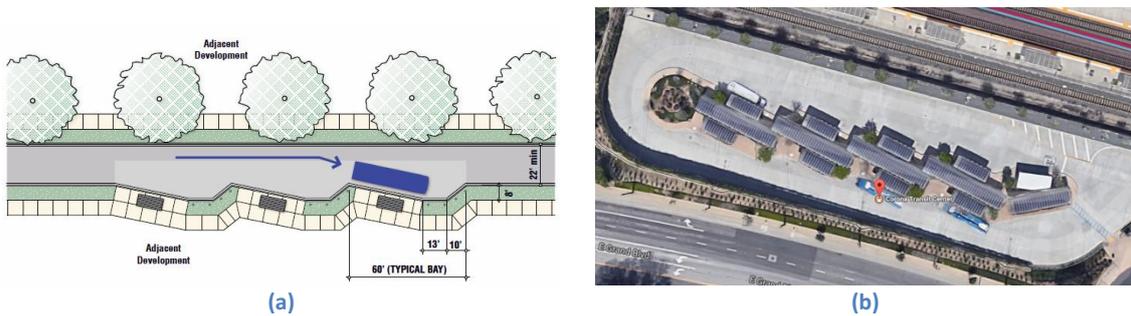


Figura 24 Planta de paradas *Sawtooth*.
(a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Corona (California, EEUU)
 Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) Google Maps

Las paradas clasificadas dentro de la categoría *Sawtooth*, en adelante *S*, no mantienen la orientación paralela a los carriles de circulación; pero el ángulo que forman es pequeño, así como el consumo de suelo urbano destinado a las aceras.

Estos diseños normalmente se utilizan en terminales de transporte, intercambiadores modales... por lo que se encuentran principalmente *off-street*. Sin embargo, gracias a ocupar poco espacio, se pueden integrar con relativa facilidad en diversas tipologías de calles; con ello se conseguirían unas zonas de carga funcionando completamente en paralelo a bajo coste.

Las maniobras que se tienen que realizar son prácticamente nulas. Para entrar en la zona de carga tan solo se requiere frenar mientras se estaciona. Para reincorporarse a la circulación dependerá de la geometría: si hay poca distancia entre zonas de carga, tienen que dar marcha atrás hasta que exista suficiente espacio para realizar una maniobra de adelantamiento del siguiente vehículo; si hay cierta distancia como en la Figura 24, se puede salir directamente hacia delante.

Una de las contrapartidas de las paradas *S* es que disponen los autobuses longitudinalmente; el número de paradas se verá limitado por la longitud de la manzana, pudiendo llegar a ocupar dos.



Figura 25 Distribución de autobuses *Sawtooth*.
Fuente: (Riverside Transit Agency, 2015)

En el Anejo 1 se presenta de forma esquematizada el cálculo del tiempo de despeje para paradas S, así como su geometría tipo. A modo de conclusión se presentan los valores finales:

Tiempo de despeje:

$$t_c = \sqrt{\frac{2l_B}{a}} + t_y + \sqrt{\frac{2h}{a}}$$

Factor reductor de la eficiencia:

$$f_e = 1$$

3.5.4. Linear (L)

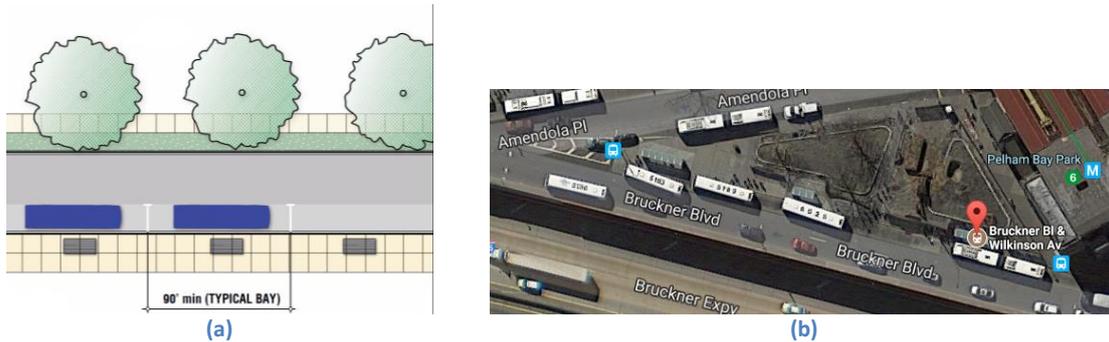


Figura 26 Planta de paradas *Linear*.

(a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Nueva York (California, EEUU)

Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) Google Maps

Las paradas clasificadas dentro de la categoría *Linear*, en adelante L, son paralelas a la acera y se sitúan en el propio carril de circulación. Las paradas L representan casi la totalidad de las paradas *on-street*, concretamente aquellas que tan solo disponen de una zona de carga.

Cuando se trata de una única zona de carga, el consumo de espacio urbano y las maniobras son bastante bajos; pero se estudiará un diseño más complejo con tres o más zonas de carga, para hacerla más parecida a los otros casos. Se trata del único diseño de paradas *on-line*, por lo que se utiliza tan solo un pequeño espacio en la acera para situar las marquesinas y, por primera vez, se utiliza el carril de circulación como espacio para zonas de carga.

Las maniobras que se tienen que hacer varían en función del número de zonas de carga. Cuando tan solo exista una se tratará una operación bastante simple, cuando haya dos, se introduce el efecto de los adelantamientos y a partir de tres existen muchas interacciones. Además, como todas las zonas de carga de la parada están alineadas, la operación de un autobús se puede ver afectada por la presencia de otros vehículos; un mal posicionamiento, por ejemplo. Esto significa es el primer diseño donde el número de zonas de carga afectará a la eficiencia de las mismas.

En cuanto a las operaciones en sí, debe destacarse el hecho de que para realizar los adelantamientos será necesario atravesar un carril mixto (donde circulan vehículos privados) y, por tanto, siempre se debe tener en cuenta un tiempo de reincorporación (t_y).



Figura 27 Distribución de autobuses *Linear*.

Fuente: Google+; Autor: Sebastian Sinisterra; Fecha: Abril 2016

En el Anejo 1 se presenta de forma esquematizada el cálculo del tiempo de despeje para paradas L, así como su geometría tipo. A modo de conclusión se presentan los valores finales:

Tiempo de despeje:

$$t_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{2h_1}{a}} + \sqrt{\frac{2(h_2 + l_B)}{a}} + 2 \cdot t_y$$

Factor reductor de la eficiencia:

$$f_e = \text{Consultar Tabla 2 del Anejo 1}$$

3.6. Estrategias de recarga

Como último punto de la modelización de la operativa de recarga se estudian sus estrategias. A lo largo de todo el modelo se ha planteado un desarrollo sujeto a las hipótesis del punto 3.1; al seguir dichas indicaciones se han limitado las posibles soluciones.

La décima hipótesis indica que no se admiten colas; por ello se ha calcula un número de puntos de recarga suficiente como para servir a todos los vehículos que entran en la parada. Sin esta restricción tendría que considerarse un análisis de las colas generadas y la reserva de espacios adicionales para el equilibrio de los intervalos de paso. Este es un caso donde se limitan las opciones a estudiar en fases posteriores de diseño, ya que convendría plantear otra situación desde el inicio.

Por otra parte, la tercera hipótesis plantea que la recarga de las baterías se realiza *on-street* en la parada final de línea; esto descarta poner puntos de recarga en paradas intermedias, pero ofrece opciones para tener utilizar una o ambas cabeceras como cargadores.

Este grado de libertad ofrece muchas alternativas, ya que permite combinar las opciones de diseño de ambas cabeceras. Sin embargo, el modelo estudiado hasta ahora contempla la existencia de una única cabecera con recarga. Para interiorizar esta toma de decisiones en el modelo se tendrán que hacer algunas consideraciones.

El primero factor que cambiará será el tiempo de descanso de los conductores (θ). En aras de la simplicidad se asume que el descanso es un tiempo fijo por cada ciclo y se distribuirá entre las cabeceras con recarga. Matemáticamente se tendría que considerar el siguiente cambio en todas las ecuaciones anteriores:

$$\theta \rightarrow \frac{\theta}{\gamma} \quad (3.27)$$

donde se ha añadido:

γ =Número de cabeceras con recarga [-]Toma valor 1 o 2 en función de si hace recarga en una cabecera o ambas.

El segundo factor a tener en cuenta es el dimensionamiento de la flota, donde el tiempo de ciclo tendrá más sumandos. En un principio se consideraba que sus componentes eran un tiempo de recorrido y un tiempo de operación, asignado a la única cabecera con recarga eléctrica. En el caso con dos cabeceras este tiempo de operación debe representar al tiempo invertido en ambas; sin embargo, no puede utilizarse el índice γ porque es una seguridad que los tiempos no serán simétricos. Por esto, se tiene que considerar ambos tiempos por separado, lo que directamente implica duplicar los cálculos del problema:

$$M = \left[\frac{C_t}{H} \right]^+ = \left[\frac{T_R + T_{op}}{H} \right]^+ = \left[\frac{T_R + (T_{opo} + T_{opd})}{H} \right]^+ \quad (3.28)$$

donde se ha añadido:

T_{opo} =Tiempo de operación en la cabecera de origen [s]

T_{opd} =Tiempo de operación en la cabecera de destino [s]

Finalmente, el tercer factor que cambiará será el Tiempo de coordinación (t_{coord}). Recordando su significado, este valor representaba un extra de tiempo que tiene que ser añadido a la operación para mantener los intervalos de paso a lo largo de la ruta. En aras de la simplicidad se propone distribuir este tiempo entre las cabeceras con recarga, es decir:

$$\frac{t_{coord}}{\gamma} = T'_{opi} - T_{opi} \quad (3.29)$$

Esta distribución se hace simétricamente, a cada cabecera se le añade el mismo tiempo de coordinación. Sin embargo, un ajuste más preciso puede conseguir que el número de zonas de carga de una de las dos cabeceras no aumente; la otra asumiría mayor tiempo de coordinación. No se entrará en el detalle de optimizar esta relación en el presente estudio; sin embargo, pueden presentarse algunos casos a modo de ejemplo para analizar cómo afecta las decisiones del operador de la línea.

Estas consideraciones se deben incorporar a los cálculos para ajustar el modelo a la realidad; pero tener un sistema con dos cabeceras afecta a otras ecuaciones. Concretamente se trata de la ecuación 3.13, donde se planteaba que la carga era proporcional a la distancia entre puntos de carga consecutivos; por su propia definición no se deben hacer nuevas consideraciones, tan solo medir adecuadamente los valores.

Dejando de lado las cabeceras, otro de los aspectos que condicionan la estrategia de explotación son las baterías. Tal como se explica en el punto 2.4, se recomienda que el nivel de carga (SOC) se mantenga entre unos valores determinados; evitando la carga máxima o su vaciado.

Este rango está recomendado por el fabricante de las baterías, pero en última instancia el responsable de su aceptación y cumplimiento es el operador de la red de autobuses. Por este motivo se considera una decisión estratégica, ya que un rango demasiado estrecho podría condicionar el diseño. Aceptando que el SOC debe estar entre 0.4-0.8, la longitud de algunas rutas puede ser excesivamente grande como para realizar la recarga de las baterías en una única parada.

Si el operador exige una condición de este tipo, se tendría que incorporar un criterio de validación de acuerdo a la ecuación 2.4.

4. Aplicación del modelo

El modelo presentado en el punto anterior tiene que servir para dimensionar el número de puntos de recarga de una línea de autobús; además permite ajustar el tamaño de la flota y los tiempos de ciclo de ruta y de operación en las cabeceras. Esta herramienta se puede utilizar en dos ocasiones principalmente.

La primera de ellas sería en la última fase de diseño de nuevas rutas que deban entrar en operación y no respondan a un recorrido preestablecido. Tras estimar la longitud de la ruta y el número de paradas que mejor se adapten a la demanda, entre otros valores; tras adecuar el recorrido al trazado urbano que recorrerá la línea; el modelo debe ayudar a localizar y diseñar las cabeceras para satisfacer las necesidades de recarga eléctrica.

El segundo caso es el de la actualización de las instalaciones de una red convencional para adaptarla a nuevos vehículos eléctricos. La diferencia respecto al caso anterior es que existe un mayor número de condiciones de contorno que limitan las posibles soluciones y, por tanto, hay menos flexibilidad para identificar la solución óptima del sistema.

De cara a cumplir los objetivos globales de reducción del consumo energético, en especial aquel con origen en combustibles fósiles, y de las emisiones de gases invernadero y partículas nocivas, la adaptación de las redes de autobús tradicional al servicio BEB será una de las prioridades municipales de los próximos años. Por tanto, el principal uso a corto plazo de este modelo será para el segundo caso; pudiendo aplicarse tanto a redes urbanas como interurbanas.

En este punto se aplicará el modelo al segundo caso, concretamente a dos líneas de la nueva red de bus Barcelona.

4.1. Líneas de estudio

La nueva red de bus de Barcelona está en pleno proceso de implantación, donde cada año se incorporan nuevas líneas que deben sustituir parcialmente la antigua red. El diseño final consta de 28 líneas de altas prestaciones con trazados horizontales, verticales y diagonales; con su despliegue se mejorará la conectividad y la cobertura territorial de toda la ciudad. De todas ellas se escogen dos líneas en funcionamiento que ya son objeto de estudio del proyecto ZeEUS en Barcelona: la H6 y la H16.

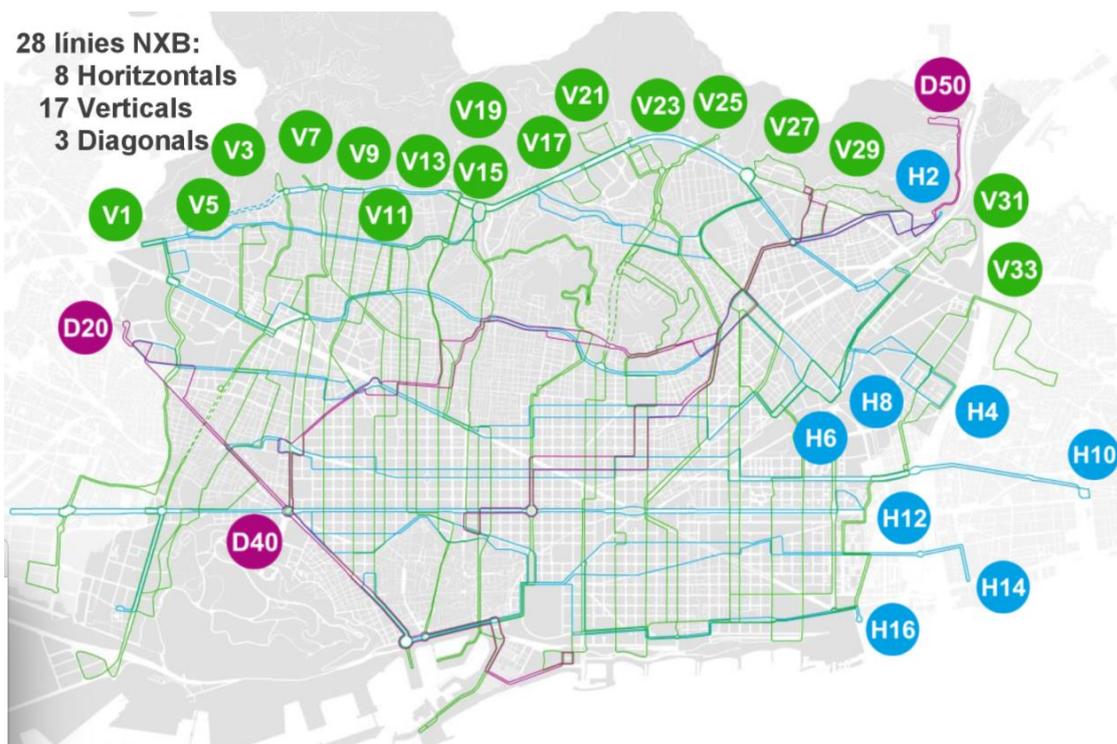


Figura 28 Nueva Red de Bus (NRB/NXB)
 Fuente: (Altamira, 2017)

Una de las ventajas de realizar el estudio sobre estas líneas es la relativa fiabilidad de los datos sobre los que se va a trabajar. A día de hoy se han instalado puntos de recarga en la H16 para realizar pruebas sobre el terreno con dos vehículos (modelo *Solaris Urbino E 18*). Gracias a las mediciones realizadas se ha observado que los datos de consumo eléctrico eran mejores de los esperados; la incorporación de las últimas mediciones facilitadas permite que el análisis que se desarrollará sea más próximo a la realidad.

En cuanto al diseño de las cabeceras, actualmente están dimensionadas para operaciones tradicionales; es decir, el número de zonas de carga será inferior al no tener que recargar las baterías. Además, todos los diseños se plantean como *linear* y, en la mayoría de casos, sin permitir los adelantamientos.

4.1.1. H6

La línea H6 entró en servicio el 1 de octubre de 2012 y une Zona Universitària, en la Av. Diagonal, con la estación de Fabra i Puig, en Av. Meridiana.

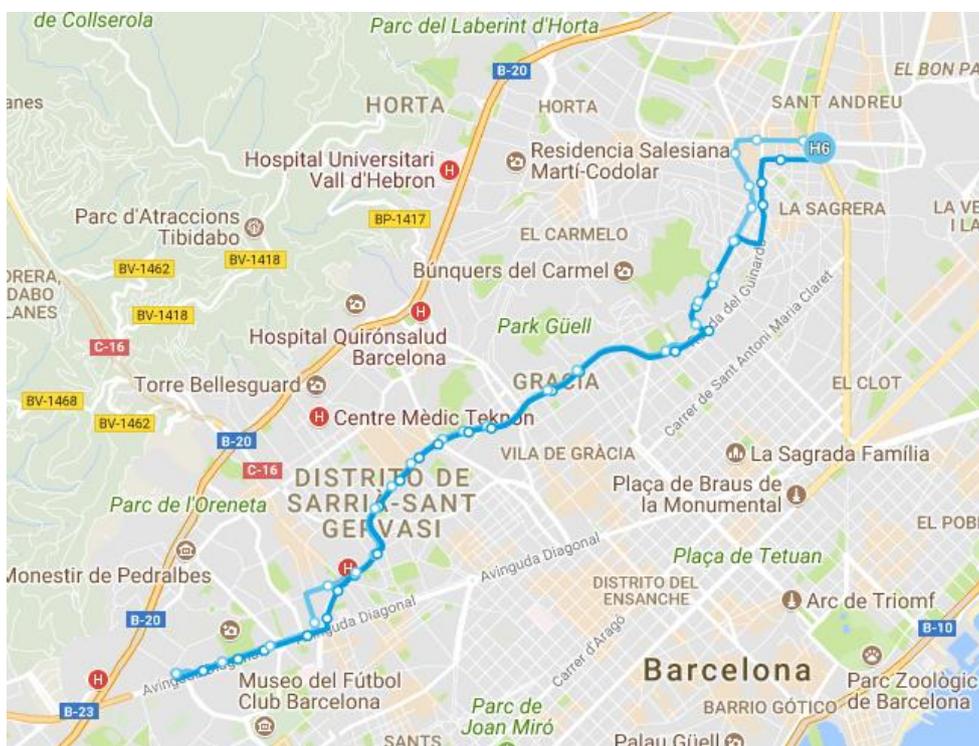


Figura 29 Recorrido de la H6
Fuente: (TMB)

Tabla 3 Datos principales de la ruta H6. (Estrada, 2017)

Nombre de la ruta	H6
Origen (O)	Zona Universitària
Destino (D)	Fabra i Puig
Distancia O-D	9.95 Km
Distancia D-O	9.74 Km
Intervalo de paso (H)	5 Min
Velocidad comercial (v_c)	12.073 Km/h
Tiempo de descanso (θ) por ciclo	6 Minutos

Origen: Zona Universitària

La parada de Zona Universitaria se sitúa en Avinguda Diagonal, a la altura del número 694. Limita con la Facultat d'Economia i Empresa de la Universitat de Barcelona, por el norte, y con una zona verde y una salida del metro, por el sur.



Figura 30 Situación de la parada de cabecera Zona Universitària.

Fuente: Elaboración propia

Esta zona sirve como parada para varias líneas y actualmente existen muchas interferencias por la presencia de carriles de tráfico mixto, la presencia de dos cordones de aparcamiento de vehículos particulares, el acceso a un parking privado... Actualmente el diseño de las zonas de carga es *linear* con un segundo carril en paralelo; sin embargo, para la operación de la H6 tan solo se facilita una parada con dos zonas de carga y sin margen para adelantamientos.

No es objeto de estudio de este trabajo analizar la viabilidad de implantar diseños diferentes a los actuales; sin embargo, se comentan las posibilidades que ofrece cada uno de los presentados anteriormente:

- **Drive-Through:** Con la geometría y ordenación del tráfico actual no se puede plantear este diseño, requeriría realizar reformas urbanísticas para minimizar la influencia de los vehículos privados, facilitar el movimiento de los autobuses y mejorar la transferencia con el metro.
- **Angle:** Este diseño se descarta debido a las operaciones de marcha atrás. Todo el cuerpo del vehículo tendría que salir de la zona de carga y esta maniobra podría llegar a bloquear todos los carriles de circulación.
- **Sawtooth:** Se descarta debido al poco beneficio esperado frente al caso linear.
- **Linear:** Se considerará en todas las cabeceras para mantener como alternativa la situación actual.

Destino: Fabra i Puig

La parada de Fabra i Puig se sitúa en Avinguda Meridiana, a la altura del número 384. Se sitúa en la frontera entre los distritos de Sant Andreu y Nou Barris. Se trata de una zona residencial con conexión a la red de cercanías de Barcelona mediante la estación de Sant Andreu Arenal.



Figura 31 Situación de la parada de cabecera Fabra i Puig
Fuente: Elaboración propia

Esta zona goza de buenas conexiones, sin embargo también recibe bastante tráfico de entrada a Barcelona. Actualmente el diseño de la parada es *linear*, pero en la Figura 31 se destaca en verde un espacio alternativo que ofrece más posibilidades para situar nuevas zonas de recarga eléctrica.

No es objeto de estudio de este trabajo analizar la viabilidad de implantar diseños diferentes a los actuales; sin embargo, se comentan las posibilidades que ofrece cada uno de los presentados anteriormente:

- **Drive-Through:** Se descarta debido a la poca compatibilidad de este diseño en la geometría de la zona.
- **Angle:** Actualmente la estación de Fabra i Puig sirve principalmente a autobuses de conexión de Barcelona con los municipios de su alrededor. Asumiendo que estos también necesitarán recarga eléctrica, puede proponerse la concentración de todas las zonas en una única terminal que amplíe la actual.
- **Sawtooth:** El perfil transversal de Avenida Meridiana, al disponer de un ancho de unos 50 metros entre fachadas aproximadamente en esta zona, permite plantear un uso puntual de parte de la acera para situar puntos de recarga eléctrica. Esto facilitaría la circulación por el carril bus y mejoraría la eficiencia de la parada.
- **Linear:** Se considerará en todas las cabeceras para mantener como alternativa la situación actual.

Origen: Zona Franca

La parada de Zona Franca se sitúa en la Plaça del Nou y se ha instalado un punto de recarga eléctrica en el Carrer del Cisell, con el que actualmente se realizan las pruebas.

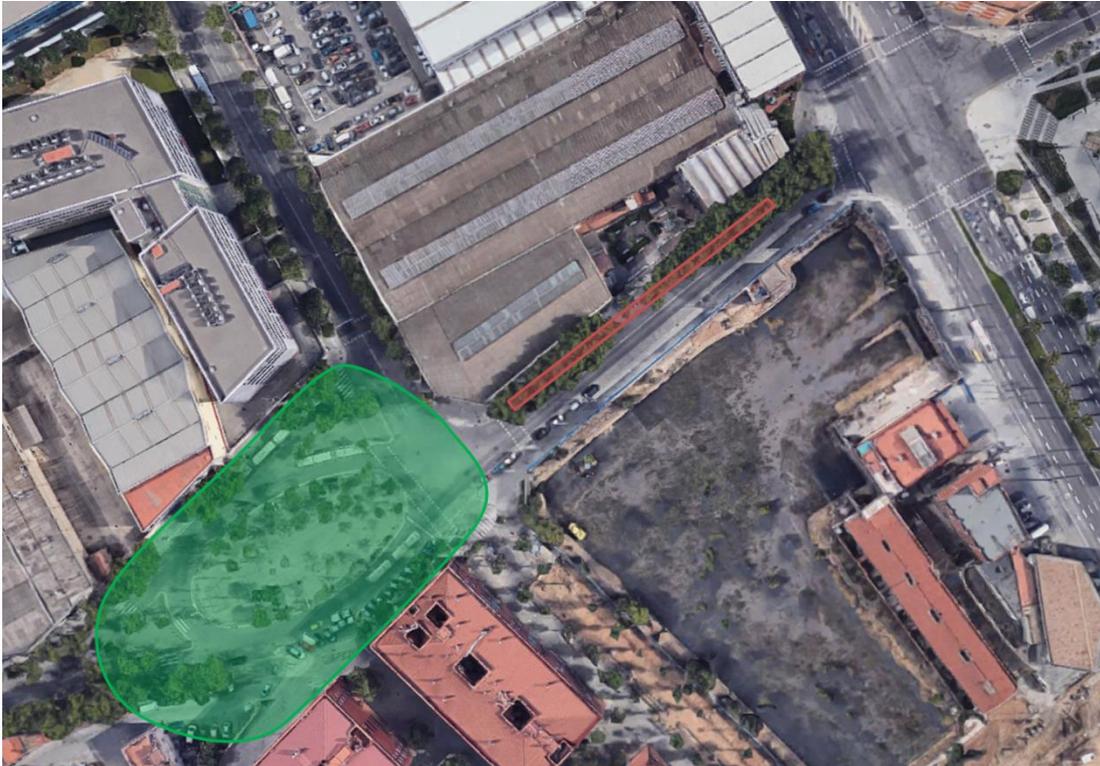


Figura 33 Situación de la parada de cabecera Zona Franca.

Fuente: Elaboración propia

La transformación que se está realizando estos últimos años en la zona sugiere la posibilidad de promover mejoras urbanísticas en la Plaça del Nou y sus alrededores para integrar diseños de paradas menos tradicionales. Esto permite escapar del diseño *Linear*, el único posible con la geometría del Carrer del Cisell.

No es objeto de estudio de este trabajo analizar la viabilidad de implantar diseños diferentes a los actuales; sin embargo, se comentan las posibilidades que ofrece cada uno de los presentados anteriormente:

- **Drive-Through:** Se puede plantear hacer este tipo de diseño con la reforma de la plaza; se tendría que situar en uno de los laterales para facilitar el giro, como puede ser la zona donde actualmente se sitúa una isleta.
- **Angle:** Manteniendo el final de línea y el giro en la plaza, este diseño no se adecúa a la geometría y entorpecería la circulación de vehículos privados.
- **Sawtooth:** Se descarta debido al poco beneficio esperado frente al caso linear.
- **Linear:** Se considerará en todas las cabeceras para mantener como alternativa la situación actual.

Destino: Fòrum

La parada del Fòrum se sitúa en Avinguda Diagonal, a la altura del número 19. La cabecera deja al pasaje a las puertas del centro comercial Diagonal Mar, teniendo una conexión directa con el tranvía, línea T4 parada El Maresme, y el metro, línea 4 parada El Mareme|Fòrum. En las cercanías destacan el recinto del Fòrum, con diferentes equipamientos en el interior y el Campus Diagonal-Besòs de la UPC; ejemplos de la transformación urbanística que se ha realizado en esta zona desde hace poco más de una década.

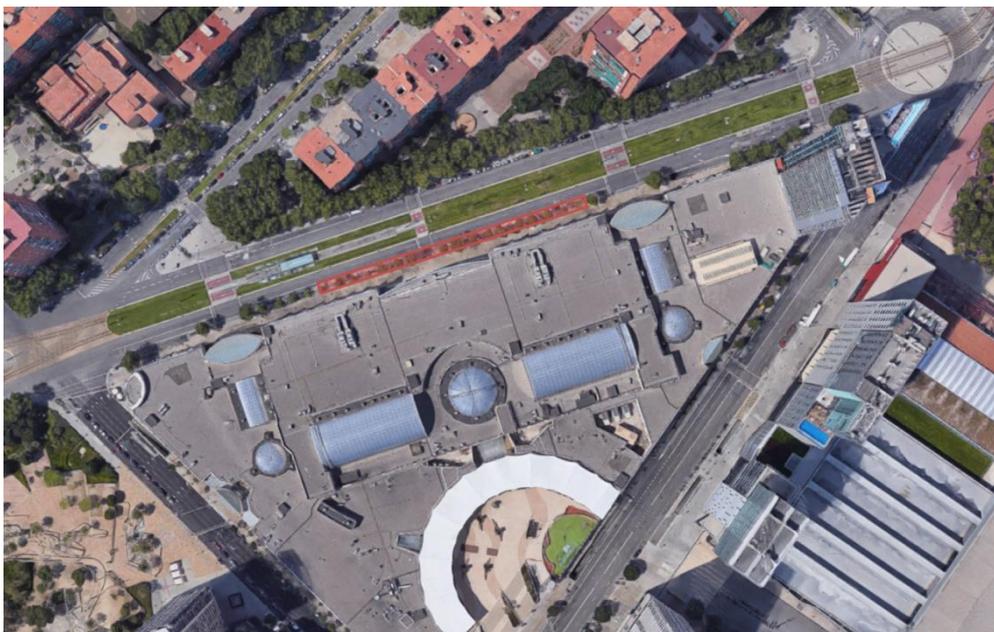


Figura 34 Situación de la parada de cabecera Fòrum.

Fuente: Elaboración propia

La localización de esta cabecera limita las opciones para implantar puntos de recarga. La marcada geometría y la influencia del tranvía impiden romper la linealidad en este tramo; en las cercanías tampoco parecen existir muchas alternativas.

No es objeto de estudio de este trabajo analizar la viabilidad de implantar diseños diferentes a los actuales; sin embargo, se comentan las posibilidades que ofrece cada uno de los presentados anteriormente:

- **Drive-Through:** Se descarta debido a la poca compatibilidad de este diseño en la geometría de la zona.
- **Angle:** Se descarta debido a la poca compatibilidad de este diseño en la geometría de la zona.
- **Sawtooth:** Se plantea el uso puntual de parte de la acera para situar puntos de recarga eléctrica, pero se debería estudiar la compatibilidad con accesos y salidas de parking, pasos de cebra, etc.
- **Linear:** Se considerará en todas las cabeceras para mantener como alternativa la situación actual.

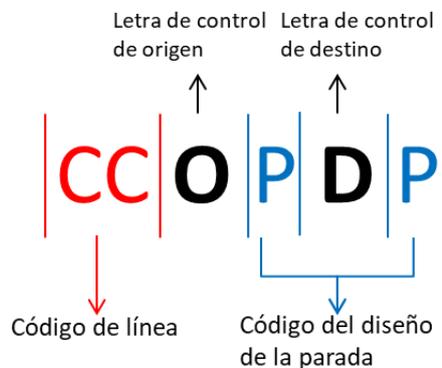
4.2. Casos de estudio

Para poder analizar la sensibilidad del modelo se utilizarán estas dos líneas de autobús variando algunos de los aspectos de las cabeceras. Esto permitirá ver cómo afectan estos cambios a la operativa y, en definitiva, anticipar el impacto de las decisiones tomadas.

Se efectuarán cambios sobre:

- La línea de estudio: H6, H16
- El número de cabeceras con punto de recarga: Origen (O), Destino (D)
- El diseño de parada con recarga escogido: Drive-Through (DT), Angle (A), Sawtooth (S), Linear (L), sin recarga (X)

Para identificar unívocamente a todos los casos de una forma sistematizada se establece la siguiente codificación:



Por ejemplo, en el caso de estudiar la línea H6 sin recarga en origen y con recarga en destino con un diseño *Drive-Through*, el código sería: **H6OXDDT**.

El modelo se aplicará sobre una selección de casos entre todos los posibles, que se obtendrían al cruzar los posibles diseños de parada de las cabeceras en origen y destino. Estas opciones se han presentado en el punto 4.1.

4.2.1. H6OLDS

Tabla 5 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Sawtooth

			BEB	MB
Cabeceras				
<i>Origen</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	180.00	180.00
Tiempo de recarga	T	s	208.32	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	534.73	537.47
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.143	1.143
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	13.2	13.1
Número de zonas de carga	N	zonas	2	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	65.27	62.53
<i>Destino</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	9.03	10.29
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	180	180
Tiempo de recarga	T	s	211.84	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	493.98	491.25
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.000	1.000
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	14.6	14.7
Número de zonas de carga	N	zonas	2	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	106.02	108.75
Línea				
Intervalo de paso	H	min	5	5
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	247.91	247.91
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	19.69	19.69
Velocidad comercial	v_c	km/h	12.1	12.1
Número de autobuses	M	veh	23	23
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	1.91	1.90
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	5.84	33.13
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	4	4

Ya en los primeros resultados se observa la operativa de los sistemas de recarga para autobuses eléctricos no va a diferir en gran medida de la operativa tradicional.

Es importante destacar que la diferencia principal radica en que el tiempo de recarga es ligeramente superior al tiempo de descanso de los conductores, factor que aumenta el tiempo de operación. Por otra parte el tiempo de despeje para los vehículos eléctricos es inferior debido a la mejora de la aceleración, tal como se describía en el punto 2.3.

En este caso se observa que el tiempo de coordinación es bastante pequeño, hecho que indica que el cálculo del número de vehículos es ligeramente inferior a los 23 vehículos indicados. Esto significa que habrá menos tiempo disponible en cabeceras para ajustar las irregulares propias del servicio.

4.2.2. H6OLDL

Tabla 6 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Linear

			BEB	BEB	MB
Cabeceras					
<i>Origen</i>			20% t_{coord}		
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	180.00	180.00	180.00
Tiempo de recarga	T	s	208.32	208.32	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	671.59	585.97	523.89
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.224	1.143	1.143
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	15.7	12.1	13.5
Número de zonas de carga	N	zonas	3	2	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	228.41	14.03	76.11
<i>Destino</i>			80% t_{coord}		
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	180	180	180
Tiempo de recarga	T	s	211.84	211.84	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	657.12	742.75	504.82
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.224	1.224	1.143
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	16.1	14.3	14.0
Número de zonas de carga	N	zonas	3	3	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	242.88	157.25	95.18
Línea					
Intervalo de paso	H	min	5	5	5
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	247.91	247.91	247.91
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	19.69	19.69	19.69
Velocidad comercial	v_c	km/h	12.1	12.1	12.1
Número de autobuses	M	veh	24	24	23
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	1.92	1.92	1.91
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	142.70	57.08/228.33	19.56
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	6	5	4

En este caso se observa la importancia del diseño de las paradas. El tiempo de despeje de la cabecera de destino aumenta al tratarse de una *linear*; este aumento en combinación con el aumento de tiempo causado por la recarga eléctrica implica que con autobuses eléctricos se necesite un vehículo más para operar la línea y una zona de carga más por cada cabecera.

Se trata de un caso límite en el que el número de vehículos calculado es ligeramente superior a un número entero, haciendo que el tiempo de coordinación se la línea sea 4.75 minutos aproximadamente (a repartir entre las dos cabeceras). Esto, a su vez, conlleva una infrutilización de las zonas de carga, teniendo tiempos de parada vacía de 3.8 minutos.

Para limitar los costes se propone una distribución del tiempo de coordinación no equitativa, haciendo que una cabecera asuma mayor tiempo de coordinación que la otra. Como resultado se reduce una zona de carga y se aumenta el uso que se le da al resto.

4.2.3. H6OXDA

Tabla 7 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: X – Destino: Angle

			BEB	MB
Cabeceras				
<i>Origen</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	-	-
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	-	-
Tiempo de despeje	t_c	s	-	-
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	-	-
Tiempo de recarga	T	s	-	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	-	-
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	-	-
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	-	-
Número de zonas de carga	N	zonas	-	-
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	-	-
<i>Destino</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	36.29	41.38
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	360	360
Tiempo de recarga	T	s	375.15	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	728.72	728.72
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.000	1.000
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	14.8	14.8
Número de zonas de carga	N	zonas	3	3
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	171.28	171.28
Línea				
Intervalo de paso	H	min	5	5
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	247.91	247.91
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	19.69	19.69
Velocidad comercial	v_c	km/h	12.1	12.1
Número de autobuses	M	veh	22	22
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	1.82	1.82
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	55.61	65.67
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	3	3

En el tercer caso en el que se analiza la H6 se plantea la recarga en una única cabecera. El primer resultado importante que se observa es que el número de zonas de carga totales que se necesitan es inferior a los dos casos anteriores. La reducción de operaciones tales como las de maniobras para la conexión (45 segundos) aumenta la eficiencia del servicio de la línea.

El número de vehículos también se ha reducido, necesitando uno menos que en el caso de tener dos cabeceras.

Además, conviene destacar que el tiempo de coordinación es aproximadamente de un minuto y que el tiempo de parada vacía casi el triple. Esto asegura que se pueda efectuar la recarga eléctrica a pesar de graves incidencias en el servicio ordinario de las líneas.

Esta opción representaría a la situación donde la cabecera de Fabra i Puig actúa como nodo de transferencia modal.

4.2.4. H6OXDL

Tabla 8 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: X – Destino: Linear

			BEB	MB
Cabeceras				
<i>Origen</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	-	-
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	-	-
Tiempo de despeje	t_c	s	-	-
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	-	-
Tiempo de recarga	T	s	-	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	-	-
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	-	-
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	-	-
Número de zonas de carga	N	zonas	-	-
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	-	-
<i>Destino</i>				
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	360	360
Tiempo de recarga	T	s	375.15	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	728.72	728.72
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.224	1.224
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	14.6	14.6
Número de zonas de carga	N	zonas	3	3
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	171.28	171.28
Línea				
Intervalo de paso	H	min	5	5
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	247.91	247.91
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	19.69	19.69
Velocidad comercial	v_c	km/h	12.1	12.1
Número de autobuses	M	veh	22	22
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	1.82	1.82
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	50.98	63.45
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	3	3

El último caso de la línea H6 pretende representar a la opción con mayores posibilidades a desarrollar en el futuro, ya que dispone de una única cabecera y un diseño de parada similar a la actual.

Los resultados son similares al caso anterior, la única variación radica en el tiempo de coordinación de la línea. Se refuerza la idea de que la concentración de operaciones de recarga en una única cabecera reduce el número de zonas de carga para cada línea.

4.2.5. H16ODTL

Tabla 9 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Drive-Through – Destino: Linear

			BEB	BEB	MB
Cabeceras					
<i>Origen</i>			100% t_{coord}		
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	28.46	28.46	32.45
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240.00	240.00	240.00
Tiempo de recarga	T	s	246.04	246.04	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	560.97	678.60	563.64
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1	1	1
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	12.8	10.6	12.8
Número de zonas de carga	N	zonas	2	2	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	399.03	281.40	396.36
<i>Destino</i>			0% t_{coord}		
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240	240	240
Tiempo de recarga	T	s	249.73	249.73	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	571.50	453.87	568.83
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.143	1.000	1.143
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	12.4	7.9	12.5
Número de zonas de carga	N	zonas	2	1	2
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	388.50	26.13	391.17
Línea					
Intervalo de paso	H	min	8	8	8
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	155.09	155.09	155.09
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	24.2	24.2	24.2
Velocidad comercial	v_c	km/h	10.9	10.9	10.9
Número de autobuses	M	veh	19	19	19
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	2.47	2.47	2.47
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	117.62	235.25/0	122.34
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	4	3	4

Entrando a analizar la línea H16 se puede observar que el tiempo de recarga y el tiempo de descanso de los conductores están más próximos que en la H6. Esto se verá reflejado en que los tiempos de coordinación a asignar en cada una de las cabeceras sea similar en el caso eléctrico y en el tradicional.

Al igual que en el segundo caso (H6OLDL), en esta situación existen importantes tiempos de coordinación y de parada vacía. Esta situación indica que es posible plantear una redistribución de dichos tiempos entre ambas cabeceras. La diferencia entre ambas situaciones es que en este caso se necesita trasvasar todo el tiempo de coordinación a una de las cabeceras, dejando a la cabecera de destino con menos de medio minuto con tiempo de parada vacía.

4.2.6. H16OLDS

Tabla 10 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Sawtooth

			BEB	BEB	MB
Cabeceras					
<i>Origen</i>			<i>100% t_{coord}</i>		
Tiempo de parada	t _d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t _{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t _c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240.00	240.00	240.00
Tiempo de recarga	T	s	246.04	246.04	-
Tiempo de operación	T' _{op}	s	578.70	701.59	581.09
Factor reductor de la eficiencia	f _e	-	1.143	1.143	1.143
Capacidad de la parada	B _s	veh/h	12.3	10.1	12.2
Número de zonas de carga	N	zonas	2	2	2
Tiempo de parada vacía	t _{es}	s	381.30	258.41	378.91
<i>Destino</i>			<i>0% t_{coord}</i>		
Tiempo de parada	t _d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t _{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t _c	s	9.03	9.03	10.29
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240	240	240
Tiempo de recarga	T	s	249.73	249.73	-
Tiempo de operación	T' _{op}	s	553.77	430.88	551.37
Factor reductor de la eficiencia	f _e	-	1.000	1.000	1.000
Capacidad de la parada	B _s	veh/h	13.0	8.4	13.1
Número de zonas de carga	N	zonas	2	1	2
Tiempo de parada vacía	t _{es}	s	406.23	49.12	408.63
Línea					
Intervalo de paso	H	min	8	8	8
Intervalo de margen de operación	h _{om}	s	155.09	155.09	155.09
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L _r	km	24.2	24.2	24.2
Velocidad comercial	v _c	km/h	10.9	10.9	10.9
Número de autobuses	M	veh	19	19	19
Tiempo de ciclo de la línea	C _t	h	2.47	2.47	2.46
Tiempo de coordinación	t _{coord}	s	122.89	245.78/0	128.64
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	4	3	4

De los resultados de la operativa con el diseño H16OLDS se observa que no existen grandes variaciones respecto a la situación anterior.

Cuando el valor numérico de M no esté próximo a un valor entero, las diferencias en los diseños de las paradas, y las pequeñas variaciones del tiempo de operación que se derivan, no influyen en gran medida en el tamaño de la flota ni en el número de zonas de carga.

4.2.7. H16OLDL

Tabla 11 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Linear

			BEB	BEB	MB
Cabeceras					
<i>Origen</i>			<i>100% t_{coord}</i>		
Tiempo de parada	t _d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t _{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t _c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240.00	240.00	240.00
Tiempo de recarga	T	s	246.04	246.04	-
Tiempo de operación	T ¹ _{op}	s	567.20	678.60	569.21
Factor reductor de la eficiencia	f _e	-	1.143	1.143	1.143
Capacidad de la parada	B _s	veh/h	12.5	10.5	12.5
Número de zonas de carga	N	zonas	2	2	2
Tiempo de parada vacía	t _{es}	s	392.80	281.40	390.79
<i>Destino</i>			<i>0% t_{coord}</i>		
Tiempo de parada	t _d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t _{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t _c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	240	240	240
Tiempo de recarga	T	s	249.73	249.73	-
Tiempo de operación	T ¹ _{op}	s	565.27	453.87	563.26
Factor reductor de la eficiencia	f _e	-	1.143	1.000	1.143
Capacidad de la parada	B _s	veh/h	12.6	7.9	12.6
Número de zonas de carga	N	zonas	2	1	2
Tiempo de parada vacía	t _{es}	s	394.73	26.13	396.74
Línea					
Intervalo de paso	H	min	8	8	8
Intervalo de margen de operación	h _{om}	s	155.09	155.09	155.09
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L _r	km	24.2	24.2	24.2
Velocidad comercial	v _c	km/h	10.9	10.9	10.9
Número de autobuses	M	veh	19	19	19
Tiempo de ciclo de la línea	C _t	h	2.47	2.47	2.47
Tiempo de coordinación	t _{coord}	s	111.39	222.79/0	116.76
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	4	3	4

De los resultados de la operativa con el diseño H16OLDL se observa que no existen grandes variaciones respecto a las situaciones anteriores.

4.2.8. H16OLDX

Tabla 12 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: X

			BEB	BEB	MB
Cabeceras					
<i>Origen</i>					
Tiempo de parada	t_d	s	9.69	9.69	9.69
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	4.07	4.07	4.07
Tiempo de despeje	t_c	s	27.42	27.42	29.30
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	480.00	480.00	480.00
Tiempo de recarga	T	s	450.78	450.78	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	1132.47	720.00	1132.47
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	1.224	1.143	1.224
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	9.4	9.8	9.4
Número de zonas de carga	N	zonas	3	2	3
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	307.53	240.00	307.53
<i>Destino</i>					
Tiempo de parada	t_d	s	-	-	-
Tiempo de margen de operación	t_{om}	s	-	-	-
Tiempo de despeje	t_c	s	-	-	-
Tiempo de descanso de los conductores	θ	s	-	-	-
Tiempo de recarga	T	s	-	-	-
Tiempo de operación	T'_{op}	s	-	-	-
Factor reductor de la eficiencia	f_e	-	-	-	-
Capacidad de la parada	B_s	veh/h	-	-	-
Número de zonas de carga	N	zonas	-	-	-
Tiempo de parada vacía	t_{es}	s	-	-	-
Línea			$v_c=11$		
Intervalo de paso	H	min	8	8	8
Intervalo de margen de operación	h_{om}	s	155.09	155.09	155.09
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	24.2	24.2	24.2
Velocidad comercial	v_c	km/h	10.9	11.0	10.9
Número de autobuses	M	veh	19	18	19
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	2.41	2.39	2.41
Tiempo de coordinación	t_{coord}	s	442.71	30.24	440.02
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	3	2	3

Con una única cabecera actuando como punto de recarga de baterías se aumenta la eficiencia del servicio de la línea y se necesitan tan solo 3 zonas de carga. Por primera vez, el tiempo de recarga eléctrica será inferior al tiempo de descanso de los conductores.

Sin embargo, se observa que existe una gran cantidad de tiempo invertido en la coordinación de la línea; de hecho cuadruplica el tiempo de coordinación asignado a cada cabecera en los tres últimos casos. Esto se debe a que, al igual que en el caso H6OXDL, el cálculo del número de vehículos para realizar la operación es muy poco superior a un número entero.

De cara a reducir costes, se plantea una situación en la que la velocidad comercial ha aumentado ligeramente hasta alcanzar los 11km/h; por ejemplo, gracias a la priorización semafórica. Bajo esta hipótesis, el cálculo nos indica que para explotar esta línea se necesitará un vehículo menos y tan solo dos zonas de carga, lo que representa importantes ahorros.

4.3. Validación de la recarga eléctrica

Tal como se explica en el punto 3.6, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en las líneas que operan con vehículos eléctricos es el estado de carga (SOC). El fabricante recomienda que el servicio se dé dentro de un rango de carga de las baterías. Dado que se analizan líneas pertenecientes a la red de autobús de Barcelona, se tiene que comprobar que el consumo de las baterías permanece entre un 80% y un 40% en cada caso.

Tabla 13 Estado del SOC en las cabeceras.

Caso	Origen → Destino					Destino → Origen				
	Carga inicial		Consumo	Carga final		Carga inicial		Consumo	Carga final	
	Energía (kWh)	SOC	Energía (kWh)	Energía (kWh)	SOC	Energía (kWh)	SOC	Energía (kWh)	Energía (kWh)	SOC
H6OLDS	100.0	80%	18.5	81.5	65%	100.0	80%	18.2	81.8	65%
H6OLDL	100.0	80%	18.5	81.5	65%	100.0	80%	18.2	81.8	65%
H6OXDA	81.8	65%	18.5	63.3	51%	100.0	80%	18.2	81.8	65%
H6OXDL	81.8	65%	18.5	63.3	51%	100.0	80%	18.2	81.8	65%
H16ODTDL	100.0	80%	22.8	77.2	62%	100.0	80%	22.3	77.7	62%
H16OLDS	100.0	80%	22.8	77.2	62%	100.0	80%	22.3	77.7	62%
H16OLDL	100.0	80%	22.8	77.2	62%	100.0	80%	22.3	77.7	62%
H16OLDX	100.0	80%	22.8	77.2	62%	77.2	62%	22.3	54.9	44%

De acuerdo a los resultados obtenidos, todos los casos analizados cumplen con las exigencias del operador de las líneas. Para comprobarlo se asume que el SOC después del proceso de recarga de las baterías es del 80%; para que el recorrido planificado sea válido, el SOC debe ser superior al 40% antes de la siguiente recarga.

El consumo en cada trayecto es independiente de los diseños de las paradas y del número de cabeceras, ya que solo depende de la distancia recorrida. Además, es conveniente remarcar que en el modelo presentado en este estudio el tiempo de recarga es el necesario para recuperar la energía perdida desde la última recarga; por eso siempre se sale con SOC=80%.

En aquellos casos en los que hay dos cabeceras no existe problema alguno con el nivel de carga, ya que se pierde un 15% en la H6 y un 18% en la H16. En las situaciones con una única cabecera con recarga eléctrica, las pérdidas de energía se acumulan a lo largo de toda la ruta.

Una reflexión que se extrae de este hecho es que, en el caso de tener dos cabeceras, un autobús puede saltarse una operación de recarga sin afectar al rendimiento a largo plazo de las baterías. En cambio, si tan solo se puede recargar en una cabecera, el autobús no debería saltarse en ningún caso el proceso de carga; de ser así se afectaría a la vida útil de la batería y existiría el riesgo de quedarse sin energía en el trayecto.

Un ejemplo de esta situación es el caso H16OLDX, donde en un ciclo completo se pierde un 36% del SOC.

5. Costes del operador

Tras utilizar el modelo para analizar diversas opciones, se ha observado que no existen grandes diferencias entre la operativa tradicional con autobuses con motores de combustión interna y la operativa con sistemas de recarga *on-street*.

Sin embargo, estas similitudes se restringen únicamente al tiempo de operación, el número de zonas de carga, el tamaño de la flota, etc. Al tratarse de dos tecnologías diferentes, no resulta conveniente hacer una comparativa centrada exclusivamente en los resultados obtenidos. Las mayores diferencias se encontrarán en los costes que supone cada opción.

Como en todo sistema de transporte, existen dos grandes conceptos a tener en cuenta en la evaluación económica del sistema. Por una parte están los costes del operador, que representan la inversión y los gastos variables para ofrecer el servicio, y además se tienen en cuenta los costes de los usuarios, que representan el tiempo invertido para el desplazamiento.

En este trabajo no se han utilizado datos de demanda, por lo que resultaría extraño introducir una demanda artificial en este punto del estudio. Esto implica que no se pueden conocer los costes de los usuarios a partir de este trabajo.

Tan solo se desarrollarán los costes del operador; que se compone de los siguientes conceptos:

- **Coste de la infraestructura:** Representa la inversión necesaria para la instalación y el mantenimiento de las estaciones de carga.
- **Coste de la flota:** Representa la inversión necesaria para la compra y el mantenimiento de los vehículos de la flota.
- **Coste por uso de suelo:** Representa el coste de oportunidad por el uso del espacio público para reservar la superficie necesaria de las cabeceras.
- **Coste por consumo:** Representa el coste variable asociado al consumo energético necesario para realizar los desplazamientos.
- **Coste de personal:** Representa el salario de los conductores de los vehículos de cada línea.
- **Coste por las externalidades:** Representa el coste social por las externalidades del transporte.

Para unificar la inversión necesaria en los vehículos y la infraestructura y los costes variables de la operación se calculará el coste del operador por línea y día.

$$C_O = \epsilon_N N + \epsilon_M M + \epsilon_A A + \epsilon_C C + \epsilon_D D + \epsilon_{GHG} GHG \quad (5.1)$$

donde:

C_O = Coste del operador [€/día]

ϵ_N =Coste unitario diario de la infraestructura [€/zona-día]

N =Número de zonas de carga [zonas]

ϵ_M =Coste unitario diario de la flota [€/veh-día]

M =Número de vehículos de la flota [veh]

ϵ_A =Coste unitario diario por uso de suelo [€/m²-día]

A =Superficie ocupada por las paradas [m²]

ϵ_C =Coste unitario diario por consumo [€/kWh-día] ó [€/l-día]

C =Energía eléctrica o combustible consumido [kWh] ó [l]

ϵ_D =Coste unitario diario por personal [€/conductor-día]

D =Conductores contratados para el servicio [conductor]

ϵ_{GHG} =Coste unitario diario por las externalidades [€/g-día]

GHG =Emisiones de contaminantes [g]

En el cálculo del coste de la **infraestructura** ($\epsilon_N N$) se considera que los dispensadores de gasolina necesarios para abastecer a los autobuses con motor de combustión interna son despreciables, ya que no se dispondrían en las paradas de autobús. Por otra parte, en el caso de los BEB se considerarán las estaciones de carga en la calle.

El coste unitario diario de la infraestructura (ϵ_N) se calculará amortizando el coste compra de los cargadores y su mantenimiento en 15 años. Para estimar el mantenimiento se considera que el coste anual será del 2.5% del precio de compra.

$$\epsilon_N N = \left(\frac{\text{Coste unitario est.carga}}{\text{Años de amortización}} + \text{Mantenimiento anual} \right) \cdot N \quad (5.2)$$

En el cálculo del coste de la **flota** ($\epsilon_M M$) se utilizarán los precios mostrados en (Estrada, 2017). Para los autobuses eléctricos de 18 metros (modelo *Solaris Urbino E 18*) el precio asciende a 700,000 €/veh; mientras que para los modelos actuales de ICE se considera que el precio es de 250,000 €/veh.

El coste unitario diario de la flota (ϵ_M) se calculará amortizando el coste compra de los vehículos a 15 años, de acuerdo a conversaciones mantenidas con un Director Adjunto de TMB. Para estimar el mantenimiento se considerará un coste por kilómetro recorrido, obtenido de la misma fuente que el precio de compra.

$$\epsilon_M M = \left(\frac{\text{Coste unitario veh.}}{\text{Años de amortización}} + \text{Mantenimiento anual} + \frac{\text{Coste unitario baterías}}{\text{Años de amortización}} \right) \cdot M \quad (5.3)$$

En el cálculo del coste por uso de **suelo** ($\text{€}_A A$) se considerará el espacio aproximado para instalar los cargadores eléctricos, el ocupado por las zonas de carga y el reservado para realizar las maniobras.

El coste unitario diario por el uso de suelo (€_A) se calculará mediante una estimación del precio de mercado del alquiler de una superficie para uso industrial. Al realizar operaciones *on-street* se reduce la carga de trabajo que supondría hacer la recarga de las baterías en cochera, lo que implica una reducción del espacio necesario; motivo por el cual se considera el precio para suelos para uso industrial.

$$\text{€}_A A = \text{Precio de alquiler del suelo} \cdot (\text{Superficie por zona carga} \cdot N) \quad (5.4)$$

En el cálculo del coste por **consumo** ($\text{€}_C C$) se considerará el consumo energético para realizar los desplazamientos a lo largo del día. Para estimar el consumo de los ICE se considerará el consumo de gasolina por unidad de distancia; mientras que para los BEB se considerará la energía suministrada a largo del día por el total de las estaciones de recarga.

El coste unitario diario por consumo (€_C) se calculará mediante una estimación del precio de mercado de la gasolina y de la electricidad; por lo que sus unidades variarán en función del tipo de vehículo.

Para ICE:

$$\text{€}_C C = \text{€}_C \cdot \left(\frac{\text{horas jornada}}{c_t} \cdot L_R \cdot \text{Consumo unitario} \right) \quad (5.5)$$

Para BEB:

$$\text{€}_C C = \text{€}_C \cdot \left(\frac{\text{horas jornada}}{c_t} \cdot T_e(\text{cada ciclo}) \cdot f_{ca} \right) \quad (5.6)$$

En el cálculo del coste de **personal** ($\text{€}_D D$) se considerará el número de conductores necesarios para operar la línea a lo largo del día y se estima que diariamente son dos por autobús.

El coste unitario diario de personal (€_D) se estimará con un salario de 10€/hora y una jornada de 8 horas.

$$\text{€}_D D = (\text{Salario} \cdot \text{horas jornada}) \cdot 2M \quad (5.7)$$

En el cálculo del coste por las **externalidades** ($\text{€}_{GHG} GHG$) se considerará que las emisiones de contaminantes (gases de efecto invernadero) tienen un coste social que, por ejemplo, valora económicamente el impacto en los rendimientos agrícolas y daños a la salud humana relacionados con el cambio climático.

El coste unitario diario por las externalidades (€_{GHG}) tendrá que valorar más allá del precio de mercado marcado por los derechos de emisión de contaminantes, como puede ser el EU ETS (EU Emissions Trading System) (European Commission).

Este valor de mercado empezó en 15€ por tonelada; de entrada ya era bajo, pero el exceso de oferta de derechos de emisión hizo que bajara drásticamente hasta perder su utilidad como mitigador de la contaminación. Como respuesta, algunas administraciones, por ejemplo la estadounidense, han estudiado cuál es el coste social por tonelada de CO₂ emitida real (The Cost of Carbon Project). Además, existen referencias científicas más actualizadas que indican que los valores utilizados con anterioridad son muy inferiores a los adecuados. (C. Moore & B. Diaz, 2015)

$$\text{€}_{GHG}GHG = \sum_i \text{coste social}_i \cdot \text{emisiones}_i \quad (5.8)$$

Los valores utilizados en el cálculo y, en algunos casos, la metodología para obtenerlos se expanden en el Anejo 2.

6. Evaluación de los costes

El cálculo que se plantea para estimar los costes del operador recopila algunas de las características de la operativa de los sistemas de recarga que se ha presentado a lo largo de este estudio. Al transformar todas las componentes a un coste diario se busca comparar todas las alternativas para identificar, entre las presentadas, aquellas con mayor beneficio para el operador.

El dato más importante a destacar es que en todos los casos la tecnología de autobuses eléctricos con batería resulta ser más barata que su alternativa con motor de combustión.

Por una parte, los sistemas con baterías tienen el sobrecoste de la infraestructura, pero resulta un porcentaje pequeño en comparación al global. La componente principal que encarece estos sistemas es el coste de la flota. Actualmente los costes de los autobuses eléctricos y de las baterías son muy elevados. Esto se debe a que son una innovación; se podría decir que el coste es por una tecnología más compleja, pero se debe tener en cuenta que estos precios bajarán en la medida que se desarrolle y surjan más competidores en el mercado.

Los sistemas basados en autobuses con motores de combustión interna salen aventajados en estos dos campos, ya que no requieren infraestructura *on-street* y son relativamente baratos. Su encarecimiento se debe al consumo de carburantes fósiles; directamente porqué supone un mayor gasto e indirectamente por las externalidades que causa. Para valorar correctamente su impacto se debe analizar el coste social de esta opción, midiendo el impacto que tiene en el medioambiente y en los ciudadanos a los que da servicio. En los BEB no se contemplan externalidades ya que no emiten contaminación; se despreciarían las emisiones generadas en la producción de la energía eléctrica consumida bajo la hipótesis de que puede ser generada mediante fuentes de energía limpias.

Del análisis de la H6 se desprende que, tal como mostraba el análisis de la operativa, el diseño más eficiente será el H6OXDL BEB, con una única cabecera realizando recarga eléctrica. Sin embargo, el diseño con dos cabeceras H6OLDS BEB tan solo se aleja 394.77 €/día; pudiendo plantearse como una alternativa si así lo desea el operador de la línea.

Del análisis de la H16 se observa que los costes en general se reducen en comparación a la H6; principalmente por un intervalo de paso superior que reduce la flota necesaria para operar. En esta línea se observan dos particularidades: primero, al hacer una distribución asimétrica del tiempo de coordinación se reduce ligeramente el coste diario; segundo, que disponer de una única cabecera no reduce automáticamente los costes...puede ser más cara que otras opciones. Destaca, sin embargo, el caso H16OLDX en el que se minimizan las zonas de carga al aumentar la velocidad comercial y como consecuencia disminuye el coste para el operador.

Análisis de la operativa de sistemas de recarga para autobuses eléctricos

Tabla 14 Costes de operador para la línea H6 de Barcelona según el diseño y la tecnología utilizada.

			H6OLDS		H6OLDL			H6OXDA		H6OXDL	
			BEB	MB	BEB	BEB 20/80	MB	BEB	MB	BEB	MB
Operativa											
Intervalo de paso	H	min	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Horas de servicio		h	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Tiempo de ciclo de la línea	C_t	h	1.91	1.9	1.92	1.92	1.91	1.82	1.82	1.82	1.82
Número de autobuses	M	veh	23	23	24	24	23	22	22	22	22
Longitud O-D		km	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95
Longitud D-O		km	9.74	9.74	9.74	9.74	9.74	9.74	9.74	9.74	9.74
Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)	L_r	km	19.69	19.69	19.69	19.69	19.69	19.69	19.69	19.69	19.69
Número de zonas de carga (origen)	N	zonas	2	2	3	2	2	0	0	0	0
Número de zonas de carga (destino)	N	zonas	2	2	3	3	2	3	3	3	3
Número de zonas de carga (totales)	N	zonas	4	4	6	5	4	3	3	3	3
Costes											
Costes de infraestructura	$N \cdot \epsilon_N$	€/día	18.56	0.00	27.85	23.21	0.00	13.92	0.00	13.92	0.00
Costes de la flota	$M \cdot \epsilon_M$	€/día	5168.83	1674.05	5393.56	5393.56	1674.05	4944.10	1601.27	4944.10	1601.27
Coste por uso del suelo	$A \cdot \epsilon_A$	€/día	33.86	33.86	51.48	42.90	34.32	53.61	53.61	25.74	25.74
Coste por consumo	$C \cdot \epsilon_C$	€/día	719.22	2152.41	746.58	746.58	2141.14	721.95	2149.32	721.95	2149.32
Coste por personal	$D \cdot \epsilon_D$	€/día	3680.00	3680.00	3840.00	3840.00	3680.00	3520.00	3520.00	3520.00	3520.00
Coste por externalidades	$GHG \cdot \epsilon_{GHG}$	€/día	0.00	5397.05	0.00	0.00	5397.05	0.00	5162.40	0.00	5162.40
COSTE TOTAL	C_O	€/día	9620.48	12937.37	10059.47	10046.25	12926.56	9253.58	12486.59	9225.71	12458.72

Análisis de la operativa de sistemas de recarga para autobuses eléctricos

Tabla 15 Costes de operador para la línea H16 de Barcelona según el diseño y la tecnología utilizada.

			H16ODTL			H16OLDS			H16OLDL			H16OLDX		
			BEB	BEB	MB	BEB	BEB	MB	BEB	BEB	MB	BEB	BEB	MB
Operativa			100/0			100/0			100/0			vc=11 km/h		
<i>Intervalo de paso</i>	H	min	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>Horas de servicio</i>		h	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
<i>Tiempo de ciclo de la línea</i>	C_t	h	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47	2.46	2.47	2.47	2.47	2.41	2.39	2.41
<i>Número de autobuses</i>	M	veh	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	18	19
<i>Longitud O-D</i>		km	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21	12.21
<i>Longitud D-O</i>		km	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99
<i>Longitud de la ruta (en los 2 sentidos)</i>	L_r	km	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2
<i>Número de zonas de carga (origen)</i>	N	zonas	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3
<i>Número de zonas de carga (destino)</i>	N	zonas	2	1	2	2	1	2	2	1	2	0	0	0
<i>Número de zonas de carga (totales)</i>	N	zonas	4	3	4	4	3	4	4	3	4	3	2	3
Costes														
<i>Costes de infraestructura</i>	$N \cdot \epsilon_N$	€/día	18.56	13.92	0.00	18.56	13.92	0.00	18.56	13.92	0.00	13.92	9.28	0.00
<i>Costes de la flota</i>	$M \cdot \epsilon_M$	€/día	4269.90	4269.90	1382.91	4269.90	4269.90	1382.91	4269.90	4269.90	1382.91	4269.90	4045.17	1382.91
<i>Coste por uso del suelo</i>	$A \cdot \epsilon_A$	€/día	47.54	38.96	47.54	33.86	25.51	33.86	34.32	25.74	34.32	25.74	17.16	25.74
<i>Coste por consumo</i>	$C \cdot \epsilon_C$	€/día	604.51	604.51	1905.17	604.51	604.51	1912.91	604.51	604.51	1905.17	619.57	591.87	1952.60
<i>Coste por personal</i>	$D \cdot \epsilon_D$	€/día	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	3040.00	2880.00	3040.00
<i>Coste por externalidades</i>	$\text{GHG} \cdot \epsilon_{\text{GHG}}$	€/día	0.00	0.00	4458.43	0.00	0.00	4458.43	0.00	0.00	4458.43	0.00	0.00	4458.43
COSTE TOTAL	C_o	€/día	7980.51	7967.29	10834.05	7966.83	7953.84	10828.12	7967.29	7954.07	10820.83	7969.14	7543.49	10859.68

7. Conclusiones

Este trabajo plantea el análisis de la operativa de sistemas de recarga para autobuses eléctricos a partir de la teoría clásica desarrollada para el dimensionamiento de redes tradicionales con vehículos con motor de combustión. A su vez, tiene en cuenta las últimas tendencias europeas para la medición del estado de las baterías, los procesos de recarga y su integración en la ciudad. Con ello se busca presentar a los vehículos eléctricos como una evolución natural de la red de autobús y no como un elemento disruptivo.

De los resultados del modelo se concluye que el tiempo de recarga eléctrica, pese a ser una tecnología aún en vías de desarrollo, no conlleva cambios en el dimensionamiento de las líneas ni en su organización. De hecho, se ha observado que tiene mayor importancia la irregularidad en las llegadas de los autobuses; esto significa que mejorar la circulación durante el recorrido seguirá siendo una prioridad para aumentar el nivel de servicio de la red.

Ahondando en el problema de la irregularidad en las llegadas, es importante destacar el efecto que tienen en la recarga eléctrica. Si un autobús llegara retrasado y el siguiente en ocupar su zona de carga fuera puntual, podría producirse un serio problema en la operativa de la línea. Una opción sería generar una cola de espera, lo que afectaría aún más a la regularidad; la alternativa sería realizar una recarga insuficiente de la batería y salir de la parada con el riesgo de quedarse sin carga durante el trayecto. Una virtud del modelo presentado es que este efecto se mitiga con la incorporación del intervalo de margen de operación (h_{om}), dando margen suficiente para recargar a casi todos los vehículos que llegan con retraso.

En los estudios realizados hasta el momento, una de las mayores preocupaciones era la relación entre el tiempo de descanso de los conductores y el tiempo invertido en hacer la recarga eléctrica. La operación de recarga se ha calculado en base a los últimos datos disponibles, que indican un consumo eléctrico menor de lo esperado; en estas condiciones ambos tiempos son muy similares y el tiempo de ciclo apenas se ve alterado.

De hecho, se concluye que la solución más eficiente pasa por la concentración de las operaciones de recarga en una única cabecera. Incluso se ha llegado a identificar un caso en el que el tiempo de descanso de los conductores es superior a la recarga eléctrica, es decir, el modelo eléctrico se comporta exactamente igual que un autobús convencional.

Por otra parte, el análisis muestra que si se introducen tiempos fijos en las paradas, como puede ser el tiempo de recarga, la eficiencia de las zonas de carga tiene menos influencia en la capacidad de las paradas. Esto implica que su diseño tiene menor importancia y puede responder a otras necesidades.

Gracias a esta adaptabilidad, se abre un abanico de posibilidades para hacer del autobús un impulsor del desarrollo urbanístico. Las nuevas cabeceras cambian el perfil de las calles instalando las estaciones de recarga; estas actuaciones pueden tener un mayor alcance y ayudar a re-urbanizar entornos deteriorados, como puede ser la plaza del Nou. De cara a

estudios posteriores, se debería considerar la posibilidad de hacer de las cabeceras con recarga eléctrica zonas de intercambio modal para aumentar la conectividad de todo el sistema.

De ahora en adelante las cabeceras de recarga eléctrica son parte de la infraestructura del autobús y constituyen un elemento fijo que refuerza la siguiente idea: el autobús no es un medio de transporte que circula por calles; forma parte de la ciudad, la define y la conecta.

Finalmente, el análisis económico muestra que las nuevas tecnologías requieren una mayor inversión por parte del operador. Sin embargo, en el momento en el que se tiene en consideración el coste social de las externalidades del transporte, el autobús eléctrico resulta una alternativa mucho más económica. Esta situación requerirá la intervención de la administración pública para que se implante el sistema con mayor beneficio social; ya sea a través de subvenciones de los sistemas eléctricos o gravando las emisiones contaminantes.

Bibliografía

- Altamira, M. (26 de abril de 2017). La nova xarxa de bus de Barcelona s'acabarà de desplegar la tardor del 2018. *Diari ara. Edició digital*.
- Business Insider. (s.f.). *Markets Insider*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de <http://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>
- C. Moore, F., & B. Diaz, D. (2015). Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*(5), 127-131.
- Cestau Cubero, S. (2014). *Sostenibilidad técnica, económica y ambiental de flotas comerciales de vehículos eléctricos*. Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Barcelona: UPCommons.
- Corazza, M. V., Guida, U., Musso, A., & Tozzi, M. (2016). A European vision for more environmentally friendly buses. *Transportation Research Part D*, 48-63.
- Daganzo, C. F. (2010). *Public Transportation Systems: Basic Principles of System Design, Operations Planning and Real-Time Control*. Berkeley: ITS Berkeley.
- Denton, T. (2016). *Institute of the Motor Industry: Electric and Hybrid Vehicles*. Taylor and Francis.
- E. Dickinson, B., H. Swan, D., & R. Lalk, T. (1993). *Comparison of Advanced Battery Technologies for Electric Vehicles*.
- Endesa. (21 de Septiembre de 2016). Recuperado el Julio de 2017, de <https://www.endesa.com/en/press/news/d201609-endesa-launches-the-ultrafast-charging-station-for-electric-buses-in-barcelona-with-tmb.html>
- Estrada, M. (2017). *Training material for University workshops. Zero Emission Urban Bus System*.
- Estrada, M., Ortigosa, J., & Robusté, F. (2010). *Tandem Bus Stop Capacity*. CENIT-UPC, Barcelona.
- Estrada, M., Roca-Riu, M., Badia, H., Robusté, F., & Daganzo, C. F. (2011). Design and Implementation of Efficient Transit Networks: Procedure, Case Study and Validity Test. *Transport Research Part A*, 45, 935-950.
- European Commission. (s.f.). *European Commission*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2017, de https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en
- Eurostat. (09 de 08 de 2017). *European Commission*. Recuperado el 15 de 08 de 2017, de Tables on EU policy. Sustainable transport, Transport impacts: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=tsdtr410&language=en&toolbox=data>

- Hoffman, G. A. (1972). Electric bus designs for urban transportation. *Transport Research*, 6, 49-58.
- International Sustainable Solutions. (2015). *International Sustainability Institute*. Recuperado el Abril de 2017
- Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C*, 38, 1-15.
- Mercadal, A., & Robusté, F. (2012). *Feasibility of vehicle continuous charging in highways*. Transportation Research Board Annual Meeting. "Proceedings of the 91st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.
- Mohamed, M., Farag, H., El-Taweel, N., & Ferguson, M. (Enero de 2017). Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis. *Electric Power Systems Research*, 142, 163-175.
- Pace Suburban Bus. (2013). *Transit Supportive Guidelines for the Chicagoland Region*. Arlington Heights (State of Illinois).
- Red Eléctrica de España. (s.f.). *Sistema de información del operador del sistema*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2017, de <https://www.esios.ree.es/es>
- Riverside Transit Agency. (2015). *Bus Stop Design Guidelines*. Riverside (California).
- Solaris Bus & Coach*. (Julio de 2017). Obtenido de www.solarisbus.com
- The Cost of Carbon Project. (s.f.). *The cost of carbon pollution*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2017, de <http://costofcarbon.org/faq>
- TMB. (s.f.). *TMB Maps*. Recuperado el 25 de Agosto de 2017, de <https://maps.tmb.cat/es/bus>
- TMB. Oficina Tècnica de Trànsit. (2008). *Disseny i definició de les parades*. Barcelona.
- Transit Cooperative Research Program. (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (2a ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Vuchic, V. R. (1999). *Transportation for livable cities*. Center for Urban Policy Research.
- Vuchic, V. R. (2005). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. Filadelfia, University of Pennsylvania: John Wiley & Sons.
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit: Systems and Technology*. John Wiley & Sons.
- Wright Bus International. (2014). Recuperado el 20 de Junio de 2017, de <http://www.wrightbusinternational.com/>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (15 de Mayo de 2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.

- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2013). Chapter 2: Electric Vehicle Battery Technologies. En J. P. Rodrigo Garcia-Valle, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (págs. 15-56). New York: Springer Science+Business Media.
- Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S., y otros. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603-613.

Índice de figuras

Figura 1 Coste total de los viajes urbanos por diferentes modos y situaciones. <i>Los signos negativos se utilizan para distinguir los costes directos de los indirectos; no implican valores negativos.</i> Fuente: (Vuchic, 1999).....	1
Figura 2 Evolución de los sistemas de transporte con crecimiento del área urbana. Fuente: (Vuchic, 2007).....	2
Figura 3 Impacto de la capacidad de las calles y el tamaño de los vehículos en el coste unitario. Fuente: (Vuchic, 2007).	3
Figura 4 Espacio ocupado por 200 pasajeros en diferentes modos de transporte. Fuente: (International Sustainable Solutions, 2015).....	5
Figura 5 Beneficios del BRT frente al LRT. Arriba, con la tecnología del s.XX. Abajo, con las mejoras del s.XXI. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 6 Emisiones de gases de efecto invernadero por el transporte (carretera, ferrocarril, navegación interior y aviación nacional) en Europa 1990-2015. Fuente: (Eurostat, 2017).....	11
Figura 7 Autobús con catenaria. Fuente: Primicia Diario. 28 de Noviembre de 2013.	12
Figura 8 Desarrollo histórico de las baterías para vehículos eléctricos. Fuente: (Yong et al., 2015)	13
Figura 9 Esquema de funcionamiento de la tecnología de carga por inducción. Fuente: (Wright Bus International, 2014).....	15
Figura 10 Típico perfil de carga de una celda Li-ion Fuente: (Young et al., 2013)	16
Figura 11 Comparativa del par motor entre un motor de combustión y un vehículo eléctrico. Fuente: (Denton, 2016).....	19
Figura 12 Diagrama de la evolución del SOC en función de la distancia. Fuente: (Estrada, 2017)	21
Figura 13 Distribución normal estándar. En rojo, la probabilidad de que el tiempo de parada supere una determinada cifra para una determinada tasa de fracaso Fuente: <i>Elaboración propia</i>	25
Figura 14 Posición de las paradas de autobús respecto a los semáforos. Fuente: <i>Transit Capacity & Quality of Service Manual, 3rd Edition</i>	26
Figura 15 Diagrama del tiempo de operación para una parada intermedia. Fuente: <i>Elaboración propia</i>	27
Figura 16 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera. Fuente: <i>Elaboración propia</i>	28
Figura 17 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera con recarga eléctrica. Fuente: <i>Elaboración propia</i>	33
Figura 18 Diagrama del tiempo de operación para una parada de cabecera con recarga eléctrica respetando la operación de línea. Fuente: <i>Elaboración propia</i>	37
Figura 19 Categorías principales de diseños de las paradas. Fuente: (Transit Cooperative Research Program, 2003).....	38
Figura 20 Diagrama de la distribución de tiempos de las operaciones en un intervalo NH. Fuente: <i>Elaboración propia</i>	42
Figura 21 Planta de paradas <i>Drive-through off-line</i> . (a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Vail (Colorado, EEUU) Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) <i>Google Maps</i>	44

Figura 22 Distribución de autobuses <i>Drive-through</i> . Fuente: Google+; Autor: Anthony Raynor; Fecha: Mayo 2017	45
Figura 23 Planta de paradas <i>Angle</i> . (a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en el aeropuerto de Newark (New Jersey, EEUU) Fuente: (Transit Cooperative Research Program, 2003)	46
Figura 24 Planta de paradas <i>Sawtooth</i> . (a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Corona (California, EEUU) Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) <i>Google Maps</i>	47
Figura 25 Distribución de autobuses <i>Sawtooth</i> . Fuente: (Riverside Transit Agency, 2015)	48
Figura 26 Planta de paradas <i>Linear</i> . (a) Esquema teórico (b) Aplicación práctica en Nueva York (California, EEUU) Fuente: (a) (Pace Suburban Bus, 2013) (b) <i>Google Maps</i>	49
Figura 27 Distribución de autobuses <i>Linear</i> . Fuente: Google+; Autor: Sebastian Sinisterra; Fecha: Abril 2016.....	50
Figura 28 Nueva Red de Bus (NRB/NXB) Fuente: (Altamira, 2017).....	54
Figura 29 Recorrido de la H6 Fuente: (TMB).....	55
Figura 30 Situación de la parada de cabecera Zona Universitaria. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 31 Situación de la parada de cabecera Fabra i Puig Fuente: Elaboración propia	57
Figura 32 Recorrido de la H16. Fuente: (TMB).....	59
Figura 33 Situación de la parada de cabecera Zona Franca. Fuente: Elaboración propia	60
Figura 34 Situación de la parada de cabecera Fòrum. Fuente: Elaboración propia	61

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de los modos de transporte público urbano por categoría ROW y tecnología. (Vuchic, 2007).....	6
Tabla 2 Comparativa de baterías para vehículos eléctricos. (Yong et al., 2015)	14
Tabla 3 Datos principales de la ruta H6. (Estrada, 2017)	55
Tabla 4 Datos principales de la ruta H16. (Estrada, 2017)	59
Tabla 5 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Sawtooth	63
Tabla 6 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Linear.....	64
Tabla 7 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: X – Destino: Angle	65
Tabla 8 Detalles de la operativa de línea H6 de la NXB de Barcelona. Origen: X – Destino: Linear.....	66
Tabla 9 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Drive-Through – Destino: Linear	67
Tabla 10 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Sawtooth.....	68
Tabla 11 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: Linear	69
Tabla 12 Detalles de la operativa de línea H16 de la NXB de Barcelona. Origen: Linear – Destino: X	70
Tabla 13 Estado del SOC en las cabeceras.	71
Tabla 14 Costes de operador para la línea H6 de Barcelona según el diseño y la tecnología utilizada.	77
Tabla 15 Costes de operador para la línea H16 de Barcelona según el diseño y la tecnología utilizada.	78

Anejos

Anejo 1: Diseños de parada

Anejo 2: Variables de cálculo

Anejo 3: Reportaje fotográfico