

Resumen

El presente proyecto comprueba si la realización de un control del tráfico en tiempo real mediante la modificación de los tiempos de ciclo de los semáforos, puede resultar beneficioso para el caso particular de la plaza *Francesc Macià* de Barcelona.

El área geográfica a estudio está formada por seis accesos y siete salidas, y para conseguir llevar a cabo el proyecto se utilizan datos empíricos de flujos de tráfico, así como de ciclos semafóricos. Los datos utilizados son proporcionados por el Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona.

Mediante la herramienta de simulación, se determinan cuales son los valores óptimos para una correcta distribución de los ciclos semafóricos ante las distintas situaciones de tráfico. La variable escogida para la búsqueda de óptimos es la de demora media de los vehículos en la plaza durante una hora.

Un primer análisis consiste en obtener los tiempos de demora para las denominadas horas valle y horas punta. Una vez obtenidos estos datos, se busca una distribución óptima cada vez que se encuentre ante una situación con las mismas características.

Para contemplar el mayor número de posibilidades se realiza un segundo análisis, con la aplicación del mismo estudio para situaciones de tráfico distintas a las especificadas anteriormente.

La implementación del proyecto en el entorno real se realizaría con la utilización de cámaras IP para el control de flujos de tráfico, así como de software para la interpretación y toma de decisiones.

Índice

RESUMEN	1
ÍNDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Objetivos	5
1.2. Metodología	6
1.3. Alcance	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Los sistemas ITS	9
2.2. El parque automovilístico en España	10
2.3. El parque automovilístico en Barcelona	11
2.4. Flujos	12
2.5. Regulación semafórica	13
2.6. Conteo de vehículos	19
3. INTERSECCIÓN DE REFERENCIA: PZA. FRANCESC MACIÀ	21
4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA	27
4.1. Simulación del sistema estudiado	27
4.2. Elección del programa utilizado	28
4.3. Explicación general del programa Witness	29
4.3.1. Elementos	29
4.3.2. Acciones y aleatoriedad	30
5. MODELO DE SIMULACIÓN	33
5.1. Hipótesis del modelo	33
5.1.1. Carril bus	33
5.1.2. Número de carriles para cada acceso	34
5.1.3. Velocidades en los carriles	35
5.1.4. Cálculo de destinos	36
5.1.5. Tiempo de ciclo de los semáforos	38
5.1.6. Entrada de vehículos al sistema	38
5.1.7. Restricción de movimientos	39
5.1.8. Otras consideraciones	40

5.2.	Análisis del modelo actual	41
5.2.1.	HORA PUNTA.....	42
5.2.2.	HORAS VALLE	46
5.3.	Análisis del modelo implementando una regulación semafórica en tiempo real	49
5.3.1.	Conteo.....	49
5.3.2.	Optimización de horas punta.....	53
5.3.3.	Optimización de horas valle	57
5.3.4.	Análisis de resultados	60
5.4.	Otros casos	62
5.4.1.	CASO 1: Doble flujo de tráfico por Pau Casals.....	63
5.4.2.	CASO 2: Corte en Av. Diagonal y aumento de tráfico en Pau Casals.....	66
5.4.3.	CASO 3: Aumento ligero de tráfico en Pau Casals.....	69
5.4.4.	CASO 4: Aumento del 50% de flujo en Pau Casals.....	72
5.4.5.	CASO 5: Aumento de tráfico en hora punta por Av. Diagonal	75
5.5.	Algoritmo definitivo	79
6.	CONCLUSIONES	81
7.	ESTUDIO ECONÓMICO	83
8.	ESTUDIO AMBIENTAL	85
9.	AGRADECIMIENTOS	87
10.	BIBLIOGRAFÍA	89

1. Introducción

1.1. Objetivos

El principal objetivo que persigue el presente proyecto es conseguir, mediante la simulación, un proceso de optimización en tiempo real de los ciclos semafóricos involucrados en la plaza Francesc Macià de Barcelona.

Fruto de este objetivo se podrán obtener una serie de beneficios u objetivos secundarios, los cuales se exponen a continuación:

- Minimizar tiempos de demora
 - ✓ Se modificarán los tiempos de verde de los semáforos en tiempo real.
 - ✓ Los accesos con mayores demoras totales tendrán prioridad a la hora de tomar decisiones sobre los tiempos de verde.
 - ✓ Evitar que los tiempos de demora no se disparen con las medidas adoptadas.

- Minimizar emisiones contaminantes
 - ✓ Al minimizar los tiempos de demora se conseguirá una reducción de las emisiones contaminantes.
 - ✓ Al pasar más cantidad de vehículos en un mismo ciclo de verde, se reduce la cantidad de paradas y arrancadas (que producen una mayor contaminación).

- Mejorar la fluidez
 - ✓ Al reducir los tiempos de demora, se busca una mayor agilidad en el tráfico urbano, que permite evitar congestiones en horas punta.

- Optimizar el coste
 - ✓ Se busca poder aplicar un sistema de control automático del tráfico en tiempo real optimizando al máximo los recursos económicos.
 - ✓ Aplicar el sistema con las herramientas que ofrezcan una menor interrupción del tráfico y una relación de precio óptima.

1.2. Metodología

Para conseguir los objetivos marcados en el apartado anterior, el proyecto debe seguir la siguiente metodología.

Estudio semafórico del área geográfica a estudio

Elección del software para simular en un entorno informático las condiciones de tráfico actuales

Propuesta de posibles mejoras

Aplicación de las mejoras en el software de simulación

Realización de simulaciones

Extracción de resultados

Obtención de conclusiones

Realización de estudio de viabilidad económica y de impacto ambiental

1.3. Alcance

El presente proyecto pretende realizar un estudio de la situación actual en la plaza Francesc Macià y estudiar la posibilidad de aplicar un sistema de semaforización adaptable en tiempo real y de manera automática en función de las condiciones de tráfico que disponga la plaza en cada momento. Se pretende estudiar el sistema en base a la situación actual más crítica y, una vez propuestas las mejoras, comprobar su funcionamiento en diferentes tipologías de tráfico.

No entra en el alcance del proyecto la aplicación del sistema en ensayos reales.

2. Estado del arte

2.1. Los sistemas ITS

Los sistemas de regulación inteligente del transporte (ITS) se encuentran actualmente en uno de los puntos más altos de los últimos años. La necesidad de reducir contaminación y de descongestionar el incremento de tráfico ha llevado a las distintas áreas de movilidad a priorizar la propuesta de uso del transporte público en detrimento del transporte privado. Sin embargo, es deber de los ingenieros desarrollar sistemas que permitan soluciones óptimas en el entorno real que existe y aplicando una tecnología lo más sostenible posible.

Los semáforos en Barcelona tienen 4 programas semafóricos distintos en función de la hora del día en que debe actuar el semáforo. Este hecho no tiene en cuenta las posibles variaciones puntuales de tráfico. Para el caso de estudio se presentan algunas de las posibles soluciones a la situación actual:

PROBLEMA	POSIBLE SOLUCIÓN
Número de vehículos variable	El sistema automático se basa en el número de vehículos en tiempo real, tomando las decisiones que mejor se ajusten al tráfico en ese momento
Necesidad de personal para la toma de decisiones en tiempo real	El sistema propuesto será capaz de tomar decisiones por si mismo
Cortes de tráfico para la instalación de espiras para el conteo de vehículos	Para el conteo de vehículos se pueden utilizar cámaras IP, igual de fiables y cuya instalación no implicaría cortes en el tráfico.

Figura 2.1. Tabla de ventajas que ofrece el sistema automático

2.2. El parque automovilístico en España

En el año 2010 el parque automovilístico en España alcanzaba la cifra de 31.086.035 vehículos, a contabilizar entre camiones, furgonetas, autobuses, turismos, motocicletas, tractores industriales, remolques y otros vehículos.

Como se puede observar en el gráfico 2.2, la evolución a lo largo de los últimos años ha estado marcada por cifras que se han mantenido prácticamente constantes alrededor de los 30 millones de vehículos:

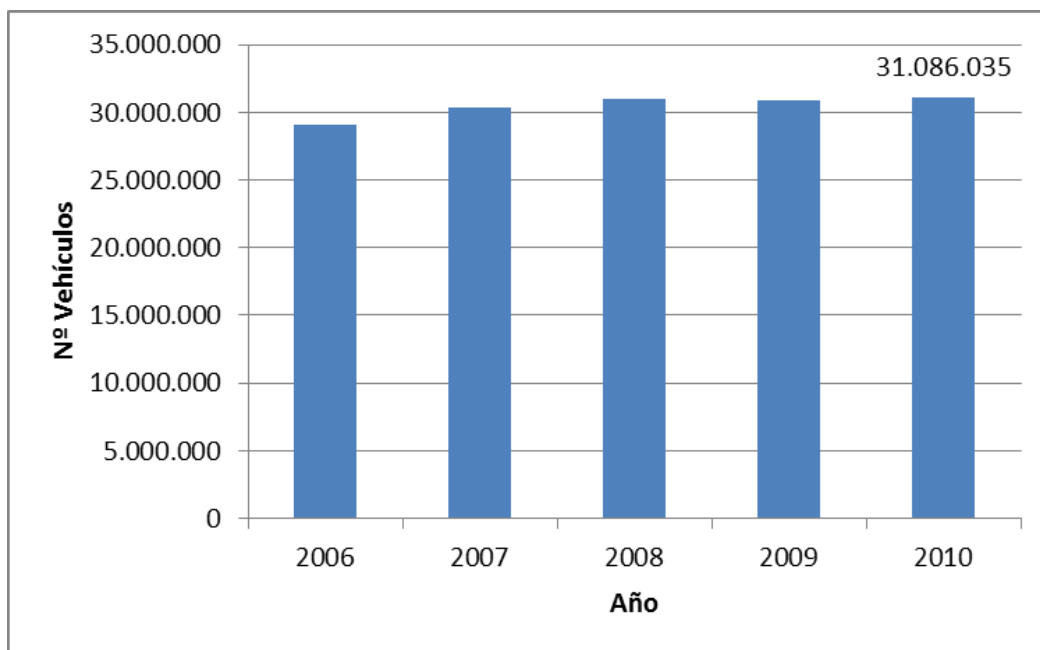


Figura 2.2. Parque automovilístico español. 2006-2010

Si se focaliza en la Comunidad Autónoma de Cataluña, se observa que a lo largo de los años la tendencia ha sido claramente creciente hasta el año 2008 (teniendo en cuenta que a partir del año 2001 se incluyeron los ciclomotores en el recuento). Sin embargo en los últimos años dicha tendencia ha variado hasta llegar a estancarse alrededor de 5.4 millones de vehículos.

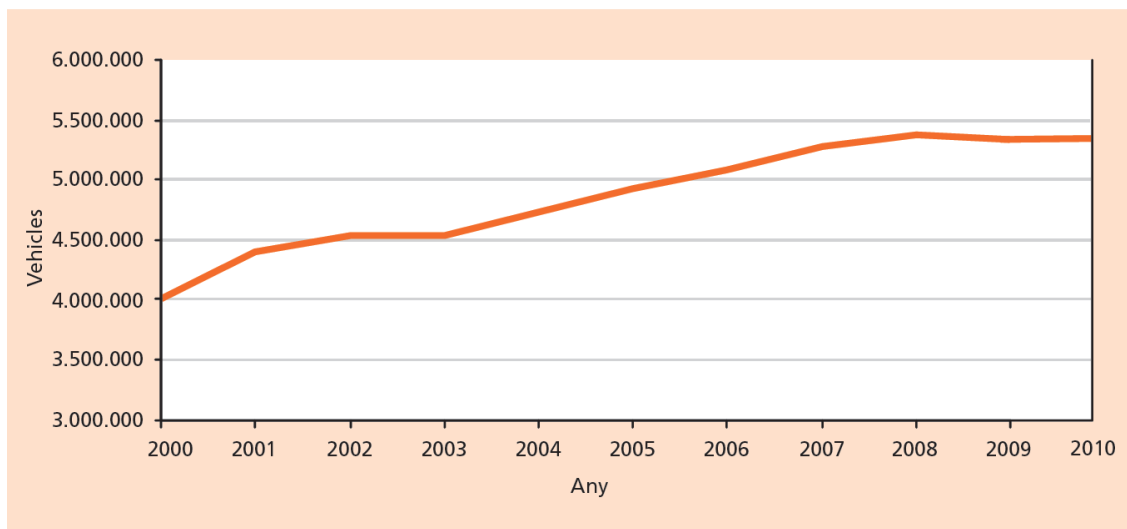


Figura 2.3. Evolución del parque de vehículos de Cataluña. 2000-2010

2.3. El parque automovilístico en Barcelona

Para ajustar las cifras al marco del presente proyecto, se deben analizar los datos del parque automovilístico en el área metropolitana de Barcelona.

Al igual que sucede con España y Cataluña, Barcelona posee un parque automovilístico bastante estabilizado desde 2008, con 976.345 vehículos en el año 2011. Sin embargo, se trata de una estabilidad descendiente ya que ha habido un descenso de turismos mayor que el aumento de motocicletas y ciclomotores.

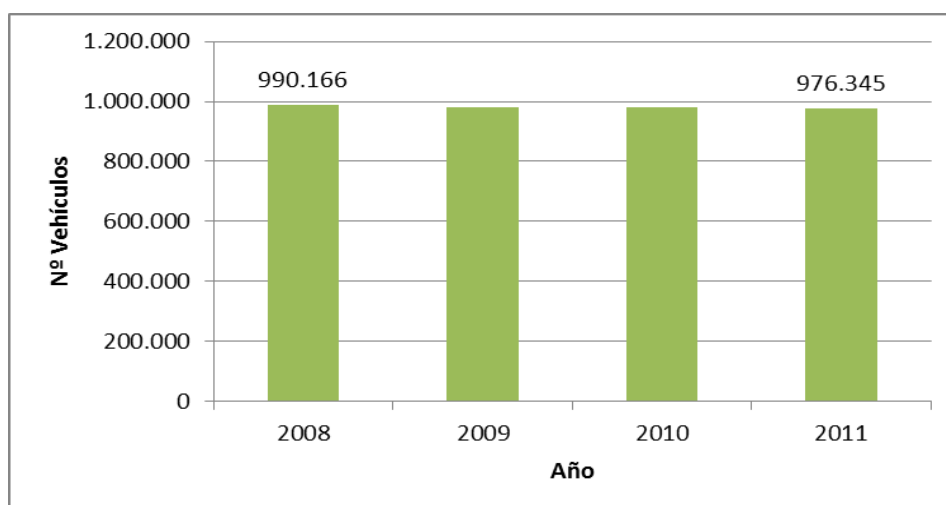


Figura 2.4. Evolución del parque automovilístico en Barcelona. 2008-2011 [Núm. Vehículos]

2.4. Flujos

Antes de comenzar con la modelización de la plaza Francesc Macià resulta necesario tener un buen conocimiento del área que se va a llevar a estudio. Es por ello que el primer paso es tener en cuenta cuales son las condiciones reales sobre las que se va a basar el proyecto.

Para ello, se ha contado con el apoyo del Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona, que ha facilitado datos empíricos tales como mapas, tiempos de ciclo de los semáforos de la plaza o mediciones de flujos para las diferentes horas del día.

A su vez, se ha querido realizar un pequeño estudio de como ha sido la evolución del tráfico metropolitano en Barcelona durante los últimos tiempos. La realidad muestra que el número de vehículos en los accesos a Barcelona ha ido disminuyendo constantemente desde el año 2007. Sin embargo, dicho valor sigue manteniéndose por encima del millón de vehículos diarios.

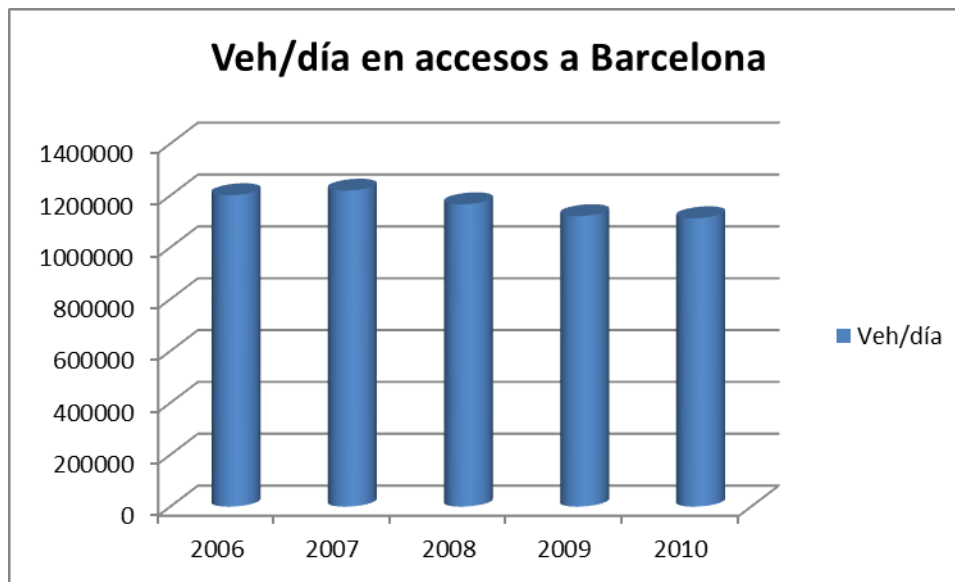


Figura 2.5. Flujo de vehículos que acceden a Barcelona diariamente

Dado que este flujo sigue siendo elevado, y teniendo en cuenta que uno de los accesos a la plaza Francesc Macià es la Avenida Diagonal, se comprende que sea especialmente interesante realizar un sistema capaz de regularse automáticamente en tiempo real. No solo las horas de punta de tráfico habituales pueden ser controladas. En caso de producirse un evento puntual por el cual muchos vehículos necesiten acceder a Barcelona, se debe controlar lo antes posible para que no se ocasionen congestiones de tráfico en la plaza Francesc Macià.

2.5. Regulación semafórica

Una de las preguntas a resolver sobre el área geográfica a estudio, es conocer la razón por la cual la plaza Francesc Macià está semaforizada. Según la ingeniería del tráfico, hay una serie de criterios para la instalación (o no) de semáforos:

- **Accidentalidad:** La regulación semafórica reduce el número y severidad de los accidentes.
- **Intensidades de vehículos:** En caso de elevados flujos de vehículos, es conveniente la regulación semafórica por el incremento de capacidad que proporciona.
- **Intensidades de viandantes:** Si el número es elevado, se justifica la instalación de semáforos.
- **Coordinación:** La imposibilidad de disponer de una buena coordinación semafórica es un factor que contraindica la instalación de semáforos.
- **Complejidad del cruce:** En cruces complejos, la regulación semafórica supone una mejora importante en las posibilidades de gestión de los movimientos.
- **Importancia de la vía:** Las vías principales tienen prioridad frente a las vías secundarias para escoger los puntos donde instalar semáforos.

Parece claro, pues, que es necesaria la existencia de semáforos en la plaza. En este punto se debe realizar un esquema de fases lo más simple posible haciendo coincidir el mayor número de movimientos compatibles. Posteriormente se procedería al cálculo de los tiempos de ciclo tanto para las fases primarias (principales movimientos) como de las fases secundarias (movimientos de transición entre fases primarias).

Este cálculo se realiza conociendo las distancias entre líneas de detención, los tiempos de reacción de los conductores, así como las intensidades de tránsito y saturación.

Para el presente proyecto, no se han calculado los tiempos de las fases semafóricas, sino que el estudio se ha basado en el programa semafórico actual, facilitado por el Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona

En total son 17 semáforos coordinados de manera que los vehículos que acceden a la plaza puedan tomar el mayor número de direcciones al salir de ella pero con un orden que garantice la buena fluidez del tráfico.

Cada semáforo tiene asociado un ciclo, que se puede ver representado en la figura 2.6:

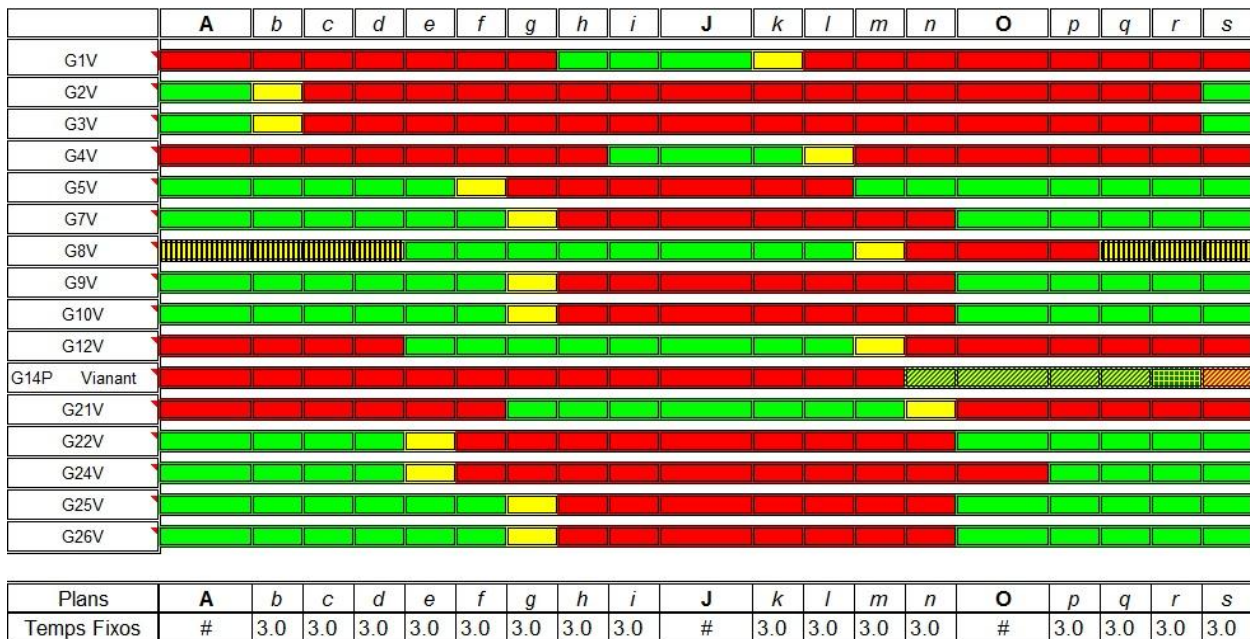


Figura 2.6. Reparto de los tiempos de verde y rojo en cada semáforo [s]

La columna de la izquierda indica el número de semáforo con el siguiente formato: G + nºsemáforo + V (vehículo) o Vianant (Humanos). En el cuadro se puede observar que se hace distinción entre los bloques de tiempo fijos (que duran tres segundos cada uno) y los bloques de tiempo variable (marcados con #). Según el día de la semana y la hora del día, el Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona aplica unos tiempos u otros, separados en 4 programas distintos.

A continuación se muestra la relación entre cada semáforo con su ciclo correspondiente:

VIA	SEMÁFORO	VIA	SEMÁFORO
Entrada Pau Casals	4	Salida Pau Casals	-
Entrada Diagonal Montaña	3	Salida Diagonal Montaña	9
Entrada Lateral Diag. Montaña	2	Salida Lateral Diag. Montaña	-
Entrada Josep Tarradellas	1	Salida Josep Tarradellas	8
Entrada Diagonal Mar	24	Salida Diagonal Mar	25
Entrada Lateral Diag. Mar	22	Salida Lateral Diag. Mar	25
F.Macià Tarr	5	Salida Urgell	7
F.Macià Diag.Norte	12	F.Macià Diag.Sur	21
F.Macià Pau Casals	10		

Tabla 2.1. Correspondencia de cada semáforo con el ciclo semafórico

Al agrupar los ciclos semafóricos en grupos se obtienen las denominadas fases. La fase es el conjunto de movimientos que pueden darse simultáneamente en una intersección semaforizada.

En el caso particular del proyecto se obtienen las siguientes 4 fases:

- ✓ Fase 1: Da comienzo cuando los semáforos de entrada a la plaza desde la Avenida Diagonal en sentido Montaña/Mar se ponen en verde. En esta fase, los vehículos que circulan por la Diagonal en cualquiera de los dos sentidos dispondrán de semáforo en verde para entrar en la plaza y realizar los movimientos representados en la figura.

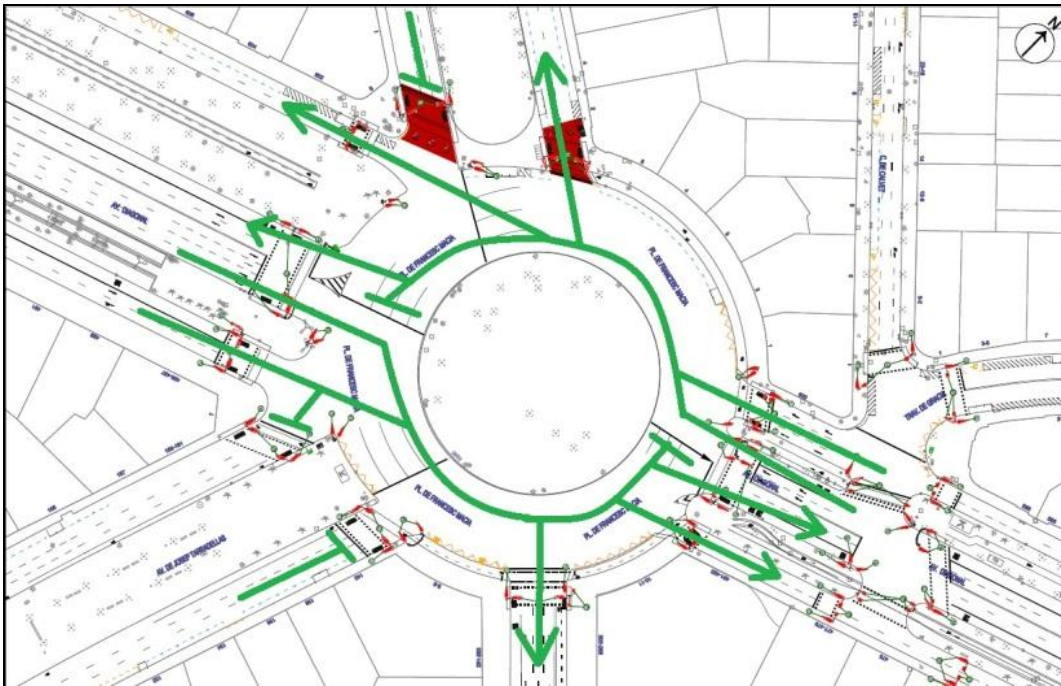


Figura 2.7. Fase 1

- ✓ Fase 2: Esta fase se inicia cuando los semáforos de entrada a la plaza desde Avenida Diagonal en sentido Montaña-Mar se vuelven al color rojo. Se trata de una fase de desalojo de vehículos de la plaza, ya que todas las entradas permanecen en rojo excepto Diagonal en sentido Mar-Montaña (carriles centrales y laterales), que durante unos segundos dispone de verde.

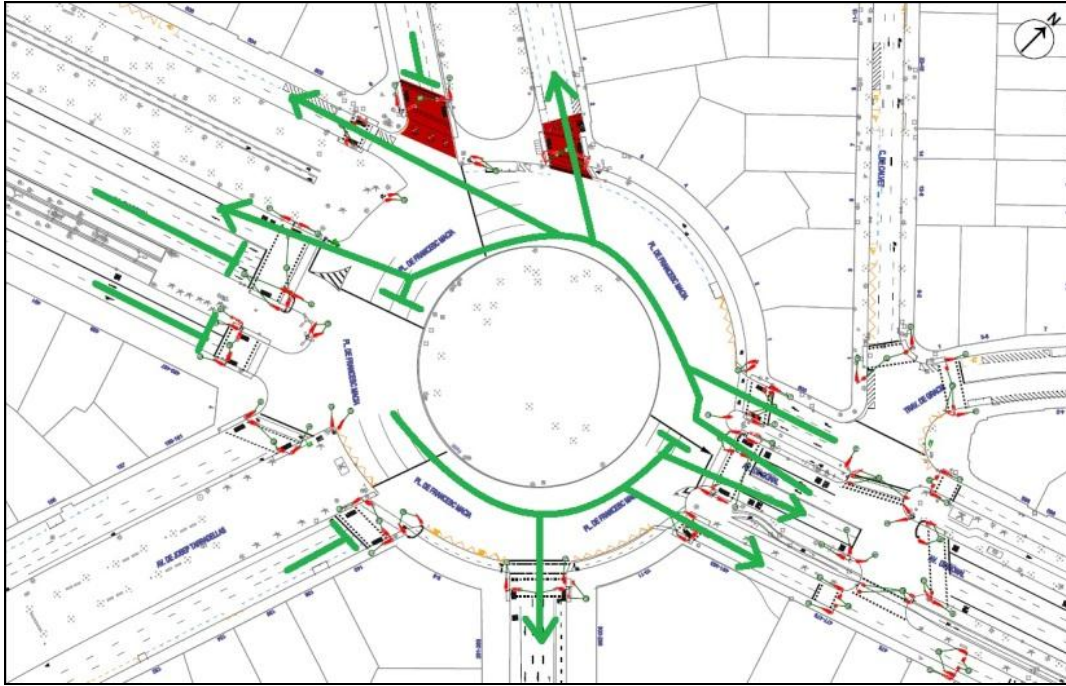


Figura 2.8. Fase 2

- ✓ Fase 3: Esta fase se inicia cuando los semáforos de entrada a la plaza pertenecientes a los accesos de Pau Casals y Josep Tarradellas se ponen en verde. Durante esta fase los accesos por Avenida Diagonal están en rojo, así como la salida por la calle Urgell.

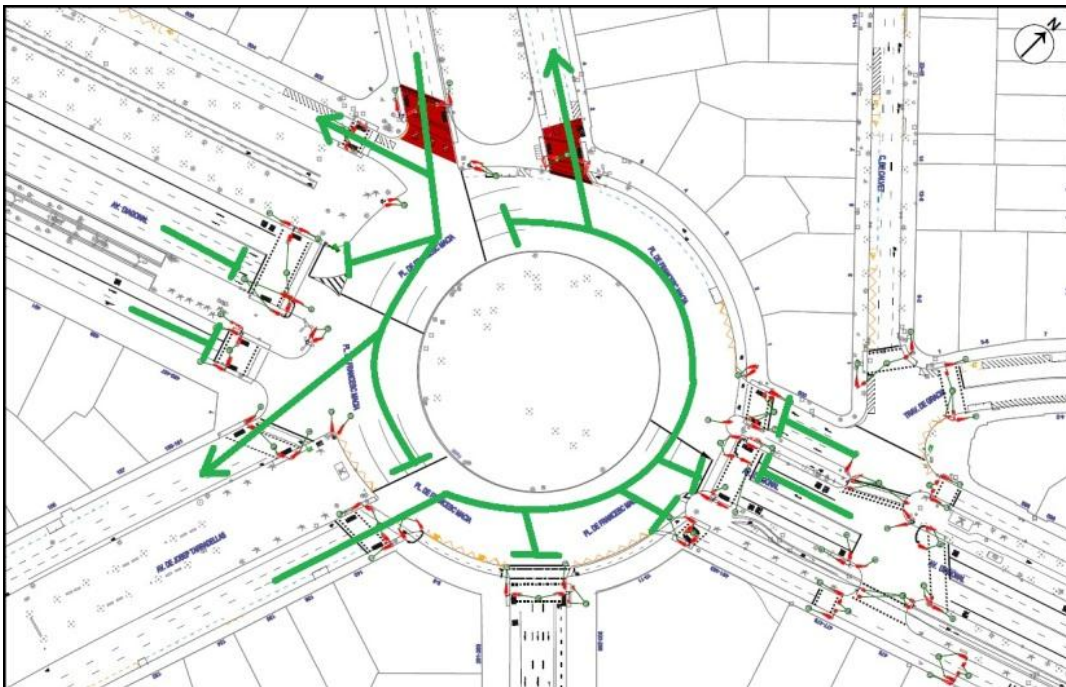


Figura 2.9. Fase 3

2.6. Conteo de vehículos

Para conocer el estado del tráfico en tiempo real es preciso disponer de un sistema de conteo de vehículos. En la actualidad son varios los sistemas de conteo disponibles:

- Espiras magnéticas: se trata de una tecnología precisa, pero únicamente capaz de detectar la presencia de un vehículo. Será necesario un sistema con varias espiras para un conteo múltiple. Este sistema puede resultar caro además de invasivo, ya que requiere la detención del tráfico para su instalación.



Figura 2.11. Sensor por espiras magnéticas

- Sensor por microondas (RTMS): Sensor de bajo coste para intersecciones y calzadas. Se coloca en postes, por lo que no requiere interrumpir el tráfico. Es utilizado sobretodo en carreteras; sin embargo, puede presentar problemas para el conteo de tráfico en intersecciones, donde los vehículos permanecen parados.



Figura 2.12. Sensor por microondas

- Sensor de infrarrojos: resulta una buena opción ya que ofrece un coste reducido, facilidad de instalación y permite detectar vehículos con antelación. Pueden sufrir pérdida de efectividad en entornos reales debido al ruido.

- Sensor de ultrasonidos: Ofrece una sencilla instalación a la vez que un bajo precio. Como inconveniente importante, cabe destacar que no detecta vehículos a larga distancia. No permite detectar los vehículos con la suficiente antelación como para poder tomar decisiones óptimas en tiempo real.



Figura 2.13. Sensor ultrasonidos

- Cámaras IP: Resulta la opción más completa, ya que reúne las condiciones idóneas para el desarrollo del presente proyecto: Instalación sencilla y económica y capacidad para obtener datos necesarios con antelación para poder tomar decisiones en tiempo real. Estos datos se obtienen con el soporte de un software para la procesión de las imágenes obtenidas por las cámaras, obteniendo un conteo de vehículos en tiempo real.

Además, con la cámara IP se obtiene un soporte visual para que desde el centro de control se pueda monitorizar cualquier incidencia de tráfico, o simplemente consultar el estado del mismo.



Figura 2.14. Demostración de funcionamiento de la cámara IP.

3. Intersección de referencia: Pza. Francesc Macià

La plaza Francesc Macià está ubicada en una de las vías más importantes de la ciudad de Barcelona (España). Se trata de la Avenida Diagonal, clave para la entrada y salida de vehículos de la ciudad. En la plaza también convergen otras tres calles: Josep Tarradellas, Comte Urgell y Avenida Pau Casals. En la parte central de la plaza hay una isleta, que sirve para distribuir el tráfico hacia cada una de las posibles salidas que se pueden tomar.

La obra fue diseñada por el arquitecto mallorquín Nicolau Rubió a principios de la década de 1930 bajo el nombre «Proyecto de Urbanización de la Avenida de Alfonso XIII, entre la calle Urgell, desde el Palacio Real hasta el límite del término municipal». A lo largo de los años, la plaza ha sido rebautizada varias veces hasta llegar al nombre actual, que se mantiene desde 1979, en honor al ex presidente de la *Generalitat de Catalunya*, Francesc Macià.



Figura 3.1. Vista Real de la Plaza Francesc Macià

Debido a su ubicación estratégica, la plaza suscita un gran interés desde el punto de vista de la ingeniería del transporte. Tanto en horas valle como, sobretodo, en horas punta es importante que el tráfico no se sobresature en ninguna de las calles de acceso anteriormente descritas. Para ello, el Departamento de Tráfico metropolitano del Ayuntamiento de Barcelona utiliza cuatro programas semafóricos diferentes en función de los distintos factores que puedan afectar al tráfico (hora del día, día de la semana, evento especial...).

Como se puede ver en la figura 3.2, la plaza se sitúa en la zona del interior de la ciudad con más tráfico. Las marcas rojas denotan las vías con mayor intensidad de tráfico, seguidas de las marcas azules. Por la parte de montaña, hacia la plaza Francesc Macià incide una vía marcada en rojo, mientras que por el resto de accesos las vías son de color azul.

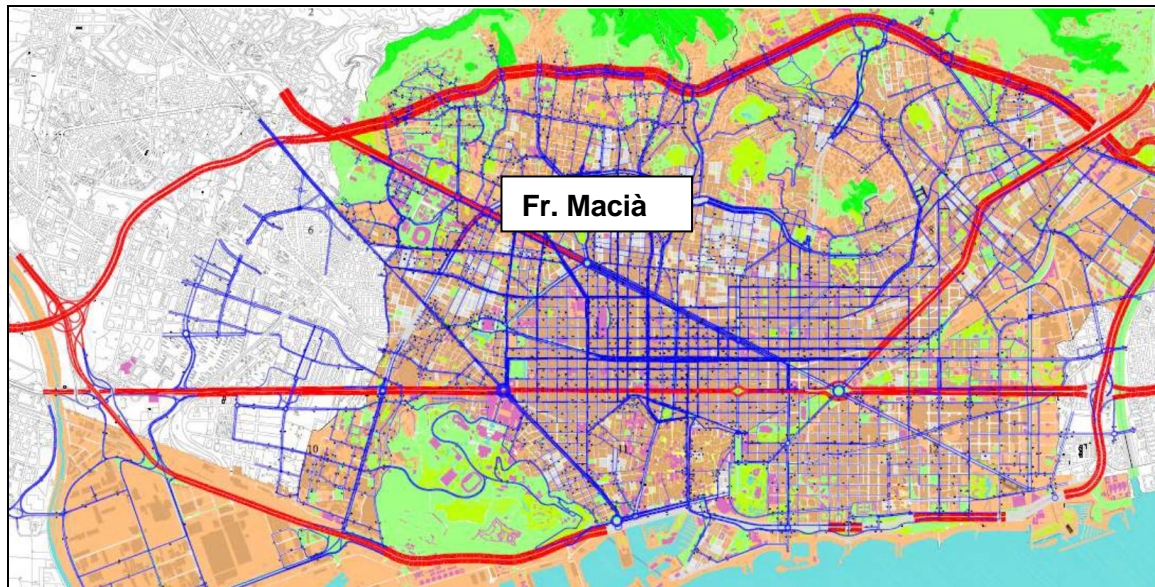


Figura 3.2. Plano de volúmenes de tráfico en las vías de Barcelona

Para poder hacer frente a las diferentes situaciones de tráfico que se producen en esta plaza a lo largo de un día, sería ideal poder desarrollar un sistema que variase los ciclos semafóricos en tiempo real. Es en este punto donde entra en escena un proyecto de regulación inteligente del transporte para la plaza Francesc Macià.

Como se puede observar en la figura 3.3, la plaza está dividida en 6 accesos y 7 salidas, cada uno de ellos con su respectivo semáforo asociado, además de 4 semáforos en el interior de la circunferencia descrita por la rotonda.

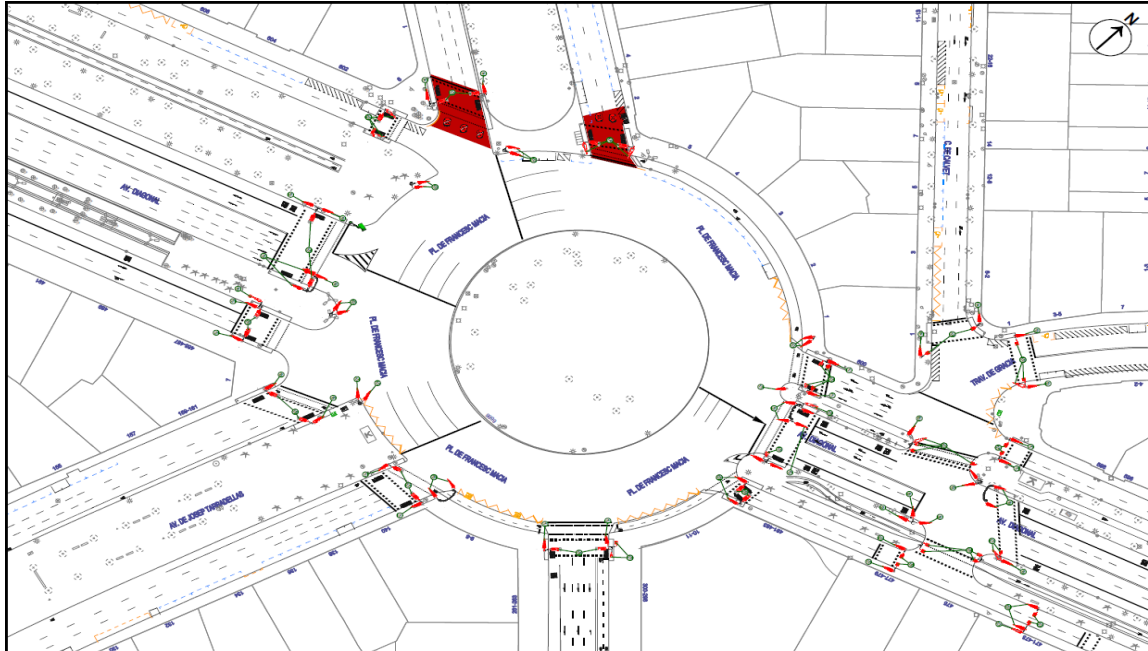


Figura 3.3. Mapa de la plaza Fr. Macià

Para realizar el estudio de la plaza Francesc Macià se ha contemplado la franja horaria más crítica de un día laboral, por lo que se tienen en cuenta unas características de tráfico en hora punta.

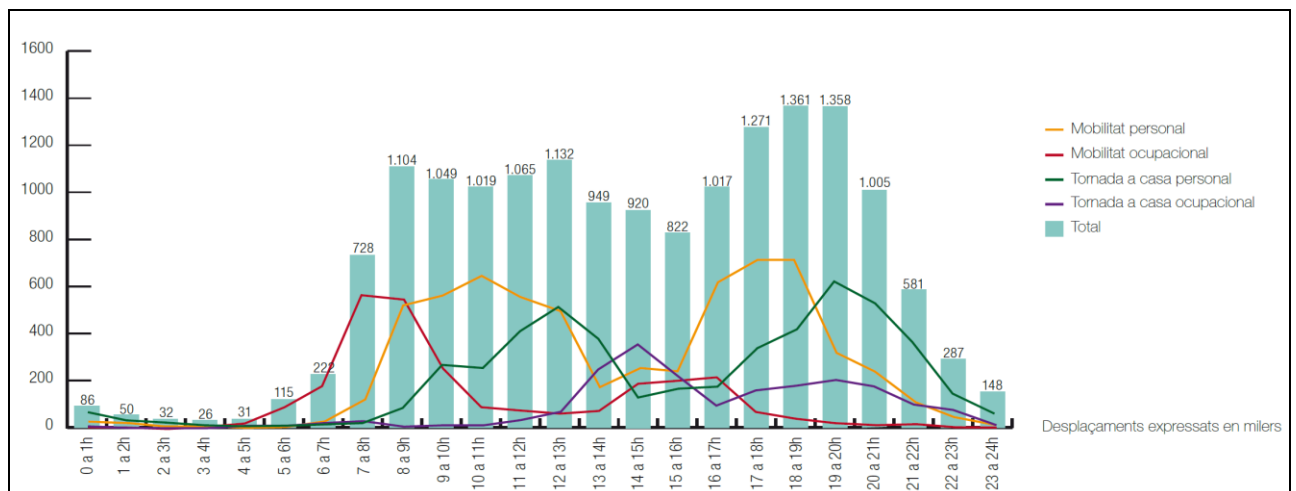


Figura 3.4. Distribución horaria de los desplazamientos en Barcelona

Para conocer cual es el caso más desfavorable, el estudio se basará inicialmente en la hora con mayor afluencia de vehículos a la plaza. Según los datos facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona, en un día normal los flujos de vehículos se distribuyen de la siguiente manera:

ENTRADA	VEHÍCULOS ENTRE 9 Y 14H	En una hora
Entrada Diagonal Montaña	9.647	1.929
Entrada Lateral Diagonal Montaña	6.006	1.201
Entrada Josep Tarradellas	1.435	287
Entrada Lateral Diagonal Mar	7.320	1.464
Entrada Diagonal Mar	6.251	1.250
Entrada Pau Casals	4.083	817

Tabla 3.1. Flujo de entrada entre 9 y 14h [nº vehículos]

ENTRADA	VEHÍCULOS ENTRE 16 Y 19H	En una hora
Entrada Diagonal Montaña	5.995	1.998
Entrada Lateral Diagonal Montaña	3.497	1.166
Entrada Josep Tarradellas	971	324
Entrada Lateral Diagonal Mar	4.991	1.664
Entrada Diagonal Mar	3.534	1.178
Entrada Pau Casals	2.075	692

Tabla 3.2. Flujo de entrada entre 16 y 19h [nº vehículos]

ENTRADA	VEHÍCULOS RESTO DE HORAS	En una hora
Entrada Diagonal Montaña	19.041	1.190
Entrada Lateral Diagonal Montaña	11.568	723
Entrada Josep Tarradellas	2.929	183
Entrada Lateral Diagonal Mar	14.986	937
Entrada Diagonal Mar	11.911	744
Entrada Pau Casals	7.496	469

Tabla 3.3. Flujo de entrada el Resto de Horas [nº vehículos]

Si se suman los totales de vehículos por hora que pasan por el área a estudio en cada una de las tres franjas que se dispone, se demuestra que la franja de mayor tránsito por hora es la comprendida entre las 16 y las 19h.

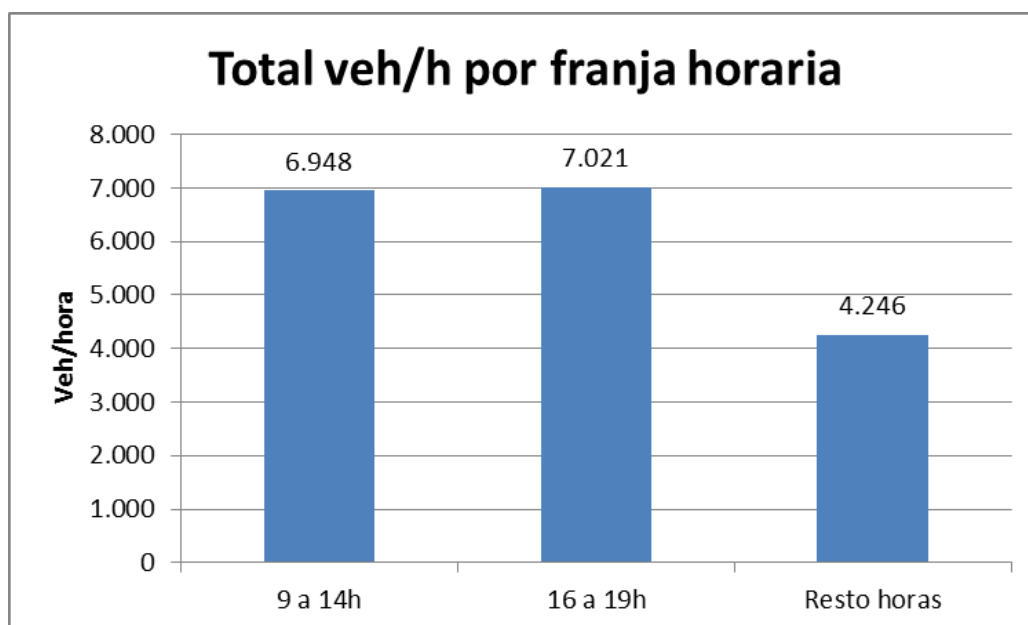


Figura 3.5. Total de vehículos que acceden a la plaza en función de la franja horaria

Como se puede observar en el gráfico, las franjas horarias 9-14h y 16-19h se pueden considerar de hora punta, mientras que el resto de horas del día tendría una consideración de horas valle al presentar un flujo vehicular muy inferior.

4. Modelización del sistema

4.1. Simulación del sistema estudiado

La instalación estudiada en este proyecto se ha considerado dinámica, ya que algunas variables del sistema varían a lo largo del tiempo. A su vez se han introducido algunas variables aleatorias para tener en cuenta una visión más realista del proceso.

Los modelos de simulación son adecuados para analizar sistemas dinámicos en los cuales se ven involucradas variables aleatorias y donde se trabaja con muchas unidades simultáneamente.

La simulación de sistemas tiene diversas aplicaciones:

- Predecir el comportamiento del sistema.

- Evaluar el comportamiento del sistema sometido a unas condiciones de funcionamiento determinadas.

- Establecer relaciones entre magnitudes asociadas al sistema.

- Comparar las diferentes formas de funcionamiento y determinar la más adecuada

4.2. Elección del programa utilizado

Para simular un sistema real se necesitan básicamente dos herramientas:

- ✓ Programa de simulación: Son paquetes informáticos de tratamiento de datos. Ofrecen una interfaz sencilla y de fácil utilización, aunque se ven limitados en el apartado de flexibilidad para reproducir fielmente las características del sistema a estudio.
- ✓ Lenguaje informático: lenguajes de alto nivel, algo más difíciles de utilizar, pero que ofrecen una versatilidad mayor.

Para simular la plaza Francesc Macià de Barcelona y sus correspondientes características de tráfico, se ha determinado que es posible obtener resultados óptimos con programas de simulación.

Son diversos los programas de simulación de tráfico disponibles en el mercado, tales como Aimsun o MobiTrans. Sin embargo, el Departamento de Ingeniería de Transportes de la “Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona” no dispone de un programa de simulación de tráfico. Es por esa razón que para el presente estudio se ha utilizado el programa de simulación Witness 2006 en su versión Professional.



Éste es un programa ideado para simular sistemas logísticos, ofreciendo buenos recursos, a la vez que una interfaz muy intuitiva. Teniendo en cuenta que el estudio se realiza sobre un sistema basado en colas (vehículos), se ha hecho una adaptación de los elementos que ofrece el programa.

4.3. Explicación general del programa Witness

4.3.1. Elementos

PARTS

Este elemento hace referencia a entidades físicas de las cuales se estudia en movimiento dentro del modelo. Puede representar tanto elementos materiales (paquetes, vehículos, etc.) como personas. Estos elementos pueden ser activos o pasivos. En el caso de los primeros, estos entran en el sistema por ellos mismos en función de un tiempo entre llegadas, un tamaño de lote y un número máximo de llegadas. En el caso de los pasivos, llegan al sistema sin limitaciones de cantidad cuando son solicitados y otro elemento los utiliza.

Para el modelo realizado las Parts representarán a los vehículos que se mueven por el sistema.

MACHINE

Las máquinas son elementos físicos que transforman y hacen avanzar las piezas (Parts) en el sistema modelado. Dichas máquinas tienen asociado un tiempo de ciclo, además de poder requerir la presencia de un operario.

Para el modelo realizado las Machine representan los semáforos del sistema, sin requerimiento de un operario.

CONVEYOR

Los conveyors o cintas transportadoras son elementos de una cierta longitud sobre los cuales se pueden desplazar diversas piezas (Parts) simultáneamente, una detrás de otra. También se debe definir el tiempo que tarda una pieza en desplazarse de una posición a la siguiente. Existen dos tipos de cintas:

- Queuing: la distancia entre dos piezas consecutivas sobre la cinta puede disminuir (ejemplo: cinta de rodillos)
- Fixed: la distancia entre dos piezas consecutivas sobre la cinta se mantiene constante (ejemplo: cinta transportadora de cadenas)

Para el sistema simulado, los Conveyor representan cada uno de los carriles de una calle, a través de los cuales se desplazan los vehículos. Han sido utilizados los del tipo Queuing, ya que los vehículos pueden variar la distancia entre ellos a lo largo del carril (por ejemplo al acercarse a un semáforo en rojo).

VARIABLES

Se denominan variables a aquellos parámetros que permiten almacenar un valor, y que éste pueda ser modificable a lo largo de la simulación. Puede ser interpretado y utilizado cuando convenga, por lo que también permiten que el sistema sea más flexible, ya que modificando la variable se puede obtener un sistema muy distinto para la realización de otros experimentos.

En el modelo, las variables han sido utilizadas para definir la velocidad a la que pasan los vehículos por los carriles, o para trabajar con los tiempos de verde de los semáforos.

ATRIBUTOS

Los atributos permiten definir características propias para cada entidad física (Part) del sistema simulado. Estas “etiquetas” pueden ser modificadas a lo largo de la simulación, pero siempre acompañarán a las entidades como parte de su información interna.

Cada uno de los vehículos introducidos en el sistema a simular, contiene el atributo *destino*. Este atributo toma, nada más entrar en el sistema (en la creación de la *Part*), un valor entre 1 y 6 en función de la salida que debe tomar.

4.3.2. Acciones y aleatoriedad

ACCIONES

Las acciones permiten al usuario introducir cálculos a realizar durante la simulación, así como especificar reglas lógicas. Estas acciones se pueden llevar a cabo tanto al inicio como al final de cualquiera de las tareas que realice un elemento del sistema.

En el sistema simulado han sido utilizadas diversas acciones, sirviendo como ejemplo la acción que permite definir el destino de un vehículo.

ALEATORIEDAD

Para analizar el comportamiento de un sistema es especialmente interesante estudiar la respuesta cuando las entradas son aleatorias y el tiempo del proceso también, ya que la situación simulada se convierte en más realista. Para ello, el programa Witness dispone de una serie de distribuciones estadísticas predefinidas que permite al usuario crear aleatoriedad.

En el momento de implementar dichas distribuciones, es necesario utilizar un valor semilla que proporcione una muestra. Para garantizar la independencia entre procesos y poder analizar la influencia de cada proceso en los resultados, se ha utilizado un valor de semilla diferente para cada uno de las entradas al sistema estudiado. Valores semilla diferentes ofrecen muestras independientes.

A su vez, un valor semilla ofrecerá siempre la misma muestra, por lo que ante cualquier modificación en el sistema los resultados obtenidos podrán ser comparados.

5. Modelo de simulación

5.1. Hipótesis del modelo

5.1.1. Carril bus

En la modelización del presente proyecto no se ha tenido en cuenta los carriles llamados “Carril Bus”, ya que utilizan una semaforización distinta y que solo afecta al transporte público. Gracias a la utilización de este tipo de carril, los autobuses y taxis disponen de tiempo de verde algunos segundos antes que el resto de vehículos, lo que comporta que no influyan en la creación de colas en el interior de la plaza Francesc Macià, donde no se prolonga dicho carril.

Este tipo de carril utiliza las fases secundarias (las que sirven para desalojar la plaza entre una fase principal y otra) para dar paso al transporte público. Como se puede observar en la figura 5.1, el carril bus se sitúa en uno de los extremos del sentido de circulación para que la incidencia en el tráfico del resto de vehículos sea mínima. A su vez el tipo de semáforo utilizado para este tipo de carril es distinto, evitando así la confusión de los conductores que circulan por los carriles contiguos.

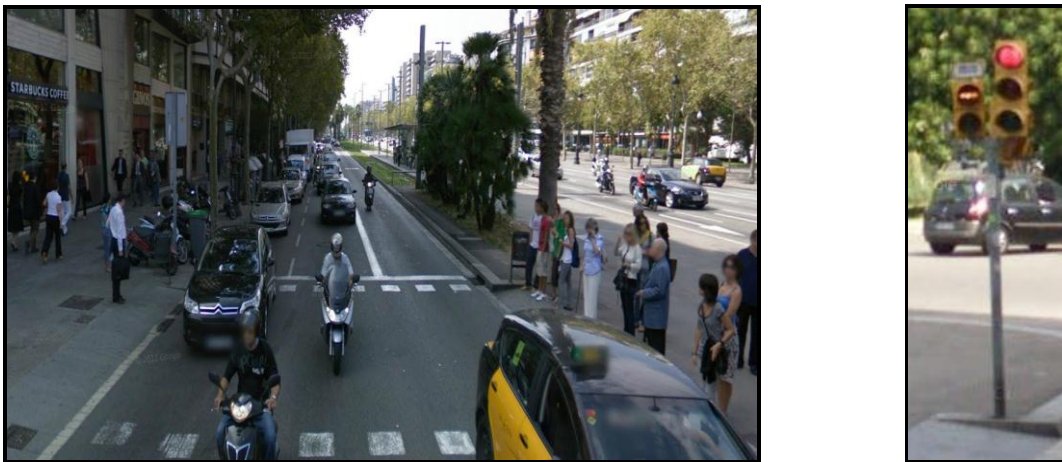


Figura 5.1. Entrada Lateral de Av. Diagonal Montaña.

A la derecha, semáforo para carril bus junto a semáforo habitual para vehículos

5.1.2. Número de carriles para cada acceso

Uno de los elementos utilizados en la simulación son los carriles, representados en el programa Witness2006 Profesional mediante el uso de cintas transportadoras (conveyors) a fin de simular como unos objetos (coches) se desplazan de una máquina (semáforo) a otra. Para ello se necesita conocer tanto el número de carriles como la cantidad de vehículos que caben en cada uno de estos. Cabe destacar que, al tratarse de una plaza, no todos los carriles internos de una misma zona tienen la misma capacidad al tener circunferencias de distinto tamaño.

Para el software de simulación utilizado, se necesita conocer el número de vehículos que caben en cada carril a fin de poder simular la longitud del mismo. A continuación se presenta un cuadro con el número de carriles y sus dimensiones (en número de vehículos) para cada zona:

Zona	Número de carriles	Tamaño [nº de vehículos]
Entrada Av. Diag. Montaña	4	16
Entrada Lateral Av. Diag. Montaña	2	18
Entrada Av. Josep Tarradellas	3	4
Entrada Lateral Av. Diag. Mar	3	12
Entrada Av. Diag. Mar	2	25
Entrada calle Pau Casals	3	8
Salida Lateral Av. Diag. Montaña	2	6
Salida Av. Diag. Montaña	2	11
Salida Av. Josep Tarradellas	3	8
Salida calle Urgell	3	8
Salida Lateral Av. Diag. Mar	2	14
Salida Av. Diag. Mar	2	15
Salida calle Pau Casals	2	15
Semáforo interno 1	4	9
Semáforo interno 2	4	14
Semáforo interno 3	5	22
Semáforo interno 4	5	8

Tabla 5.1. Nº de carriles y capacidad

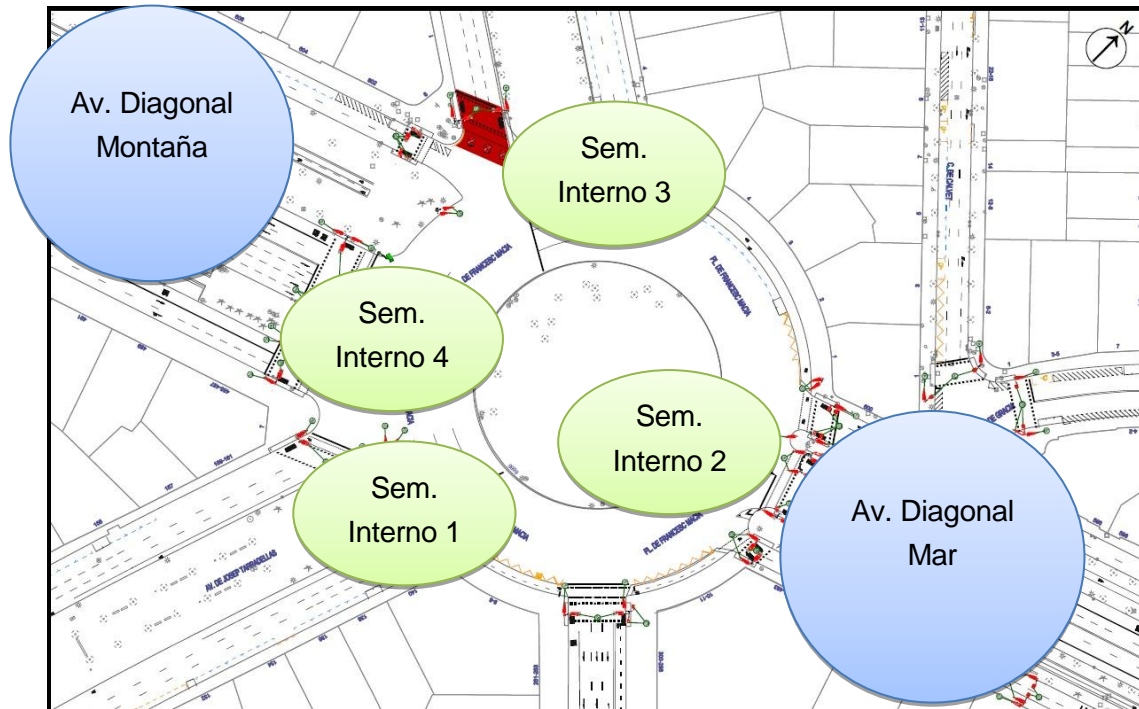


Figura 5.2. Nomenclatura utilizada para referenciar cada tramo.

5.1.3. Velocidades en los carriles

Tras definir el número de carriles de cada tramo de vía y la capacidad de cada carril, se debe definir la velocidad a la que atraviesa los vehículos la vía. Para la zona geográfica a estudio se han hecho dos suposiciones:

- Si el vehículo llega al tramo de vía con el semáforo correspondiente en rojo, o bien con el semáforo en verde pero con una cola superior a la mitad de la capacidad del carril (ver tabla 5.1), la velocidad de los vehículos en ese tramo será de 15 km/h.
- Si por el contrario el vehículo entra al tramo de vía con el semáforo correspondiente en verde y con una cantidad de cola inferior a la mitad de la capacidad del carril, la velocidad de los vehículos en ese tramo será de 25 km/h.

Para implementar estas restricciones en el software Witness 2006 Profesional, se necesita indicar el tiempo que tarda un elemento (vehículo) en pasar a la posición ocupada por el siguiente elemento. En el presente proyecto se ha considerado que los vehículos, en general, tienen una longitud de 4 metros.

Por lo tanto, se ha seguido el siguiente procedimiento para saber el tiempo que tarda un vehículo en situarse en la posición del que le precede:

1. Pasar la velocidad a medidas del Sistema Internacional [m/s]
2. Tiempo para pasar a la posición del vehículo que precede = $4 / \text{velocidad [m/s]}$

5.1.4. Cálculo de destinos

Es importante tener en cuenta que todos los vehículos que entran por un mismo acceso a la plaza Francesc Macià no tomarán la misma salida. Sin embargo, si que es cierto que en función del acceso del cual proceda el vehículo, tendrá más o menos tendencia a tomar una salida u otra. Se ha procedido al análisis de dichas tendencias tomando como partida los datos obtenidos por parte del Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona, en los cuales se facilitan las cantidades de vehículos que acceden a la plaza en cada franja horaria, así como los movimientos que realizan los vehículos tras pasar por los semáforos internos.

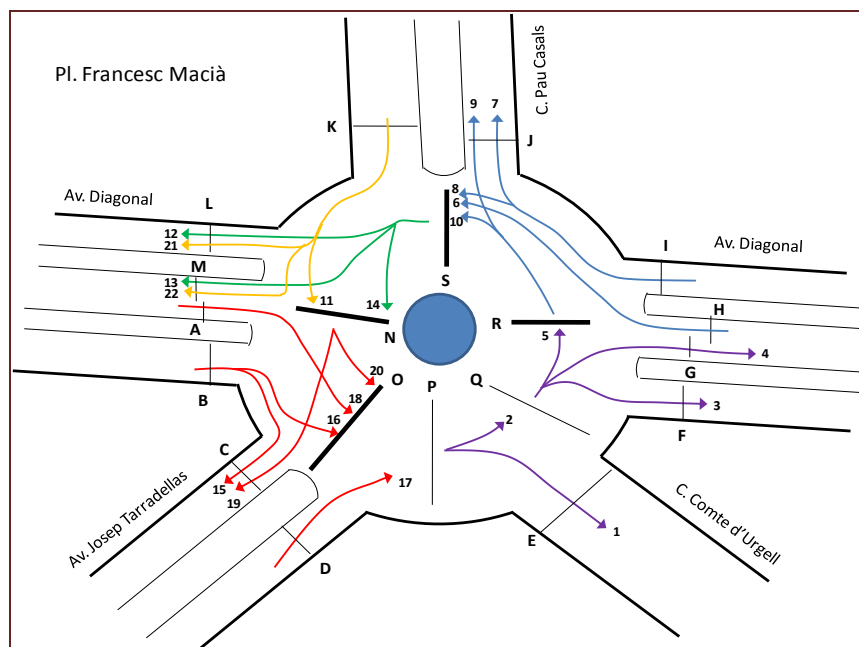


Figura 5.3. Esquema de los movimientos realizados por los vehículos en la plaza

Una vez analizados los movimientos, las cantidades de vehículos que entran y salen por cada acceso, así como los movimientos que realizan, se obtiene la tendencia de destino en función del acceso desde el que provenga el vehículo. En el cuadro que se muestra a continuación se puede observar el porcentaje de vehículos que tomará cada salida en función de la entrada:

	Salida Urgell	Salida Lat Diag Mar	Salida Diag Mar	Salida Pau	Salida Lat Diag Mont.	Salida Diag Mont	Sal Tarr	TOTAL
Ent Tarr	25%	30%	31%	5%	3%	4%	2%	100%
EntLat Diag Mont.	22%	26%	28%	4%	3%	5%	12%	100%
Ent Diag Mont	25%	30%	31%	5%	3%	4%	2%	100%
EntDiag Mar	3%	3%	3%	2%	31%	45%	13%	100%
Ent Lat Diag Mar	2%	3%	3%	20%	25%	36%	10%	100%
Ent Pau	9%	11%	12%	5%	7%	13%	43%	100%

Tabla 5.2. Tabla de porcentajes de destino en función del acceso a la plaza Fr. Macià

Estas tendencias definirán el destino de un vehículo desde el mismo instante en el que sea creado. Para definir este destino, los porcentajes presentados en la tabla 5.2 deben estar en formato acumulado y en tanto por uno, obteniendo la tabla 5.3:

	Salida Urgell	Salida Lat Diag Mar	Salida Diag Mar	Salida Pau	Salida Lat Diag Mont.	Salida Diag Mont	Sal Tarr
Ent Tarr	0,250	0,548	0,861	0,909	0,937	0,978	1
EntLat Diag Mont.	0,221	0,483	0,759	0,802	0,828	0,882	1
Ent Diag Mont	0,250	0,548	0,861	0,909	0,937	0,978	1
EntDiag Mar	0,028	0,061	0,096	0,111	0,421	0,873	1
Ent Lat Diag Mar	0,022	0,055	0,089	0,289	0,537	0,899	1
Ent Pau	0,094	0,205	0,322	0,374	0,444	0,574	1

Tabla 5.3. Tabla de acumulados (en tanto por uno) de destino en función del acceso

De esta manera se crea una variable (una para cada acceso) y un atributo. Para cada vehículo que se cree, la variable realiza una ley uniforme entre 0 y 1; en función del valor que tome la variable, al vehículo se le asigna un destino mediante el atributo.

5.1.5. Tiempo de ciclo de los semáforos

Para poder simular los semáforos en el software Witness 2006 Professional, se ha utilizado el elemento Machine (máquina). Este elemento necesita ser definido con un tiempo de ciclo. El tiempo de ciclo del elemento Machine se define como el tiempo que tardará un vehículo en cruzar el semáforo cuando esté en verde. Para el presente proyecto se ha realizado una hipótesis según la cual este tiempo de ciclo es de 1 segundo.

5.1.6. Entrada de vehículos al sistema

Para la entrada de vehículos en el sistema se ha utilizado el elemento Part. Este elemento crea uno o varios vehículos de entrada cada tiempo de ciclo. Para simular el sistema, se ha utilizado un elemento Part para cada acceso a la plaza, y a su vez este elemento Part crea un solo vehículo cada tiempo de ciclo. Este tiempo de ciclo para la creación de vehículos se extrae a partir de los datos de flujo proporcionados por el Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona y que ya han sido expuestos en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Para convertir estos flujos en tiempos de ciclo de creación de vehículos, se realiza la siguiente operación:

$$\text{Tiempo ciclo [s/vehículo]} = 3600 \text{ s} / 1\text{h} \times 1 / \text{flujo [vehículos/h]}$$

Una vez realizada esta operación para cada acceso y franja horaria, se obtienen los resultados resumidos en la tabla 5.4:

Entrada	Tiempo entre 9 y 14h	Tiempo entre 16 y 19h	Tiempo Resto horas
Av. Diagonal Montaña	1.87	1.8	3.03
Lat. Av. Diag. Montaña	3	3.09	4.98
Av. Josep Tarradellas	12.54	11.12	19.67
Lat. Av. Diag. Mar	2.46	3.06	4.84
Av. Diag. Mar	2.88	2.16	3.84
Calle Pau Casals	4.41	5.2	7.68

Tabla 5.4. Tabla con los tiempos de ciclo de creación de vehículos para el sistema [s]

5.1.7. Restricción de movimientos

La restricción de movimientos es otra de las hipótesis realizadas para la simulación. Se ha tratado de limitar movimientos que a priori no son posibles, como el hecho de tomar una salida estando situado en el carril más interno de la plaza.

A su vez, para que eso no pase, en función de la salida que deba tomar el vehículo, el mismo se va adecuando para situarse en los carriles que le permitan tomar la salida correctamente.

5.1.8. Otras consideraciones

Para realizar la simulación se ha considerado que los semáforos están en verde o en rojo. Los tiempos de ámbar se han traducido como tiempos de verde a efectos de la simulación, ya que si en el justo momento en que el semáforo se encuentra en ámbar, existe un vehículo debajo del semáforo, el vehículo pasará. Sin embargo, si el vehículo no ha llegado a situarse bajo el semáforo, acabará deteniéndose.

Esta consideración reduce la complejidad del proceso que debe realizar un vehículo en su paso de un semáforo a otro.

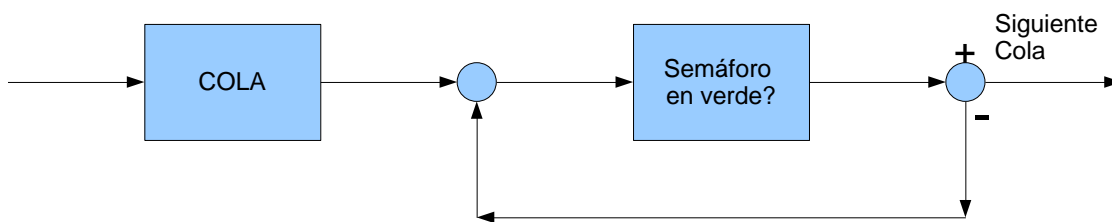


Figura 5.4. Proceso que sigue un vehículo para trasladarse de un semáforo a otro.

5.2. Análisis del modelo actual

El primer paso del desarrollo del presente proyecto es implantar el modelo real de la plaza según su situación actual en un software por tal de poder simular el comportamiento del tráfico. La finalidad de esta simulación del tráfico es poder extraer datos sobre los cuales posteriormente se puedan obtener determinaciones para futuras actuaciones de mejora. Con el uso de las hipótesis realizadas en el capítulo anterior, se puede proceder a implantar un sistema de creación de vehículos, los cuales se desplazan por unos carriles (cintas transportadoras), en función de si el semáforo de dicho carril se encuentra activo (en verde) o no.

Objetivo del modelo

El objetivo de este primer modelo es únicamente analizar la situación actual del tráfico en cada una de las situaciones que, a grandes rasgos, se generan a lo largo de un día. Esto hace referencia a que se pretende analizar el estado del tráfico tanto en horas punta (las de mayor flujo de tráfico en el área geográfica estudiada) como en horas valle (las de menor flujo).

En este primer modelo no se tienen en cuenta sistemas de conteo de vehículos, al igual que no se genera ningún proceso que modifique el ciclo semafórico en tiempo real.

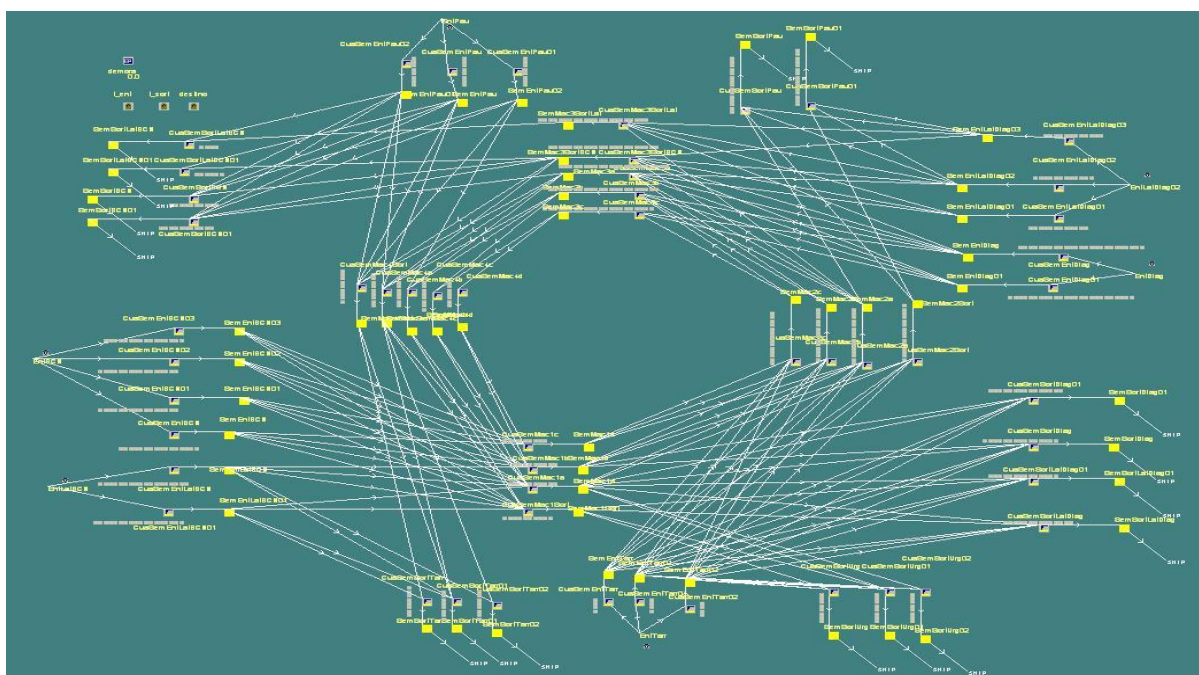


Figura 5.5. Modelo de simulación.

5.2.1. HORA PUNTA

Hipótesis del modelo

Para simular el estado de tráfico en hora punta se generan diversas posibilidades:

- Simular la franja horaria entre 9 y 14h
- Simular la franja horaria entre 16 y 19h
- Simular con la media ponderada de ambas franjas horarias

Para que el análisis posterior sea lo más real posible y a continuación se trate el caso más desfavorable, se ha realizado un estudio de la franja horaria de 16 a 19 h. Esta franja horaria resulta la más crítica, ya que es cuando se produce una entrada de flujo de vehículos más elevada. Por tanto, como valores de entrada de vehículos se han considerado:

Entrada	Tiempo entre 16 y 19h
Av. Diagonal Montaña	1.8
Lat. Av. Diag. Montaña	3.09
Av. Josep Tarradellas	11.12
Lat. Av. Diag. Mar	3.06
Av. Diag. Mar	2.16
Calle Pau Casals	5.2

Tabla 5.5. Flujos de entrada de vehículos en el modelo de Hora PUNTA [s/veh]

Con estos datos y las hipótesis realizadas en el capítulo anterior, además de la tabla con los ciclos y coordinaciones semafóricas facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona, ya se disponen de todos los elementos necesarios para realizar las simulaciones.

Para la realización de las mismas, se ha tenido en cuenta que los datos son fiables en un estado estacionario. Para poder llegar a ese estado, se ha simulado un tiempo de 1000 segundos al que se ha considerado transitorio, eliminando las estadísticas obtenidas hasta ese instante. Posteriormente, se ha simulado hasta el instante 4600, obteniendo así una simulación equivalente a una hora de tráfico en la plaza Francesc Macià.

RESULTADOS HORA PUNTA

Se han realizado un total de 10 simulaciones con valores de semilla diferentes para poder tener en cuenta la variabilidad del sistema, evitando así ofrecer unos resultados deterministas.

Han sido tomadas las estadísticas correspondientes a cada uno de los accesos al sistema (la plaza Francesc Macià). A continuación se presentan los valores medios de las estadísticas obtenidas en el total de las simulaciones:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	2047	329	1705	705	1192	1197
No. Shipped	2014	320	1672	687	1170	1178
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	33	9	33	18	23	19
Avg W.I.P.	39	7	36	14	24	18
Avg Time	67,83	76,95	76,67	72,45	73,61	54,05

Tabla 5.6. Valores promedio de las simulaciones en hora punta.

Para poder entender los resultados de estas simulaciones, se hace necesario conocer el significado de cada uno de los conceptos que aparecen en la tabla 5.6.

- No. Entered: Se trata del número de vehículos creados que han entrado en el sistema correctamente
- No. Shipped: Se trata del número de vehículos creados que han entrado y ya han salido del sistema.
- No. Rejected: Se trata de los vehículos que, una vez creados, no han podido ser introducidos en el sistema.
- W.I.P.: Número de vehículos que se encuentran en el interior del sistema al final de la simulación.
- Avg. W.I.P.: Se trata de la media de vehículos que hay en el interior del sistema a lo largo de toda la simulación
- Avg. Time: Es el tiempo medio que pasan los vehículos desde que entran hasta que salen del sistema [s].

Análisis de resultados

Sabiendo el número de vehículos que han salido del sistema y el tiempo medio que permanecen en la plaza, se puede realizar una media ponderada para conocer el tiempo de demora media que los vehículos pasan en toda la plaza.

El primer paso es calcular el tiempo de demora total por cada entrada:

$$Tdem.total\ de\ cada\ entrada = No.Shipped \times Avg.Time$$

Mediante la fórmula anterior, se obtienen los siguientes valores tabulados:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	136.618	24.587	128.206	49.773	86.087	63.697

Tabla 5.7. Tiempos totales de demora en función del acceso [s]

Por tanto, la media ponderada del sistema en hora punta es:

$$Tdem.media = \frac{\sum tiempo\ demora\ por\ entrada}{\sum No.Shipped}$$

$$Tdem.media = \frac{136618 + 24587 + 128206 + 49773 + 86087 + 63697}{2014 + 320 + 1672 + 687 + 1170 + 1178}$$

$$Tdem.media = 69.45\ segundos$$

5.2.2. HORAS VALLE

Hipótesis del modelo

Para simular el estado de tráfico en hora valle se ha escogido el flujo de vehículos que acceden a la plaza en las horas diferentes a las franjas de hora punta. Como se ha descrito en capítulos anteriores, las franjas horarias que comprenden las horas punta son de 9 a 14h y de 16 a 19h, mientras que han sido consideradas como horas valle el resto de horas del día.

Por lo tanto, como valores de entrada se han aplicado:

Entrada	Tiempo entre vehículos en horas valle
Av. Diagonal Montaña	3.03
Lat. Av. Diag. Montaña	4.98
Av. Josep Tarradellas	19.67
Lat. Av. Diag. Mar	4.84
Av. Diag. Mar	3.84
Calle Pau Casals	7.68

Tabla 5.8. Flujos de entrada de vehículos en el modelo de Hora VALLE [s/veh]

Al igual que en el caso de horas punta, con estos datos y las hipótesis realizadas en el capítulo anterior, ya se disponen de todos los elementos necesarios para realizar las simulaciones.

A su vez, se ha vuelto a tener en cuenta que los datos son fiables en un estado estacionario. Para poder llegar a ese estado, se ha simulado un tiempo de 1000 segundos al que se ha considerado transitorio, eliminando las estadísticas obtenidas hasta ese instante. Posteriormente, se ha simulado hasta el instante 4600, obteniendo así una simulación equivalente a una hora de tráfico en la plaza Francesc Macià.

RESULTADOS HORA VALLE

Tras realizar 10 simulaciones con valores de semilla diferentes, se han obtenido los siguientes valores estadísticos promedio en función del acceso a la plaza:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1217	186	959	476	740	758
No. Shipped	1199	181	942	465	729	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	18	4	18	11	11	11
Avg W.I.P.	21	4	19	9	13	11
Avg Time	61,50	75,71	72,86	65,89	63,14	52,90

Tabla 5.9. Valores promedio de las simulaciones en hora valle

Análisis de resultados

Como se puede comprobar, el tiempo medio que un vehículo permanece en el sistema se ve reducido en horas valle. Esto se debe al menor flujo de vehículos en estas franjas horarias, ya que se forman colas menores cuando el semáforo está en rojo.

Aplicando la misma operativa que en el caso de hora punta, se puede calcular el tiempo medio que un vehículo tarda en abandonar la plaza Francesc Macià. Si la demora media ha disminuido, la demora total por cada acceso se verá considerablemente reducida, debido al efecto multiplicador de la cantidad de vehículos que acceden a la plaza:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	73.754	13.727	68.594	30.663	46.044	39.493

Tabla 5.10. Tabla con los tiempos totales de demora en función del acceso [s]

Por tanto, la media ponderada del sistema en hora punta es:

$$T_{dem.media} = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum \text{No. Shipped}}$$

$$T_{dem.media} = \frac{73754 + 13727 + 68594 + 30663 + 46044 + 39493}{1199 + 186 + 959 + 476 + 740 + 758}$$

$$T_{dem.media} = 63.87 \text{ segundos}$$

5.3. Análisis del modelo implementando una regulación semafórica en tiempo real

Una vez creado el modelo que simula el comportamiento actual del tráfico en la plaza Francesc Macià, se puede realizar el estudio que comporta la modificación de los ciclos semafóricos. Esta variación en tiempo real sirve para que los vehículos sufran un tiempo de demora más optimizado en cualquiera de las franjas horarias del día.

5.3.1. Conteo

Tal y como se ha explicado en capítulos anteriores, la propuesta de mejora se basa en un sistema de modificación del tiempo de verde y de rojo de los diferentes semáforos que se encuentran en el área geográfica a estudio.

Para ello se utilizan unas cámaras IP, situadas en cada uno de los accesos a la plaza, que se encargan del conteo de vehículos durante un tiempo de ciclo. Es necesario conocer el estado de todos los accesos a la plaza Francesc Macià ya que, aunque algunas entradas presentan habitualmente condiciones más críticas que otras, es posible que se ocasione una incidencia de tráfico que modifique por completo una situación vehicular habitual. Cabe especificar que el conteo empieza y termina unos segundos antes del fin del tiempo de rojo de los accesos de Avenida Diagonal por la zona de montaña, para poder tener tiempo de tomar decisiones en el siguiente ciclo semafórico.

Para el contaje de vehículos se deben crear tantas variables como accesos. Dichas variables sumarán un vehículo a su cuenta cada vez que se introduzca un vehículo al sistema por el acceso correspondiente. En cada tiempo de ciclo los contadores se ponen a cero, por lo que cada ciclo semafórico podría variar sus tiempos de verde y rojo independientemente si fuera necesario.

Una vez establecido el mecanismo de conteo de vehículos para cada acceso, el sistema dispone de los inputs necesarios para poder entrar en la fase de toma de decisiones. En esta fase, el sistema compara los datos de flujo que se han recogido en tiempo real y los compara a fin de determinar si la situación requiere alargar el tiempo de verde o acortarlo en cada uno de los accesos.

Los accesos a la plaza pueden ser divididos en función de cuando inciden los flujos vehiculares en la misma. Esta distinción queda evidenciada en el esquema de fases semafóricas mostrada en capítulos anteriores, según el cual los flujos vehiculares pueden agruparse en dos grupos:

- Grupo 1: Accesos por Avenida Diagonal.
- Grupo 2: Acceso Josep Tarradellas, acceso Pau Casals.

Para cada grupo, el sistema elegirá el acceso con un flujo vehicular mayor para compararlo con el del otro grupo. De esta manera se tiene en cuenta el caso que presenta un estado más crítico. Para cada ciclo semafórico, la comparación se realizará mediante una división entre el número de vehículos elegido en el grupo 1 y el número de vehículos elegido en el grupo 2.

El mecanismo de toma de decisiones se basa en que, en función del valor que tome la división anteriormente especificada, el sistema decidirá dar un valor al tiempo de verde o de rojo. Se establece uno de los intervalos del mapa semafórico como variable; si en ese intervalo el semáforo se ve afectado por el verde se añadirá o quitará tiempo de verde y análogamente se procederá con el tiempo de rojo. En la figura 5.6 se puede observar el intervalo escogido (Al final del tiempo de verde de los accesos por Avenida Diagonal por zona Montaña:

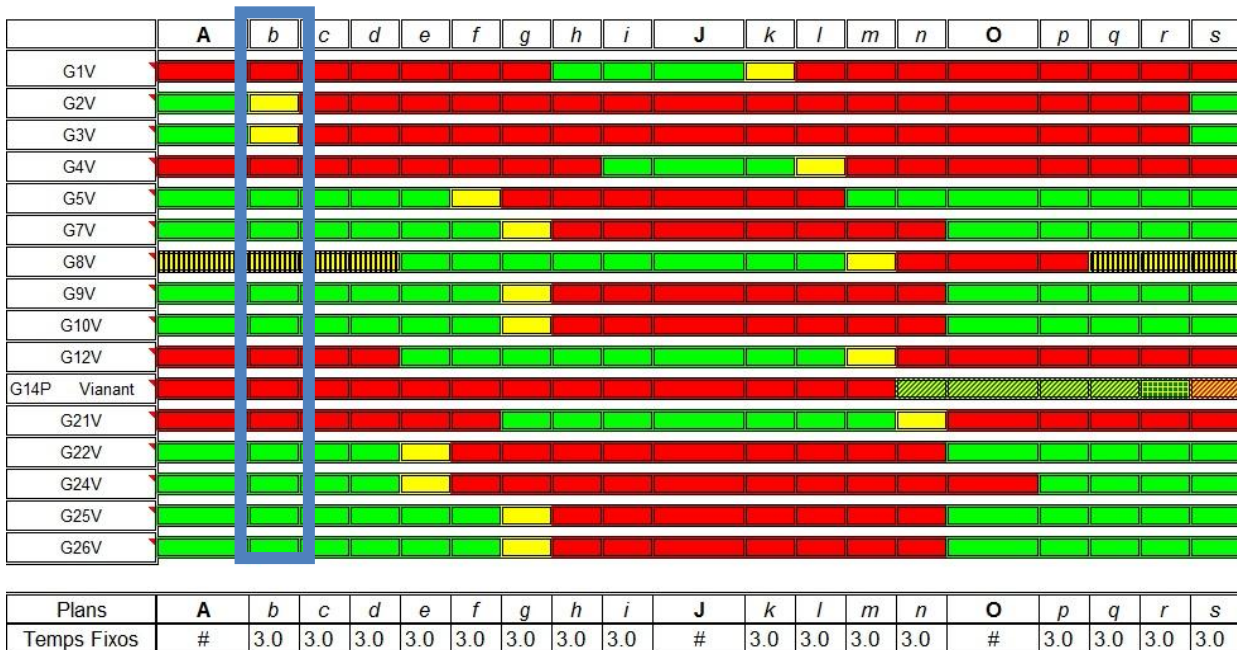


Figura 5.6. Intervalo de tiempo variable en función de la situación de tráfico [s]

Una vez tomada la decisión, y según la figura 5.6, se añade tiempo de verde o rojo en función de si el semáforo se encuentra afectado en uno u otro color dentro de la zona azul. La operación descrita se volverá a repetir para cada ciclo semafórico.

A continuación se presenta un esquema que resume el proceso completo:

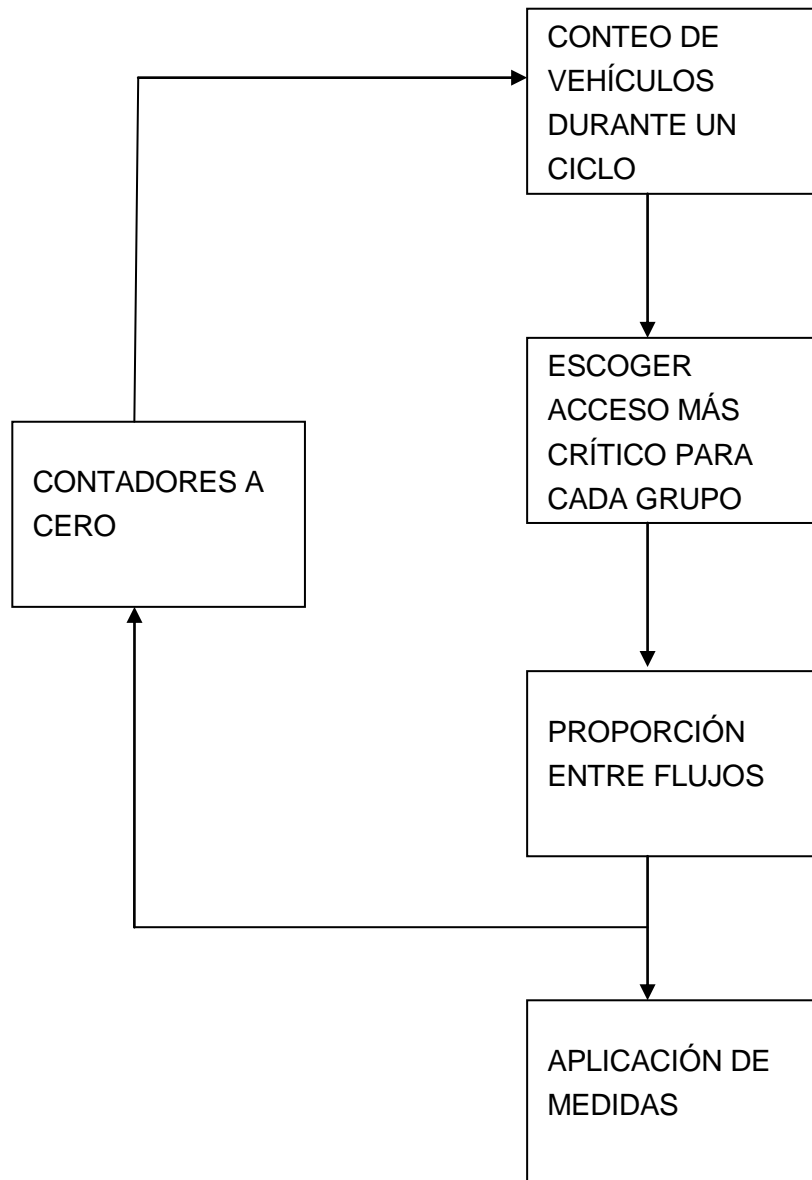


Figura 5.7. Esquema del proceso de recogida de datos, toma y aplicación de decisiones

5.3.2. Optimización de horas punta

Para realizar un análisis del sistema propuesto y su posterior optimización del tiempo que los vehículos permanecen en la plaza Francesc Macià, se debe tomar alguna referencia estadística que permita comparar resultados. Como punto de comparación se ha tomado el tiempo de demora media de la plaza; en este primer caso en la franja horaria correspondiente a hora punta.

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, para poder comparar los valores actuales y los obtenidos con las mejoras propuestas, utilizando la misma semilla en todas las simulaciones se obtienen valores comparables. En las simulaciones del presente proyecto se ha utilizado una semilla con valor 100 (que otorga un rango de valores aleatorios concreto).

En una primera tabla se muestran los valores individuales obtenidos simulando las condiciones actuales de tráfico en hora punta.

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	2048	327	1703	704	1192	1198
No. Shipped	2014	315	1671	687	1170	1178
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	34	12	32	17	22	20
Avg W.I.P.	38,9	6,78	35,9	14,23	24,34	17,74
Avg Time	68,38	74,69	75,89	72,76	73,50	53,29

Tabla 5.11. Tabla estadística en hora punta para semilla = 100 sin modificar tiempos de verde

Por lo tanto, los valores de demora totales para cada uno de los accesos son:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	137.717	23.527	126.812	49.986	85.995	62.776

Tabla 5.12. Tiempos totales de demora en función del acceso [s]

Estos valores permiten obtener la media ponderada del tiempo de demora de los vehículos en hora punta para un valor de semilla determinado (100):

$$Tdem.media = \frac{137717 + 23527 + 126812 + 49986 + 85995 + 62776}{2014 + 315 + 1671 + 687 + 1170 + 1178}$$

$$Tdem.media = 69,20 \text{ segundos}$$

Este es el valor que se debe optimizar. Mediante la metodología explicada con anterioridad, se procede a darle diferentes valores a una variable “t”, que modifica el tiempo de verde y rojo de los semáforos de la plaza. En hora punta, los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 2,75.

Para cada valor de proporción por encima de 2,75 la variable “t” tomará el valor que se le haya predeterminado. A continuación se puede observar el gráfico de los tiempos de demora media en la plaza en función del valor que se le predetermina a “t” cada vez que supere una proporción entre flujos de 2,75.

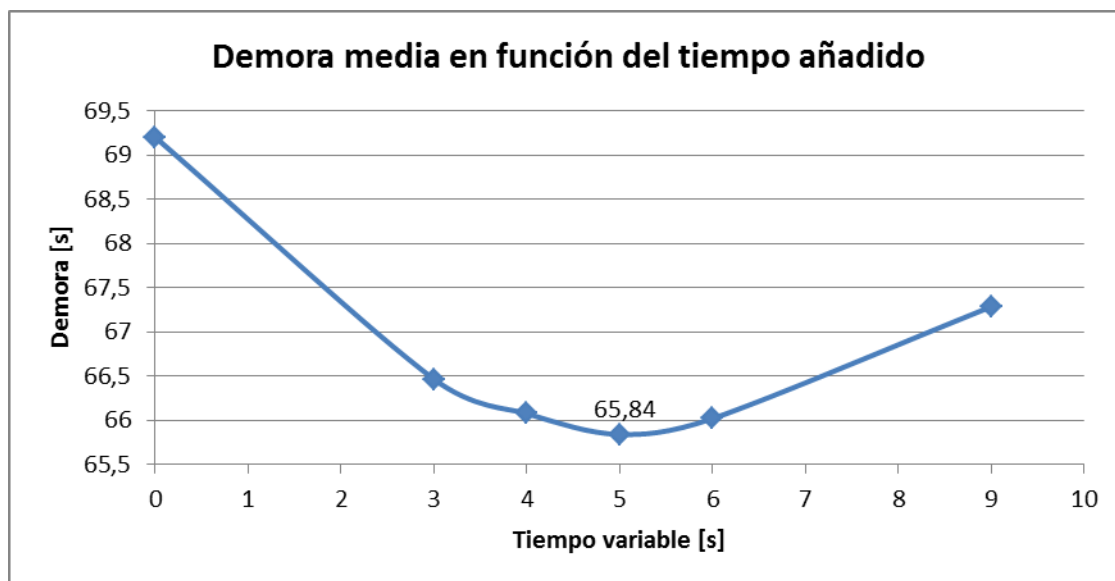


Figura 5.8. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].
Hora punta

Como se puede deducir de la gráfica 5.8, siempre que la proporción de máximos flujos de tráfico de los diferentes grupos vehiculares supere el valor de 2,75 se le debe otorgar un incremento a la variable "t" de 5 segundos para que el tiempo que los vehículos permanecen en el interior de la plaza sea mínimo. En estas condiciones, se obtiene una demora media de 65,84 segundos; siendo notable la diferencia respecto a la demora media actual en hora punta y semilla = 100 (69,20 segundos de demora media).

En concreto, las estadísticas completas para el tiempo extra $t = 5$ segundos son:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	2046	327	1702	705	1191	1196
No. Shipped	2016	315	1672	688	1173	1179
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	30	12	30	17	18	17
Avg W.I.P.	35,77	6,82	34,05	16,10	21,46	16,94
Avg Time	62,93	75,11	72,02	82,23	64,86	50,98

Tabla 5.13. Tabla estadística en hora punta para semilla = 100 y $t = 5$ s

Obteniendo unos valores de demora totales para cada uno de los accesos de:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	137.717	23.527	126.812	49.986	85.995	62.776

Tabla 5.14. Tiempos totales de demora [s] en función del acceso para $t = 5$ s

5.3.3. Optimización de horas valle

Al igual que en el caso de hora punta, se presentan primero los resultados estadísticos de la simulación del estado actual del tráfico en hora valle utilizando la semilla de valor 100 y el valor de flujos correspondiente a esta franja horaria.

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1218	187	960	476	740	757
No. Shipped	1201	182	944	464	729	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	17	5	16	12	11	10
Avg W.I.P.	20,65	3,68	19,23	8,86	13,08	11,37
Avg Time	61,04	70,76	72,12	67,03	63,61	54,07

Tabla 5.15. Tabla estadística en hora punta para semilla = 100 sin modificar tiempos de verde

Por lo tanto, los valores de demora totales para cada uno de los accesos son:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	73.309	12.878	68.081	31.102	46.372	40.390

Tabla 5.16. Tiempos totales de demora en función del acceso [s]

Igual que en el caso de hora punta, estos valores permiten obtener la media ponderada del tiempo de demora de los vehículos en hora valle para un valor de semilla determinado (100):

$$T_{dem.media} = \frac{73309 + 12878 + 68081 + 31102 + 46372 + 40390}{1201 + 182 + 944 + 464 + 729 + 747}$$

$$T_{dem.media} = 63,78 \text{ segundos}$$

Una vez obtenido el valor actual de demora media, se procede a examinar cual es el valor de "t" que minimiza esta demora. En horas valle, los valores de proporción siempre permanecen por encima de 2,45. Como se puede comprobar en el gráfico 5.9, la mínima demora se logra cuando el valor de "t" es 4 segundos. Con esta medida, en hora punta los vehículos permanecen, de media, 62,83 segundos en el interior del área geográfica.

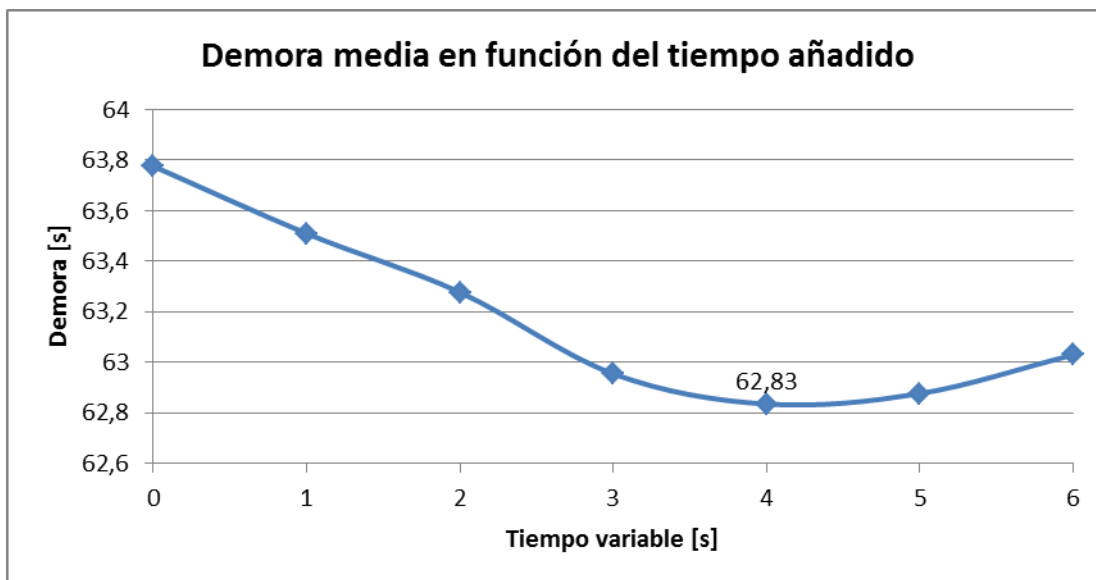


Figura 5.9. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].

Hora valle

En concreto, las estadísticas completas para el tiempo extra $t = 4$ segundos son:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1217	187	959	477	739	757
No. Shipped	1202	182	944	465	730	748
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	15	5	15	12	9	9
Avg W.I.P.	20.14	3.58	18.89	9.31	12.62	11.16
Avg Time	59,58	68,94	70,92	70,28	61,46	53,09

Tabla 5.17. Tabla estadística en hora punta para semilla = 100 y $t = 5$ s

Obteniendo unos valores de demora totales para cada uno de los accesos de:

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	71.615	12.547	66.948	32.680	44.866	39.711

Tabla 5.18. Tiempos totales de demora [s] en función del acceso para $t = 4$ s

5.3.4. Análisis de resultados

Una vez realizado el estudio de las dos grandes franjas horarias que aparecen a lo largo de un día de forma habitual, se puede resumir dichos resultados en una tabla y cuantificar el tiempo total de demora que se consigue ahorrar en un día. Se incluye una columna con el número medio de vehículos por hora que pasa en cada franja horaria.

	Demora estado actual	Demora sistema mejorado	Nº medio vehículos por hora
Hora punta	69,20s	65,84s	7041
Hora Valle	63,78s	62,83s	4263

Tabla 5.19. Resultados para franjas de tiempo habituales.[s]

En la gráfica 5.10 se muestra de una manera representativa lo que se ha indicado en la tabla 5.19, mostrando las mejoras en los tiempos de demora medios para cada una de las franjas horarias.

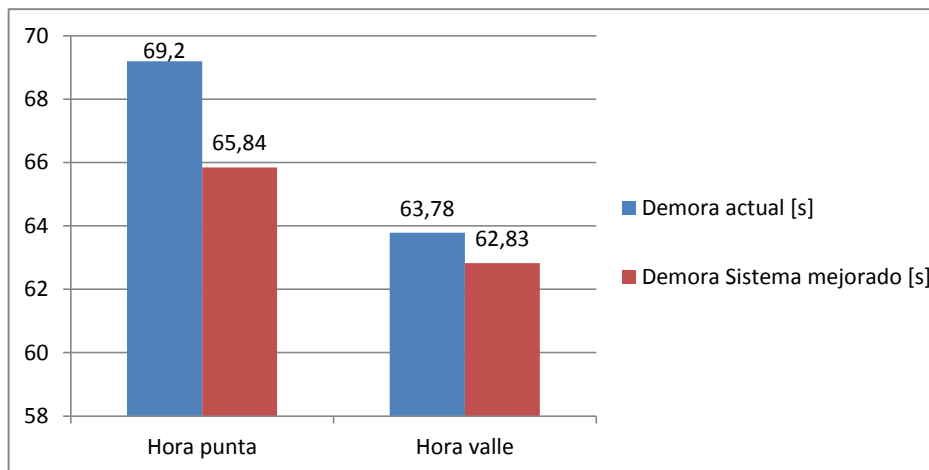


Figura 5.10. Gráfico comparativo de los valores de demora actuales y con mejoras [s]

Como se ha especificado anteriormente, se ha tomado como hora punta la más crítica entre las dos franjas existentes (9 a 14h y 16 a 19h). Para evaluar las ganancias de tiempo según los valores de las simulaciones, se ha tenido en cuenta que los resultados obtenidos de hora punta son válidos para las dos franjas posibles.

Por lo tanto, para calcular el tiempo de demora ahorrado a lo largo de un día, se procede primero al cálculo total de demora para los casos de Estado actual y otro con Sistema mejorado.

Demora = demora media por vehículo x nº vehículos por hora x nº horas franja horaria

Demora actual = Demora actual punta + Demora actual valle

Demora actual = $69,20 \times 7041 \times 6 + 63,78 \times 4263 \times 18$

Demora actual = 7817517,72 segundos

Demora con mejoras = $65,84 \times 7041 \times 6 + 62,83 \times 4263 \times 18$

Demora con mejoras = 7602673,86 segundos

Ahorro de demora = Demora actual – Demora con mejoras

Ahorro de demora = $7817517,72 - 7602673,86 = 214843,86$ segundos = 3580,731 minutos = 59,68 horas

Se puede comprobar, por tanto, que el ahorro de tiempo conseguido en un día cualquiera y con unas condiciones habituales de tráfico es elevado. Teniendo en cuenta que el sistema modificará los tiempos de verde y rojo de los semáforos en cualquier momento sin importar la hora del día, el ahorro de tiempo puede ser mucho mayor.

5.4. Otros casos

Una vez estudiados los casos más generales de tráfico que se dan a lo largo de un día, se deben tener en cuenta posibles variaciones en los flujos vehiculares habituales. Un sistema dinámico que solo tenga en cuenta los procesos más habituales no ofrecerá todo el potencial que puede aportar, ya que ante cualquier modificación que se desvíe de estos procesos comunes el sistema no aportará una solución óptima para minimizar el tiempo de demora.

Tal y como se ha presentado en los capítulos precedentes, el algoritmo de control de tiempos de ciclo determina la decisión a tomar en función de la proporción de flujos que inciden en la plaza en direcciones distintas. Si se consigue abarcar una mayor cantidad de posibilidades de tráfico, se dispondrán de más valores de proporción de flujos. Idear un sistema con diferentes situaciones posibles de tráfico permitirá, por tanto, crear un algoritmo mucho más preciso en la toma de decisiones.

A continuación se presentan una serie de casos donde se muestran posibles incidencias de tráfico. Estas incidencias se basan en incrementos o disminuciones de uno o varios flujos de tráfico determinados. Este hecho hace que los valores de proporción de flujos cambien y la decisión a tomar pueda ser distinta.

Los valores aportados a todos los casos son modificaciones de los datos de flujo en horas valle o punta que ya han sido presentados en capítulos anteriores.

5.4.1. CASO 1: Doble flujo de tráfico por Pau Casals

En situación de hora valle, el flujo incidente por Pau Casals se duplica

Entrada	Tiempo entre vehículos
Av. Diagonal Montaña	3.03
Lat. Av. Diag. Montaña	4.98
Av. Josep Tarradellas	19.67
Lat. Av. Diag. Mar	4.84
Av. Diag. Mar	3.84
Calle Pau Casals	7.68 / 2

Tabla 5.20. Tiempo entre vehículos para el caso 1. [s/veh]

Una vez realizada la simulación en las condiciones descritas, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1218	187	960	955	740	757
No. Shipped	1201	182	944	931	729	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	17	5	16	24	11	10
Avg W.I.P.	20.65	3.68	19.20	20.28	13.09	11.37
Avg Time	61,04	70,81	72,01	76,46	63,67	54,09

Tabla 5.21. Valores estadísticos de las simulaciones para el caso 1

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	73.309	12.887	67.977	71.184	46.415	40.405

Figura 5.22. Tiempos totales de demora en función del acceso. [s]

La media ponderada del sistema en hora punta es:

$$Tdem.media = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum \text{No. Shipped}}$$

$$Tdem.media = \frac{73309 + 12887 + 67977 + 71184 + 46415 + 40405}{1201 + 182 + 944 + 931 + 729 + 747}$$

$$Tdem.media = 65.94 \text{ segundos}$$

Al igual que se ha procedido en los anteriores capítulos, este es el valor a optimizar. Teniendo en cuenta que para este “caso 1” los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 1,24, cada vez que se supere dicho valor se le asignará un valor de la variable “t” previamente predefinido.

Para diferentes valores de esta variable, los resultados de simulación han ofrecido los siguientes resultados:

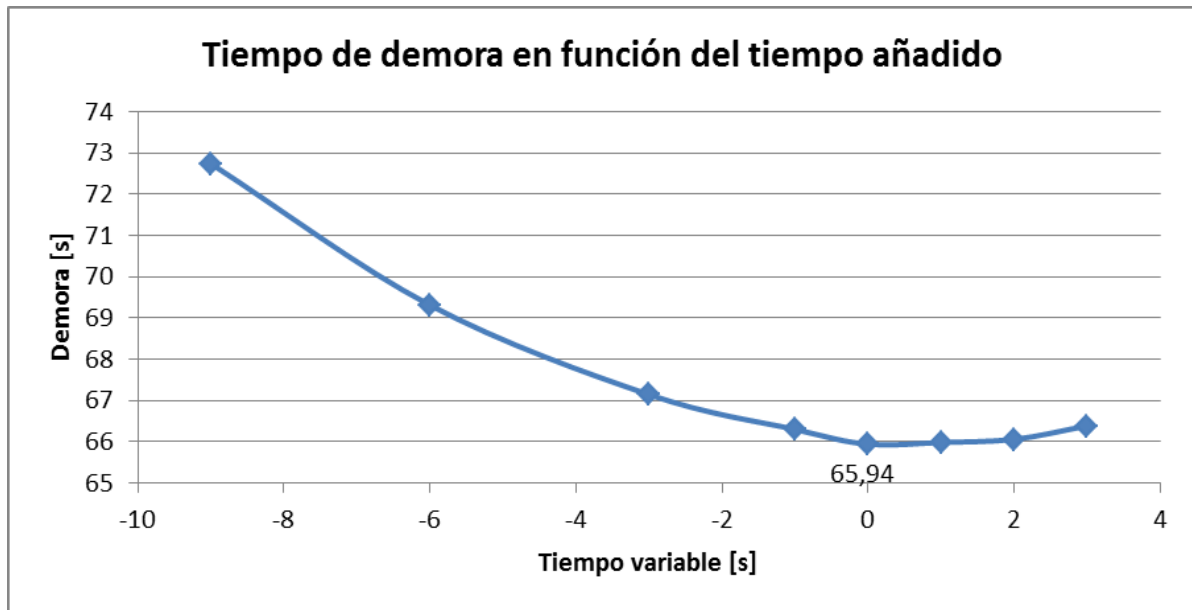


Figura 5.11. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s]
Caso 1

Como se puede observar, para valores de proporción de flujos por encima de 1,24 no se necesita ninguna modificación del programa básico de tiempos de ciclo ni de su coordinación.

5.4.2. CASO 2: Corte en Av. Diagonal y aumento de tráfico en Pau Casals

En hora valle, corte en Av. Diagonal montaña y flujo por Pau Casals se duplica

Por el efecto de un corte de tráfico en la Avenida Diagonal por la parte de montaña (entrada a Barcelona) el flujo puede verse duplicado en los accesos a la plaza por la calle Pau Casals. En estas condiciones los posibles flujos serían:

Entrada	Tiempo entre vehículos
Av. Diagonal Montaña	-
Lat. Av. Diag. Montaña	-
Av. Josep Tarradellas	19.67
Lat. Av. Diag. Mar	4.84
Av. Diag. Mar	3.84
Calle Pau Casals	7.68 / 2

Tabla 5.23. Tiempo entre vehículos para el caso 2. [s/veh]

Bajo estas condiciones y realizando la simulación correspondiente, se obtienen los siguientes resultados estadísticos:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	0	187	960	955	0	757
No. Shipped	0	182	944	931	0	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	0	5	16	24	0	10
Avg W.I.P.	0.00	3.67	19.18	20.30	0.00	11.34
Avg Time	0,00	70,64	71,92	76,54	0,00	53,92

Tabla 5.24. Valores estadísticos de las simulaciones para el caso 2

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	0	12.856	67.892	71.259	0	40.278

Tabla 5.25. Tiempos totales de demora en función del acceso. [s]

La media ponderada del sistema en hora punta es:

$$Tdem.media = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum No.Shipped}$$

$$Tdem.media = \frac{0 + 12856 + 67892 + 71259 + 0 + 40278}{0 + 182 + 944 + 931 + 0 + 747}$$

$$Tdem.media = 68.56 \text{ segundos}$$

Como en el caso 1, teniendo en cuenta que para este “caso 2” los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 0,9, cada vez que se supere dicho valor se le asignará un valor de la variable “t” previamente predefinido.

Para diferentes valores de esta variable, los resultados de simulación han ofrecido los siguientes resultados:

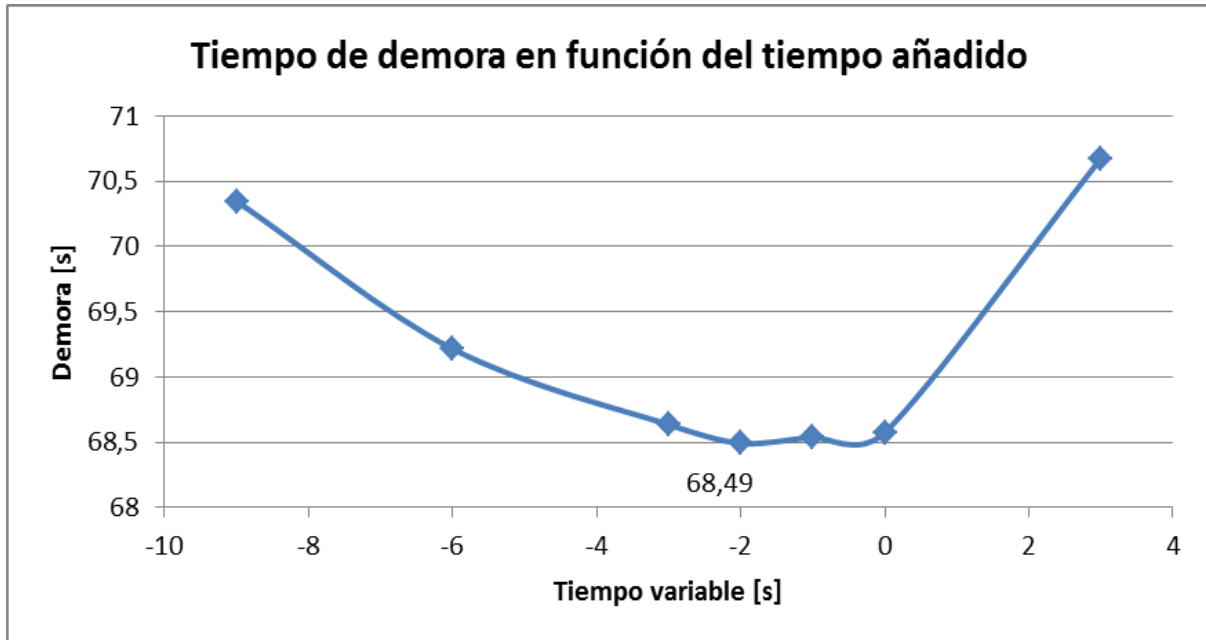


Figura 5.12. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].

Caso 2

Como se puede observar, para valores de proporción de flujos por encima de 0,9 el valor óptimo de la variable "t" es -2. Esto quiere decir que algunos semáforos acortarán su tiempo de verde, mientras que otros reducirán el tiempo de rojo.

5.4.3. CASO 3: Aumento ligero de tráfico en Pau Casals

En situación de hora valle, flujo por Pau Casals se incrementa un 30%

Debido a una variación repentina de la demanda de tráfico, el flujo puede verse incrementado en los accesos a la plaza por la calle Pau Casals. En el caso número tres, se plantea un incremento del 30% en el flujo por dicho acceso.

Para este caso también se ha supuesto un incremento del 30% en el acceso a la plaza por la Avenida Josep Tarradellas, aunque este hecho no afecta para hallar el valor óptimo ya que en la proporción sigue siendo más crítico el acceso a la plaza por Pau Casals. En estas condiciones los posibles flujos serían:

Entrada	Tiempo entre vehículos
Av. Diagonal Montaña	3.03
Lat. Av. Diag. Montaña	4.98
Av. Josep Tarradellas	19.67 / 1.3
Lat. Av. Diag. Mar	4.84
Av. Diag. Mar	3.84
Calle Pau Casals	7.68 / 1.3

Tabla 5.26. Tiempo entre vehículos para el caso 3. [s/veh]

En estas condiciones y realizando la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1218	242	960	622	740	757
No. Shipped	1201	235	944	608	729	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	17	7	16	14	11	10
Avg W.I.P.	20.67	5.06	19.22	11.87	13.05	11.37
Avg Time	61,08	75,33	72,06	68,72	63,48	54,07

Tabla 5.27. Valores de las simulaciones para el caso 3

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	73.357	17.703	68.025	41.782	46.277	40.390

Tabla 5.28. Tiempos totales de demora en función del acceso. [s]

La media ponderada del sistema en hora punta es:

$$T_{dem.media} = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum \text{No. Shipped}}$$

$$T_{dem.media} = \frac{73357 + 17703 + 68025 + 41782 + 46277 + 40390}{1201 + 235 + 944 + 608 + 729 + 747}$$

$$T_{dem.media} = 64.41 \text{ segundos}$$

Como los casos anteriores, y teniendo en cuenta que para este “caso 3” los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 1,87, cada vez que se supere dicho valor se le asignará un valor de la variable “t” previamente predefinido. Para diferentes valores de esta variable, los resultados de simulación han ofrecido los siguientes resultados:

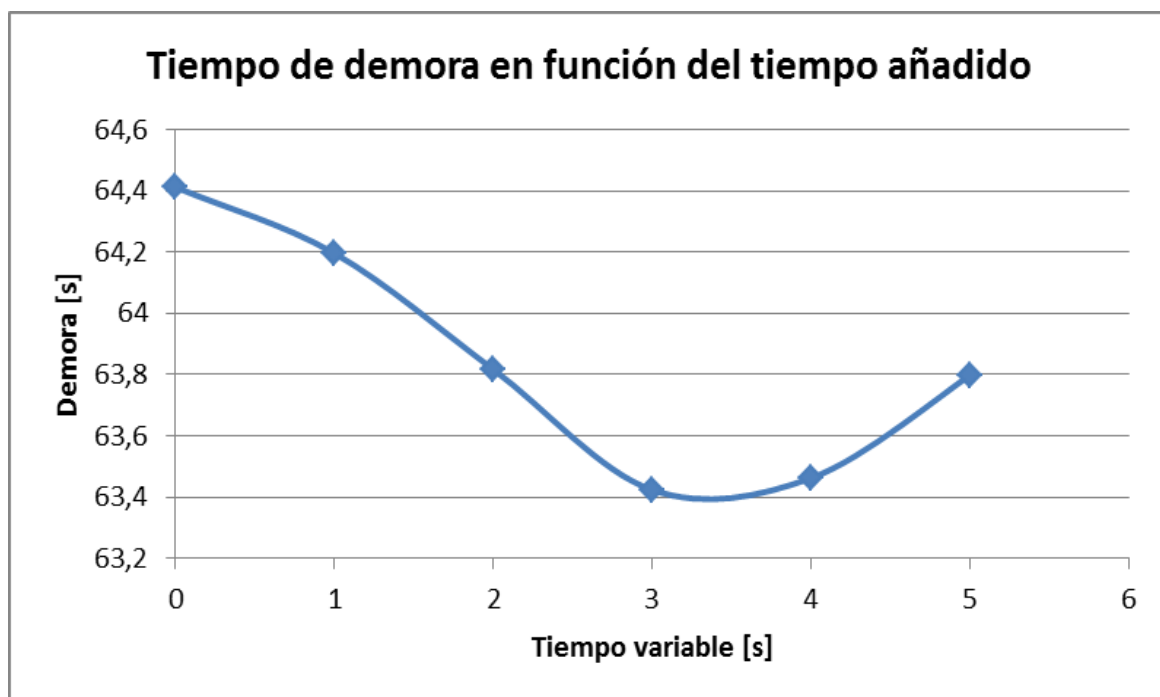


Figura 5.13. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].
Caso 3

Como se puede observar, para valores de proporción de flujos por encima de 1,87 el valor óptimo de la variable “t” se sitúa ligeramente por encima de los 3 segundos.

5.4.4. CASO 4: Aumento del 50% de flujo en Pau Casals

En situación de hora valle, flujo por Pau Casals se incrementa un 50%

Al igual que en el caso número tres, se plantea un incremento del flujo por una situación concreta del tráfico. En este caso número cuatro se propone un incremento del 50% en el flujo por dicho acceso. También se ha vuelto a suponer un incremento del 50% en el acceso a la plaza por la Avenida Josep Tarradellas, aunque ya se ha visto que este hecho no afecta para hallar el valor óptimo de la variable "t". En estas condiciones los posibles flujos serían:

Entrada	Tiempo entre vehículos
Av. Diagonal Montaña	3.03
Lat. Av. Diag. Montaña	4.98
Av. Josep Tarradellas	19.67 / 1.5
Lat. Av. Diag. Mar	4.84
Av. Diag. Mar	3.84
Calle Pau Casals	7.68 / 1.5

Tabla 5.29. Tiempo entre vehículos para el caso 4. [s/veh]

Bajo estas condiciones y realizando la simulación correspondiente, se obtienen los siguientes resultados estadísticos:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	1218	277	960	714	740	757
No. Shipped	1201	270	944	698	729	747
No. Rejected	0	0	0	0	0	0
W.I.P.	17	7	16	16	11	10
Avg W.I.P.	20.67	5.35	19.25	14.15	13.07	11.35
Avg Time	61,09	69,49	72,19	71,36	63,59	53,99

Tabla 5.30. Valores de las simulaciones para el caso 4

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	73.369	18.762	68.147	49.809	46.357	40.331

Tabla 5.31. Tabla con los tiempos totales de demora en función del acceso. [s]

La media ponderada del sistema en hora punta es:

$$Tdem.media = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum No.Shipped}$$

$$Tdem.media = \frac{73369 + 18762 + 68147 + 49809 + 46357 + 40331}{1201 + 277 + 944 + 698 + 729 + 747}$$

$$Tdem.media = 64.67 \text{ segundos}$$

Como los casos anteriores, y teniendo en cuenta que para este “caso 4” los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 1,65, cada vez que se supere dicho valor se le asignará un valor de la variable “t” previamente predefinido. Para diferentes valores de esta variable, los resultados de simulación han ofrecido los siguientes resultados:

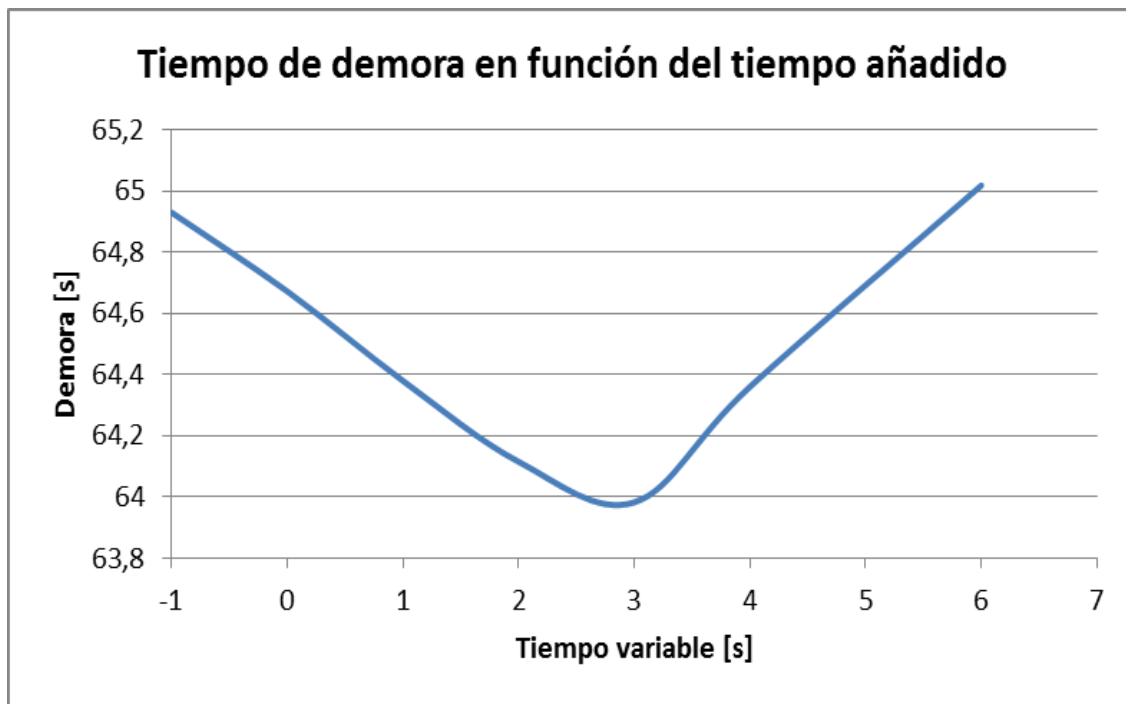


Figura 5.14. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].

Caso 4

Como se puede observar, para valores de proporción de flujos por encima de 1,65 el valor óptimo de la variable "t" se sitúa también alrededor de los 3 segundos.

5.4.5. CASO 5: Aumento de tráfico en hora punta por Av. Diagonal

En situación de hora punta, flujo por Avenida Diagonal se incrementa un 30%

En el último caso propuesto, se ha supuesto un incremento excepcional en la Avenida Diagonal en ambos sentidos de circulación (tanto por los carriles centrales como por los laterales. Se trata de una situación puntual de sobresaturación de la vía. En este caso número cinco se propone un incremento del 30% en el flujo por estos cuatro accesos. En estas condiciones los posibles flujos serían:

Entrada	Tiempo entre vehículos
Av. Diagonal Montaña	1.8 / 1.3
Lat. Av. Diag. Montaña	3.09 / 1.3
Av. Josep Tarradellas	11.12
Lat. Av. Diag. Mar	3.06 / 1.3
Av. Diag. Mar	2.16 / 1.3
Calle Pau Casals	5.2

Tabla 5.32. Tiempo entre vehículos para el caso 5. [s/veh]

Bajo estas condiciones y realizando la simulación correspondiente, se obtienen los siguientes resultados estadísticos:

Name	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
No. Entered	2444	328	2201	708	1252	1542
No. Shipped	2347	316	2145	689	1188	1521
No. Rejected	261	0	20	0	324	21
W.I.P.	97	12	56	19	64	21
Avg W.I.P.	102.37	7.06	54.11	16.18	62.95	25.36
Avg Time	150,80	77,51	88,50	82,29	181,01	59,22

Tabla 5.33. Valores de las simulaciones para el caso 5

	Ent Diag Mont	Ent Tarr	Ent Diag Mar	Ent Pau	Ent Lat Diag Mont	Ent Lat Diag Mar
Tiempo demora por entrada	353.928	24.493	189.833	56.698	215.040	90.074

Tabla 5.34. Tiempos totales de demora en función del acceso. [s]

La media ponderada del sistema en hora punta es:

$$T_{dem.media} = \frac{\sum \text{tiempo demora por entrada}}{\sum \text{No. Shipped}}$$

$$T_{dem.media} = \frac{353928 + 24493 + 189833 + 56698 + 215040 + 90074}{2347 + 316 + 2145 + 689 + 1188 + 1521}$$

$$T_{dem.media} = 113.34 \text{ segundos}$$

Como los casos anteriores, y teniendo en cuenta que para este “caso 5” los valores de proporción de flujos entre los accesos del grupo 1 y los del grupo 2 siempre permanecen por encima de 3,5, cada vez que se supere dicho valor se le asignará un valor de la variable “t” previamente predefinido.

Para diferentes valores de esta variable, los resultados de simulación han ofrecido los siguientes resultados:

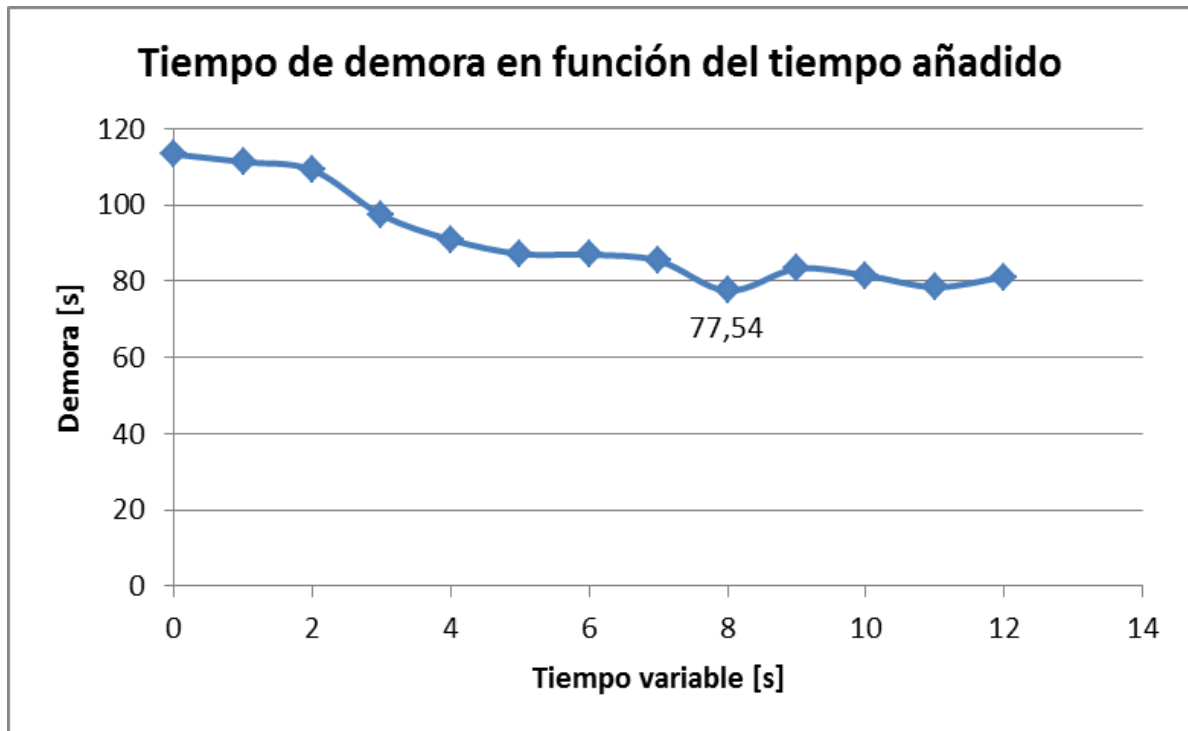


Figura 5.15. Gráfico de demora [s] en función del tiempo de ampliación de verde/rojo [s].

Caso 5

Como se puede observar, para valores de proporción de flujos por encima de 3,5 no parece que exista un valor óptimo de la variable “t” que sitúe claramente la demora total en una cota mínima.

Sin embargo, si se analizan los resultados estadísticos se puede observar que existe un valor de “t” a partir del cual los vehículos que acceden al sistema por el acceso de Pau Casals ya no pueden ser introducidos debido a que el acceso está bloqueado (a partir de $t = 9$ segundos).

"t" [s]	No. Rejected
7	0
8	0
9	6
10	41
11	161
12	226

Tabla 5.35. Número de vehículos que no pueden entrar en el sistema por Pau Casals en función del valor de "t"

Por lo tanto, para valores de proporción de flujos por encima de 3,5 el valor que se le otorgará a la variable "t" será de 8 segundos. De esta manera se consigue la menor demora posible sin que haya vehículos rechazados por el sistema.

5.5. Algoritmo definitivo

Una vez realizados todos los ensayos con los principales escenarios planteados, ya se puede crear un algoritmo único que sirva para el funcionamiento óptimo en tiempo real. Al haber realizado diferentes casuísticas de situaciones de tráfico se ha podido abarcar un rango muy elevado de posibles proporciones entre los flujos de tráfico.

A partir de estos valores de proporción de flujo, se ha considerado que por encima de una proporción de 3,5 el valor de "t" se mantendrá en 8 segundos, y para valores de proporción inferiores a 0,9 el valor de "t" será -2 segundos.

En el gráfico que se presenta a continuación se puede observar como resulta el algoritmo definitivo una vez tomadas las decisiones respecto a los extremos.

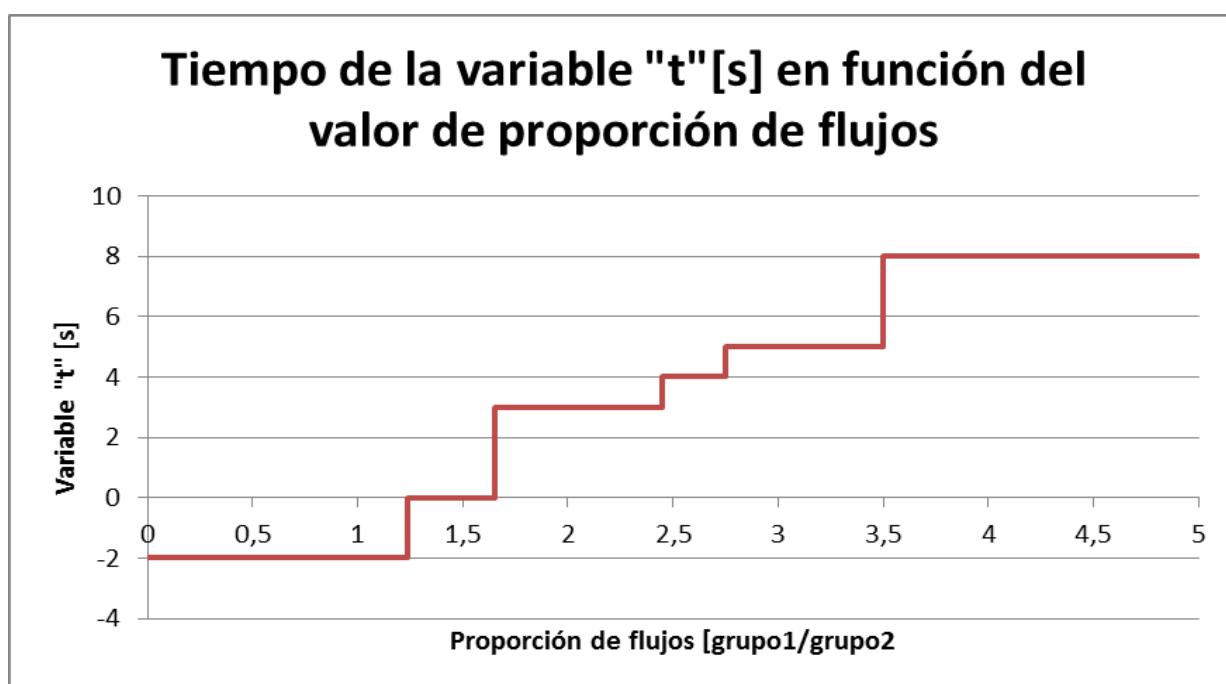


Figura 5.16. Gráfico del Tiempo [s] de la variable "t" en función del valor de proporción de flujos [s]

Atendiendo a estas decisiones, mediante la implantación de cámaras IP, un software y un lenguaje de programación que incluya estas restricciones para cada uno de los semáforos de la plaza, se pueden modificar los tiempos semafóricos cada tiempo de ciclo si fuera necesario.

6. Conclusiones

La plaza Francesc Macià es uno de los puntos de la ciudad de Barcelona donde se acumulan un mayor número de situaciones de tráfico distintas a lo largo del día. Aunque es una realidad que el parque automovilístico en España sigue una tendencia lineal (o incluso un poco decreciente), se debe tener en cuenta que el área geográfica ocupada por la plaza es clave para una buena distribución del tráfico. Poder optimizar los tiempos de los semáforos permite una mayor fluidez de los vehículos que entran o salen de la ciudad.

Para poder realizar el estudio del comportamiento del tráfico, se ha realizado la simulación de situaciones de tráfico con la ayuda de un software y de un programa semafórico base. Una vez analizadas las situaciones, se ha buscado un valor óptimo de tiempo de verde para cada una de ellas.

Tras estas simulaciones se han realizado estudios estadísticos para llegar a las principales conclusiones del proyecto:

- El programa base recibido no resulta óptimo para las principales situaciones de tráfico como son las horas valle y las horas punta.
- Sabiendo que no se consigue el óptimo, y conociendo la variabilidad del tráfico a lo largo de un día, se ha realizado una propuesta de semaforización en tiempo real.
- En el análisis se ha comprobado que para cada situación de tráfico es necesario un programa semafórico diferente para poder optimizar el tiempo que los vehículos se demoran en salir de la plaza. Los resultados obtenidos han resultado satisfactorios, no pudiendo asegurar que son los óptimos debido a que los recursos para la realización del proyecto han sido limitados.
- Se necesita un sistema que sea capaz de recibir información de los flujos entrantes de manera que se pueda conocer la situación de tráfico en cada instante. Para el control del tráfico la opción que puede ofrecer mejores resultados es la instalación de cámaras IP, que controlen el flujo entrante por cada uno de los accesos.
- La implementación de este proyecto supone un beneficio social doblemente importante, ya que al ahorro de tiempo para los conductores se unen el ahorro energético en combustible y la reducción de gases contaminantes emitidos.

7. Estudio Económico

A continuación se expone un estudio económico para cuantificar los costes del proyecto.

Para calcular el presupuesto del proyecto se han tenido en cuenta los gastos generados por personal, así como los costes de hardware, software o material fungible.

Coste de personal	
Ingeniero industrial (600horas x 60€/h)	36.000€
Programador (100horas x 20€/h)	2.000€
Coste de Hardware	
Ordenador de sobremesa	600€
Cámaras IP (6 cámaras x 500€/cámara)	3.000€
Coste de software	
Licencia programa Witness 2006 Professional	1.200€
Otro software (traducción imagen-flujo)	1.000€
Otros costes	
Material fungible (Papel, material de oficina...)	200€
Material de obra (ej: semáforos de obra)	500€

SUBTOTAL	44.500€
+21% IVA	9.345€
TOTAL	53.845€

8. Estudio ambiental

Todas las mejoras propuestas en los apartados anteriores tienen efectos significativos sobre el medio ambiente.

La reducción de los tiempos de demora para los vehículos que acceden a la plaza Francesc Macià no solo significa la obtención de una optimización en el transporte urbano de esa zona, sino que también comporta una disminución de los gases de CO₂ a la atmósfera.

El estudio ambiental se basa en algunas suposiciones previas a la realización de los cálculos que permiten cuantificar la disminución de los gases de CO₂ emitidos:

- A lo largo de un año, la distribución de estados del tráfico se considera la siguiente:

CASO	Porcentaje	Disminución del Tiempo de demora [h / h tráfico]	Disminución en función de la distribución de situaciones de tráfico [h / h tráfico]
Punta	25%	6.42	1.61
Valle	50%	1.04	0.52
Caso1	6%	0	0
Caso2	6%	0.05	0.003
Caso3	6%	1.15	0.069
Caso4	6%	0.83	0.05
Caso5	1%	95.55	0.96

Tabla 8.1. Distribución de situaciones de tráfico y el ahorro de tiempo por hora de tráfico

A partir de los datos de las simulaciones y la distribución de estados de tráfico, se obtienen los valores de ahorro al cabo de una hora de tráfico, multiplicando para cada caso el ahorro en demora por la cantidad de vehículos que acceden a la plaza en esa hora y su distribución. Disminución Total = 3,205 h / h tráfico

- La velocidad media de los vehículos en la plaza Francesc Macià se ha considerado de 20 km/h
- Las emisiones medias de CO₂ por km recorrido son de 150 g, ya que los vehículos de compra en los últimos dos años están alrededor de los 135 g/km (año 2012) y los últimos quince años ha ido disminuyendo progresivamente desde los 170 g/km (ver tabla 8.1) hasta los valores actuales.

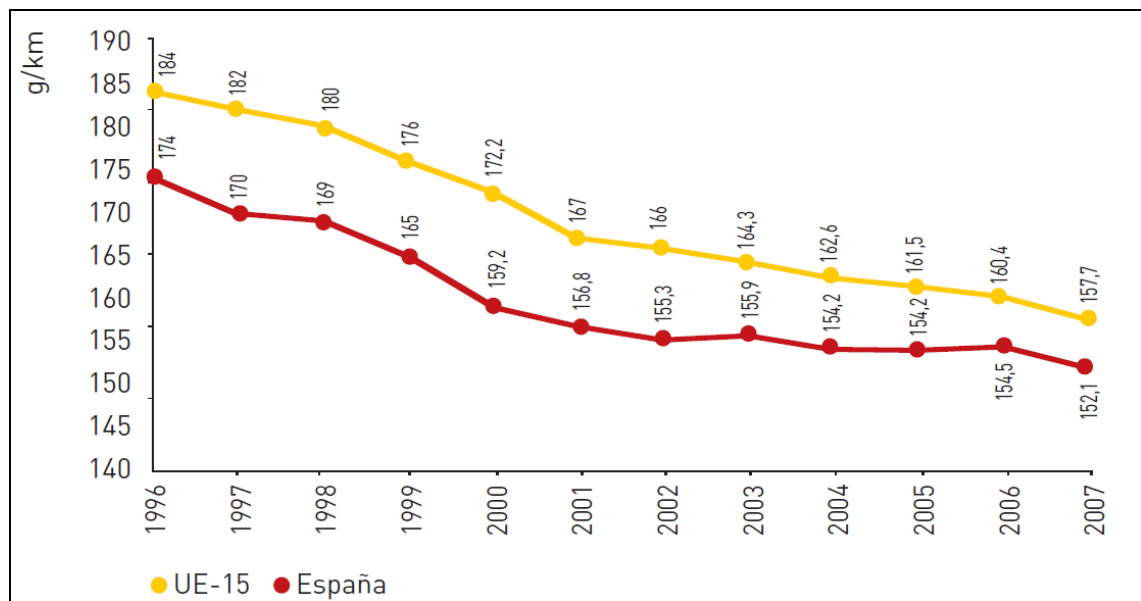


Figura 8.1. Tabla de evolución de las emisiones de GEI por km recorrido [g/km] 1996-2007

Una vez realizadas las hipótesis necesarias para los cálculos, se puede realizar la estimación de la mejora ambiental que supone aplicar el proyecto de semaforización dinámica en el área geográfica a estudio. El ahorro anual de CO₂ será, por tanto:

$$\begin{aligned}
 \text{tiempo ahorrado} \left[\frac{h}{h \text{ tráfico}} \right] * \text{velocidad media} \left[\frac{km}{h} \right] * \text{emisiones medias} \left[\frac{g \text{ CO}_2}{km} \right] * \frac{8760h}{\text{año}} = \\
 = 3,205 \left[\frac{h}{h \text{ tráfico}} \right] * 20 \left[\frac{km}{h} \right] * 150 \left[\frac{g \text{ CO}_2}{km} \right] * \frac{8760h}{\text{año}} \\
 \text{Ahorro CO}_2 = \frac{84.225.223}{1000} = 84.225,22 \text{ kg CO}_2/\text{año}
 \end{aligned}$$

9. Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, al Departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Barcelona que propusiera este proyecto a la universidad. Tener la oportunidad de trabajar sobre proyectos con posible impacto inmediato en la vida real es una buena manera de terminar la formación de ingeniería industrial.

Agradecer a mi familia y amistades el constante apoyo que me han dado estos meses.

Por último al tutor del proyecto, David Gallegos, agradecerle la buena dirección que me ha ofrecido a lo largo de este tiempo.

10. Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Gallegos, David. Gestión del tránsito: UPC, sin fecha
- [2] Santos, Ma. Antònia de los; Xavier Roselló; Laia Ferrer. Transports. Barcelona: CPDA-ETSEIB, 2003
- [3] Página web sobre métodos de conteo, [<http://www.tyssatransito.com>], marzo 2012
- [4] Página web sobre detección de vehículos: [<http://www.sistemasdepesaje.com>], marzo 2012
- [5] Página web sobre movilidad en Barcelona: [<http://w110.bcn.cat/portal/site/Mobilitat>], junio 2012
- [6] Página web sobre el parque automovilístico en España y su evolución:
[\[http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seguridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/2010.pdf\]](http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/documentos/seguridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/2010.pdf), junio 2012

Bibliografía complementaria

- [7] Página web con información relacionada con Cataluña [<http://gencat.cat/>], junio 2012