



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Optimización de Perfiles de Conducción en Circuito Urbano con Incertidumbre



Trabajo Final de Grado en Ingeniería
Aeroespacial

Jaime Carrillo Cayuela

Tutor: Benjamín Pla Moreno

Cotutor: Alberto Reig Bernad

Resumen

Actualmente, la economía es un tema de gran interés para la sociedad, ya que ésta parece encontrarse en una situación inestable y nada predecible. Así mismo, el mundo va adquiriendo mayor conciencia medio ambiental, y tanto la contaminación, como el calentamiento global o tratar de hacer de éste un mundo sostenible también resultan ser preocupaciones serias para la sociedad.

Uno de los asuntos que enlaza estos temas es el combustible para los vehículos cotidianos, tales como vehículos. Este tipo de vehículos se sirven de combustible para funcionar, lo cual supone contribuir a la contaminación y al efecto invernadero, acelerando el deterioro del planeta.

Por otro lado, los recursos energéticos y las reservas de petróleo son factores con un gran peso sobre la economía mundial, así como el combustible sobre la economía propia de una familiar o de un individuo.

Es por ello que en este proyecto se elabora un método que permita definir una estrategia de conducción que minimice la esperanza de consumo de combustible en un trayecto urbano específico, dado un tiempo para recorrerlo, y teniendo en cuenta incertidumbres; es decir, posibles eventos que puedan suceder e impongan restricciones sobre la velocidad del vehículo.

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a mi familia, y en especial a mis padres, por todo el esfuerzo que hacen para que mi hermano y yo podamos estudiar y por el apoyo incondicional que siempre nos ofrecen.

En segundo lugar, y aunque no soy una persona muy dada a las alabanzas, quisiera reconocer la comprensión y paciencia que mi tutor, Benjamín Pla, ha tenido conmigo, pues se la has visto y deseado tratando de entender las enrevesadas explicaciones que yo le daba sobre cualquier aspecto del trabajo. Además del buen ambiente que trata de propiciar con la gente de su entorno, también procura alentarlos para que saquen lo mejor de sí mismos, un punto muy positivo a su favor; aunque a veces parezca que nos quiera hacer trabajar de más.

También he de agradecer el tiempo que Alberto Reig, mi cotutor, ha dedicado aclarar todas las dudas que a lo largo del proyecto han surgido en mi cabeza. Siempre al pie del cañón dispuesto a ayudar.

Por último, tampoco puedo olvidarme de Pau, Javi, Alfonso y Chema, que junto con Alberto y el resto de doctorandos del despacho han amenizado los días de trabajo y con los que he disfrutado de numerosos y divertidos almuerzos.

Índice

Resumen	I
Agradecimientos	III
I Memoria	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes	5
1.3. Objetivo	6
2. Modelo	9
2.1. Introducción al vehículo convencional	9
2.2. Modelo	10
2.2.1. Dinámica del vehículo	11
2.2.2. Motor Térmico	14
2.2.3. Transmisión	18
2.3. Resolución del modelo	20
3. Metodología	23
3.1. Descripción del problema de optimización	23
3.2. Herramienta auxiliar	26
3.2.1. Optimizador	26
3.2.2. Base de datos	31
3.3. Método de resolución	34
3.3.1. Elección de la solución óptima	42
3.4. Validez del método	49
4. Análisis de los Resultados	53
5. Conclusiones	67
II Presupuesto	73

I Memoria

Apartado 1

Introducción

Subapartados:

1.1. Motivación	3
1.2. Antecedentes	5
1.3. Objetivo	6

1.1. Motivación

En el mundo que hoy conocemos, la globalización es una realidad abrumadora: las personas somos capaces de comunicarnos instantáneamente desde prácticamente cualquier parte del mundo, las noticias vuelan a través de la red, etc. Es por ello que nuestro radio de acción ya no sólo es nuestro vecindario o nuestra localidad, es el mundo entero.

La globalización no sólo nos lleva a tener noticias de un sitio u otro, sino que además nos permite recorrer el planeta físicamente en relativo poco tiempo, ya sea en avión, tren o vehículo. De esta manera, podemos visitar rincones paradisíacos al otro lado del mundo o tener en nuestro armario la ropa de moda de la pasarela de Milán.

Los medios de transporte juegan un papel fundamental en este fenómeno, por lo que a cualquier hora del día hay millones de vehículos circulando, barcos surcando los mares, máquinas ferroviarias atravesando continentes y aviones imprimiendo sus estelas en el cielo. Y cada vez, el uso de estos medios aumenta.

Lógicamente, además de ser necesarios en nuestro día a día, los medios de transporte tienen un serio impacto sobre el medio ambiente, además de en la economía. Ya no sólo

requieren gente trabajando en el mantenimiento de estas máquinas, ni que piloten aviones o conduzcan autobuses ni que dirijan este tipo de empresas; requieren recursos energéticos para poder funcionar.

Pues bien, a no ser que se empleen las energías renovables, debemos recurrir a la explotación de las fuentes de recursos energéticos existentes en la Tierra, las cuáles son finitas: ni el carbón, el petróleo o el gas natural son ilimitados. Por esto es, que además de todo el empleo que generan, también influyen en la economía a través del consumo de recursos energéticos que suponen.

Así mismo, vivimos en una época de resentimiento económico para la mayoría de la población, en la cuál los precios (incluido el de los combustibles fósiles) no dejan de subir ni el poder adquisitivo de bajar. En esta época, también es creciente la preocupación ciudadana por el medio ambiente: el calentamiento global y la especulación sobre las reservas de petróleo y otros recursos energéticos fósiles son temas que generan una gran alarma.

Consecuentemente, es tarea de los ingenieros tratar de minimizar el consumo de combustible por parte de los vehículos, pero también es tarea de los ciudadanos usar de forma adecuada los medios de transporte para perjudicar al medio ambiente lo menos posible y alargar la vida del planeta, así como la de las mismas fuentes de recursos energéticos, pues son de gran valor.

Por otro lado, la automatización es una constante en la industria, y es uno de los factores más importantes del desarrollo industrial. En este sector, siempre que algún proceso puede ser automatizado, se implementa el sistema físico para ello. De hecho, la automatización y el control automático son tan importantes que ha llegado hasta el transporte. Un ejemplo de ello son los frenos de seguridad instalados en los trenes de alta velocidad.

Y es más, está de moda la investigación acerca de la conducción autónoma de vehículos tales como los automóviles. Empresas como 'Nissan', 'Toyota' o 'Google'

Apartado 1. Introducción.

estudian prototipos de vehículos en los cuales el ordenador de a bordo, con ayuda de un GPS y sensores para observar el entorno, dirige el vehículo de un punto a otro.

Con todo esto en mente, surge la idea de este trabajo: definir un método para hallar perfiles de conducción para un trayecto dado que minimicen el consumo de combustible sin saber a ciencia con que eventos nos vamos a encontrar en el camino. Esto podría servir como punto de partida para aplicaciones cuyo fin sea ayudar al usuario a minimizar el consumo de combustible o que permitan que el ordenador de a bordo de un automóvil realice el trayecto fijado con el menor consumo posible.

El hecho de elegir un automóvil como vehículo al que destinar este método se debe a que es el medio de transporte más accesible y el de uso más extendido.

1.2. Antecedentes

Como es lógico, este no es el primer estudio o proyecto sobre modelos de conducción eficiente ni automática. Es un tema de gran interés para empresas e investigadores. De hecho, ya hay en el mercado automóviles capaces de aparcar de forma automática, véase vehículos de marcas como 'Volkswagen', 'Mercedes-Benz' y 'BMW', cuyos respectivos sistemas de aparcamiento automático se llaman *Park Assist*, *Active Park Assis* y *Park Assistant*.

También entrarán al mercado hacia finales de 2018 automóviles con conducción autónoma diseñada para atascos pertenecientes a los constructores 'Peugeot' y 'Citroën'.

Otras marcas como 'BMW', 'Nissan', 'Renault', 'Toyota' y 'Volvo' entre otros, pretenden sacar nuevos modelos equipados con tecnología de conducción autónoma a partir de la década que viene.

De igual manera, podemos encontrar estudios centrados en hallar (mediante la computación) perfiles de conducción que maximicen la eficiencia en carretera, es decir, centrados en gastar el mínimo combustible posible.

Un ejemplo del tipo de estudios anterior es el realizado en 2012 por Miguel Villeta, Tamara Lahera, Silvia Merino, José G. Zato, José E. Naranjo y Felipe Jiménez: ‘Modelo para la Conducción Eficiente y Sostenible basado en Lógica Borrosa’. El método que se utiliza en este estudio, ‘Lógica Borrosa’, difiere del empleado en este trabajo, ‘Programación No Lineal’ y ‘Programación Dinámica’; pero ambos tienen en común una cosa: su objetivo es minimizar el consumo energético del vehículo tratando de imitar la forma de conducción humana.

1.3. Objetivo

En el trabajo realizado, se desarrolla un método para establecer una política de conducción que minimice el consumo de combustible en circuito urbano con incertidumbre sobre los eventos que pueden aparecer en el trayecto dado. El circuito urbano es uno de los escenarios más difíciles para deducir el perfil óptimo de conducción con el fin de ahorrar combustible, pues pueden ocurrir eventualidades de todo tipo. Y más difícil aún si se quisiera implementar un sistema de conducción autónoma.

Por ello, en este trabajo se ha optado por limitar el estudio del perfil de conducción sólo teniendo en cuenta semáforos como elementos restrictivos de la velocidad del vehículo. Se podría ampliar el estudio de la casuística del trazado si dispusiéramos de mayor información de la calzada: nivel de tráfico, eventos puntuales (como que se cruce un balón por la carretera), etc.

Para facilitar el seguimiento de los perfiles de conducción óptimos elaborados, representamos el valor de distintas variables a lo largo del recorrido: velocidad, marcha engranada, par motor, régimen de giro del motor, posición de los pedales de acelerador y de freno, consumo instantáneo de combustible y consumo acumulado de combustible.

Debido a la complejidad del problema, resultaría una locura tratar de resolverlo analíticamente, por tanto, el procedimiento para la solución del problema recurre a métodos numéricos y la discretización del trayecto en multitud de puntos.

Apartado 1. Introducción.

La deducción de estos perfiles de conducción no es tarea simple, sino que requiere un método complejo para alcanzar el objetivo, además de unas herramientas auxiliares que posibiliten el cálculo del perfil de conducción que minimiza el combustible gastado para una distancia establecida y agilicen la elección de los mismos.

En primer lugar, la herramienta utilizada para obtener el perfil óptimo de conducción se basa en técnicas de ‘programación no lineal’. Estas técnicas de optimización de problemas necesitan que el sistema de ecuaciones que lo conforma sea planteado según un modelo: las ecuaciones, condiciones de contorno y restricciones del problema han de ser establecidas de un modo en concreto.

Debido a esto, antes de calcular ningún perfil de velocidad óptimo necesitamos plantear y analizar el sistema físico que pretendemos resolver (por el cuál se rige el movimiento del vehículo); para después, simplificar dicho sistema. El sistema físico a estudiar se corresponde con el de un vehículo convencional, es decir, de motor térmico exclusivamente¹.

En segundo lugar, la herramienta necesaria para agilizar el proceso de elección de dichos perfiles consiste en una base de datos con el consumo total de distintos perfiles de conducción. El hecho de calcular un perfil de conducción entero para luego comparar consumos y escoger el que más combustible ahorre es bastante costoso, mientras que resulta más rápido interpolar en la base de datos para determinar los perfiles que más combustible ahorren.

El último paso para elegir las distintas combinaciones de tipos de conducción para la casuística de incertidumbres estudiada presenta similitudes con los métodos de optimización por ‘fuerza bruta’ y por ‘programación dinámica’. Necesita conocer el problema en su totalidad para poder deducir la solución óptima. Ahora bien, quizá se parezca más al método de ‘programación dinámica’ por su capacidad de realizar ciertos descartes que den agilidad a la resolución del problema.

¹ Motor de un Citroën C5 HDI 160, 2008.

Apartado 2

Modelo

Subapartados:

2.1. Introducción al vehículo convencional	9
2.2. Modelado	10
2.2.1. Dinámica del vehículo	11
2.2.2. Motor térmico	14
2.2.3. Transmisión	18
2.3. Resolución del modelo	20

2.1. Introducción al vehículo convencional

Por vehículo convencional se entiende aquél que tiene un motor térmico, ya sea de gasolina o diésel, sobrealimentado o no. El tipo de motores térmicos equipados en los automóviles consiste en motores de combustión interna alternativos (MCIA), por lo que no son de flujo continuo.

En los motores de combustión interna alternativos, la combustión tiene lugar en el interior de los cilindros, de forma que ésta no pueda producirse en más de un cilindro al mismo tiempo y así tener un empuje “continuo”. Estos cilindros trasladan su energía cinética al cigüeñal, el cual está conectado mediante un sistema de transmisión al eje de las ruedas.

La caja de transmisión entrega la potencia generada en el motor, salvo por las pérdidas que se puedan tener, al eje de las ruedas; pero modifica el par y el régimen de

giro suministrado en función de la marcha en granada. Esto permite tener mayor control sobre la aceleración y la velocidad que inducen las ruedas sobre el conjunto del vehículo.

Dado que la potencia entregada a las ruedas es la misma o casi igual a la generada durante la combustión en el motor, y la potencia es momento por régimen de giro, si la rueda gana velocidad angular frente al eje del motor pierde momento respecto al mismo; y al revés, si gana momento pierde velocidad.

En el siguiente esquema podemos ver cómo está articulada la planta motriz de un automóvil convencional:

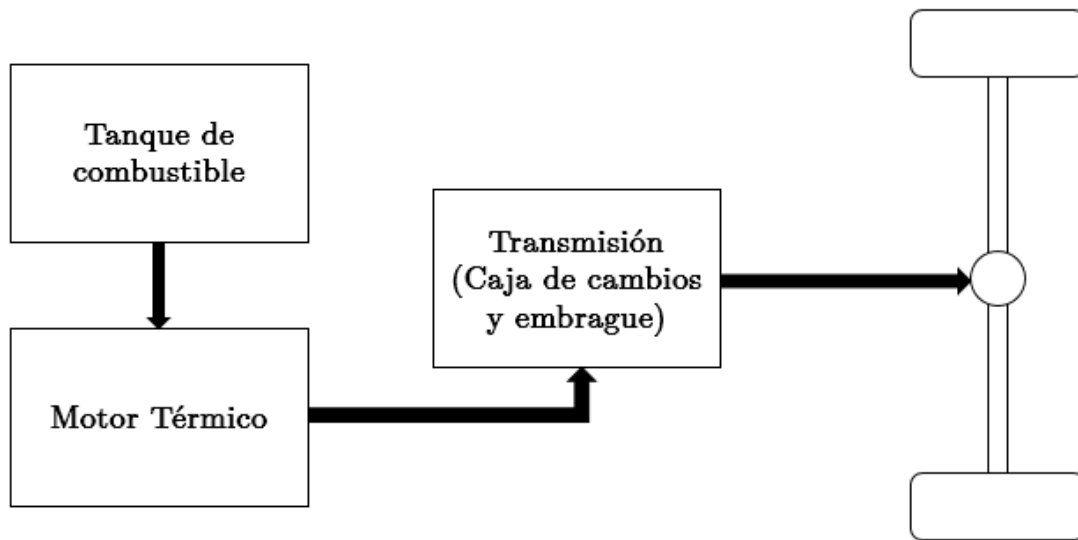


Figura 2.1.

2.2. Modelado

Para establecer un método que permita seleccionar el perfil de conducción asociado al mínimo consumo de combustible, en un tramo dado, es necesario plantear primero el sistema físico que relaciona el motor del automóvil con las fuerzas que actúan sobre el mismo.

Apartado 2. Modelado.

El modelo físico a implementar consiste en un balance energético y de fuerzas. Ahora bien, este modelo no es totalmente fiel a la realidad pues presenta simplificaciones y aproximaciones, por ejemplo: coeficientes para determinar ciertas fuerzas, como puede ser la del rozamiento de las ruedas con la calzada.

Aunque poner en práctica simplificaciones supone introducir cierto error, éstas se eligen de tal manera que los resultados difieran lo mínimo posible de la realidad y así tener un modelo válido. En cualquier problema de ingeniería es conveniente introducir ciertas simplificaciones, pues permiten obtener resultados prácticamente iguales a los reales pero facilitando y reduciendo el trabajo.

2.2.1. Dinámica del vehículo

Sobre el automóvil actúan una serie de fuerzas de forma continuada durante todo el trayecto, pero las que importan para nuestro estudio son sólo aquellas que afectan al balance energético entre el motor y el resto del vehículo, es decir, las que modifican el rendimiento propulsivo.

La energía que desarrolla el motor se reparte entre las pérdidas del mismo y de la transmisión, la energía cinética y la potencial del vehículo, las pérdidas por la resistencia aerodinámica y las pérdidas por fricción entre las ruedas y la calzada. En la figura 2.2 podemos apreciar el sistema de fuerzas que afectan al sistema motriz del vehículo.

Para el balance de fuerzas consideraremos que el vehículo es un cuerpo puntual, por lo que aproximaremos las pérdidas aerodinámicas con un coeficiente, y lo mismo con el rozamiento. Por tanto, tenemos la ecuación:

$$F_M = F_{fr} + F_r + R_{aero} + F_p + F_{iner} \quad (2.1)$$

donde F_M se corresponde con la fuerza demanda por el vehículo al sistema motriz, F_{fr} con la fuerza ejercida por el freno, F_r con la fuerza de rozamiento debida a la fricción entre rueda y carretera, R_{aero} con la resistencia aerodinámica, F_p con la fuerza generada

por la pendiente de la calzada y F_{iner} con la fuerza inercial del vehículo, es decir, la debida a la aceleración del vehículo.

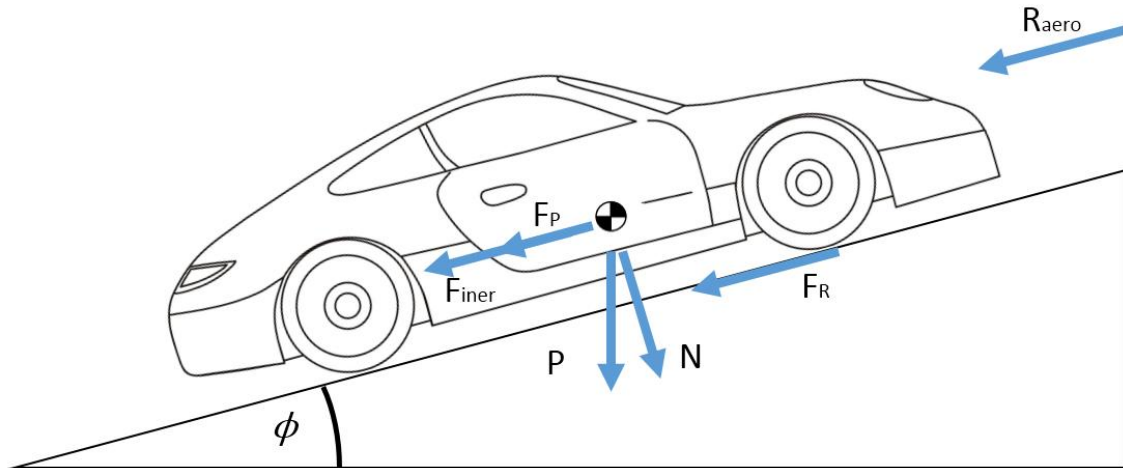


Figura 2.2.

Pasando a analizar los distintos términos de la ecuación anterior, empezaremos por el freno. La fuerza del freno depende del grado con el que se pise, por lo que se puede ajustar a la expresión:

$$F_{fr} = \alpha_{fr} \cdot F_{fr,max} \quad (2.2)$$

en esta ecuación, $F_{fr,max}$ es la fuerza máxima de frenado que se puede ejercer y α_{fr} el tanto por uno con el que es pisado el pedal de freno.

La expresión de la fuerza debida al rozamiento puede escribirse como:

$$F_r = C_f \cdot m_{veh} \cdot g \cdot \cos \phi \quad (2.3)$$

donde C_f es el coeficiente de fricción, m_{veh} es la masa del vehículo, g es la constante de gravitación terrestre y ϕ es la pendiente del camino. El valor del coeficiente de fricción depende de varios parámetros: estado de los neumáticos, estado de la carretera, el tipo de superficie, la velocidad del vehículo...; pero por lo general, su valor suele situarse en el rango 0.01-0.02, suponiendo una fuerza contraria al movimiento del vehículo equivalente a un muy bajo porcentaje del peso del vehículo.

Apartado 2. Modelado.

La resistencia aerodinámica del vehículo depende de la distribución de presiones por toda su superficie, y dicha distribución, a su vez, depende de la velocidad relativa del viento. Pero se suele aproximar con una expresión que incluye un coeficiente:

$$R_{aero} = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A_f \cdot v_{veh}^2 \quad (2.4)$$

en esta ecuación, ρ_{aire} es la densidad del aire, A_f el área frontal del vehículo, v_{veh} la velocidad del mismo (que se correspondería con la velocidad relativa del viento) y C_d el coeficiente de resistencia aerodinámica. El producto de un medio, la densidad del aire y la velocidad al cuadrado se corresponden la presión dinámica del viento.

El coeficiente de resistencia aerodinámica valora la eficiencia aerodinámica del diseño, pues determina la fuerza de sentido contrario al movimiento que genera la propia estructura al enfrentarse al viento. Depende del modelo de vehículo, pero su valor suele situarse entre 0.25 y 0.45, siendo más bajo para vehículos de estilo deportivo y más altos para vehículos del tipo monovolúmenes o furgonetas.

La fuerza que aparece a favor o en contra del movimiento del vehículo debido a la pendiente, al igual que el rozamiento, es proporcional a su peso:

$$F_p = m_{veh} \cdot g \cdot \sin \phi \quad (2.5)$$

aquí, m_{veh} es la masa del vehículo, g la constante de gravitación terrestre y ϕ la pendiente del camino. El valor de esta fuerza no suele ser elevado, pues las cuestas de las carreteras normalmente se pretende que tengan muy baja inclinación, por lo que el seno del ángulo de la pendiente resulta bastante bajo.

En cuanto a la fuerza inercial del vehículo, sabemos que es la correspondiente a la aceleración o deceleración del vehículo en su totalidad:

$$F_{iner} = m_{veh} \cdot a_{veh} = m_{veh} \cdot \frac{d v_{veh}}{d t} \quad (2.6)$$

la variable m_{veh} es la masa del vehículo y a_{veh} su aceleración.

La ecuación 2.1 se puede transformar en una igualdad diferencial de energía multiplicando por un diferencial de longitud:

$$F_M \cdot dl = (F_{fr} + F_r + R_{aero} + F_p + F_{iner}) \cdot dl \quad (2.7)$$

Igualmente, si dividimos entre un diferencial de tiempo la expresión 2.6, llegamos a tener un balance de potencia:

$$P_M = P_{fr} + P_r + P_{aero} + P_p + P_{iner} \quad (2.8)$$

siendo P_M la potencia requerida/aportada al/por el sistema de transmisión, P_r la potencia disipada por el rozamiento, P_{aero} la potencia disipada por la resistencia aerodinámica, P_p la potencia disipada por la existencia de cierta pendiente y P_{iner} la potencia aprovechada para impulsar al vehículo.

Sabiendo las condiciones del vehículo sobre la carretera (freno, rozamiento, resistencia aerodinámica y pendiente) y la potencia aportada por el sistema de transmisión (determinada por el par o momento generado en el motor y su régimen de giro, es decir, por la actuación del conductor), podemos determinar la potencia de inercia, además de la aceleración y la velocidad en el instante siguiente.

La tabla 2.1 recoge los valores utilizados para definir la dinámica del vehículo dentro del modelado.

Valores para el estudio				
Área Frontal [m ²]	Coef. Resist. Aero.	Densidad del aire [kg · m ⁻³]	Coef. Rozamiento	Masa del vehículo [kg]
2.3	0.31	1.18	0.015	1683

Tabla 2.1.

2.2.2. Motor térmico

El motor térmico, como ya se ha dicho anteriormente, es un MCIA. En este tipo de motores encontramos parámetros relacionados con el ciclo cerrado termodinámico que sucede dentro del cilindro y parámetros relacionados con la actuación final del motor al completo, es decir, referidos al eje del motor.

Apartado 2. Modelado.

Los primeros son los denominados parámetros indicados (presión media indicada, rendimiento indicado, potencia indicada...) mientras que los segundos se conocen como parámetros efectivos (presión media efectiva, rendimiento efectivo, potencia efectiva...). La diferencia entre ambas clases de parámetros reside en la contabilización de las pérdidas

Los parámetros indicados no tienen en cuenta las pérdidas de energía que se tienen más allá de las que tiene el ciclo por la transmisión de calor del cilindro, las pérdidas del juego de apertura y cierre de válvulas y de la energía que no se aprovecha de los gases de escape ya que escapan aún calientes.

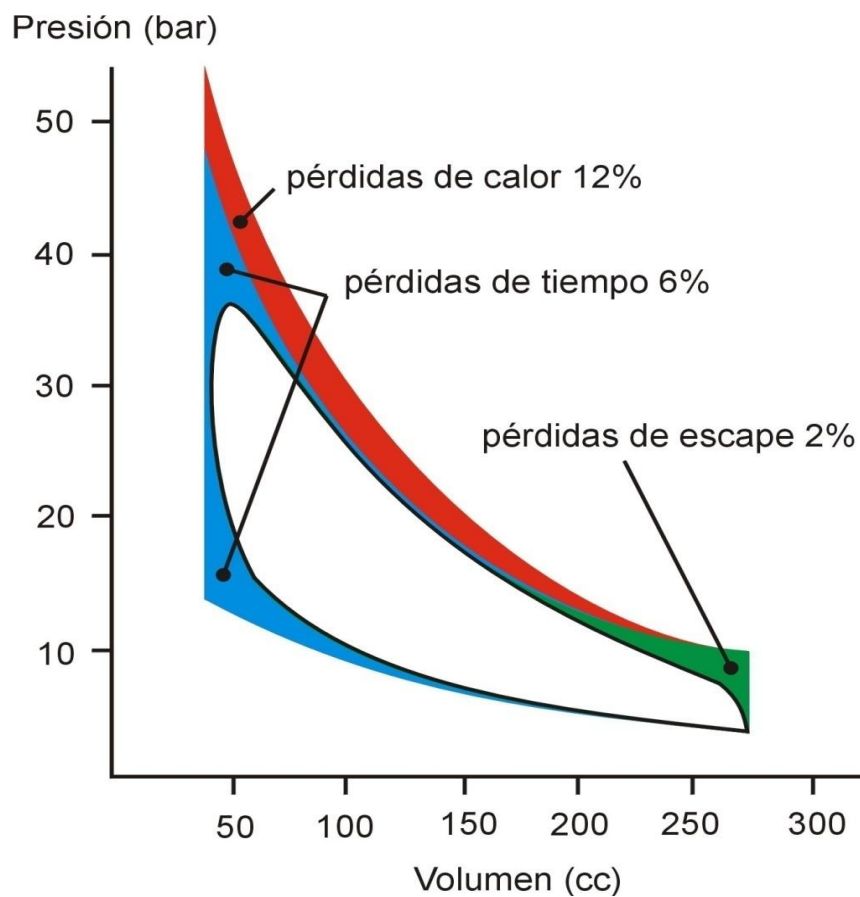


Figura 2.3.²: Estimación de pérdidas indicadas para un ciclo termodinámico de un motor 4T de gasolina.

² Imagen perteneciente al CMT

Por otro lado, los parámetros efectivos están referidos a todos los cilindros y tienen en cuenta las pérdidas de energía mecánica: lazo de bombeo, rozamiento y accionamiento de auxiliares (bomba de agua, climatizador...). De esta forma, para su definición, los parámetros efectivos se definen a partir de los indicados y se sustraen las pérdidas mecánicas.

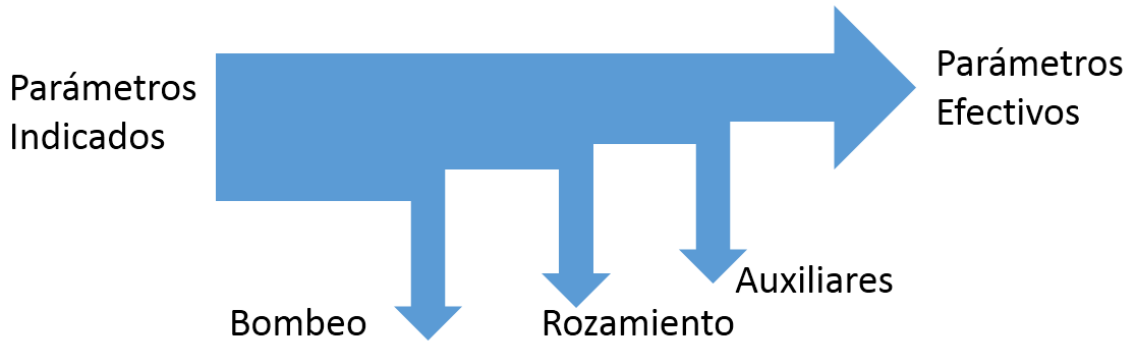


Figura 2.4.

Así, podemos definir la potencia efectiva como la diferencia entre la potencia indicada de todos sus cilindros y la potencia disipada por las pérdidas mecánicas:

$$P_e = j \cdot P_i - P_{pm} = (j \cdot W_i - W_{pm}) \cdot i \cdot n; \quad (2.9)$$

el rendimiento efectivo como el cociente entre la potencia efectiva y la potencia entregada:

$$\eta_e = P_e / (\dot{m}_f \cdot L); \quad (2.10)$$

y el par efectivo como la potencia efectiva entre la velocidad angular del motor:

$$M_e = P_e / \omega_e \quad (2.11)$$

donde P_e es la potencia efectiva del motor, P_i la potencia indicada, P_{pm} la potencia disipada por las pérdidas mecánicas, W_i el trabajo indicado, W_{pm} la energía de las pérdidas mecánicas, j el número de cilindros del motor, n el régimen de giro del mismo, η_e el rendimiento efectivo, \dot{m}_f el gasto de combustible, L el poder calorífico del combustible, M_e el par motor, ω_e la velocidad angular del motor e i un parámetro dependiente de si el motor es de 2 o 4 tiempos.

Apartado 2. Modelado.

Para la obtención del par motor en función del consumo (o mejor dicho, del pedal del acelerador, el gasto de combustible es proporcional a dicho pedal) y el régimen de giro; en este trabajo se recurre a la interpolación de un mapa de motor térmico. Este mapa proviene de un estudio experimental para un motor comercial diésel de 2 litros que fue caracterizado mediante ensayos en régimen estacionario.

No obstante, en la realidad, el motor tendrá que trabajar con comportamiento transitorio también, y el comportamiento del motor en transitorio es un tanto diferente al comportamiento que presenta en régimen estacionario. La causa de esta diferencia es la inercia del propio motor. Al aumentar el gasto de combustible para acelerar el motor, existe un cierto retardo por parte del turbo-grupo del motor y la cámara de combustión debido a esta inercia.

Para el mapa utilizado, el cambio de un punto de funcionamiento a otro punto no tiene coste alguno, pero en la realidad, si existe un coste. Por ello, en este trabajo, no se tiene en cuenta la inercia del motor ni el retraso que implica para las variables del movimiento del vehículo, lo cual ha supuesto una simplificación importante para el modelo.

La tabla 2.2 recoge los parámetros que delimitan el mapa del motor utilizado en esta parte del modelado

Valores para el estudio					
Máximo Par (N · m)	Rég. Par Máximo (RPM)	Potencia Máxima (CV)	Rég. Pot. Máxima (RPM)	Consumo Urbano (l/100 km)	Consumo extraurbano (l/100 km)
340	2000-3000	163	3750	7.1	4.8

Tabla 2.2.

2.2.3. Transmisión

La transmisión es un sistema de ejes y engranajes que transfieren la potencia desarrollada en el motor a las ruedas del vehículo y fundamental, todo vehículo cuenta con uno. Posibilita el movimiento de las ruedas y, por ende, el del mismo vehículo.

El sistema de transmisión de los vehículos convencionales se compone de un juego de engranajes que puede controlarse mediante la palanca de cambios y el embrague, denominada caja de cambios, y de una transmisión final entre la caja de cambios y el eje de las ruedas tractoras.

La caja de cambios consiste en un conjunto de engranajes de distintos tamaños. Dependiendo de la marcha metida por la palanca, la combinación de engranajes es distinta, por lo que modifican el par y el régimen de giro que le llega al eje de las ruedas aunque no varíe la potencia transferida.

De esta forma, cada marcha engranada determina una relación de transmisión de par diferente y fija una velocidad máxima y una capacidad de aceleración para el vehículo: cuando tenemos una marcha baja en el vehículo, nos encontramos con una gran relación de transmisión de par, es decir, un alto nivel de aceleración; y baja velocidad máxima.

La potencia transmitida desde el motor al eje de las ruedas cae ligeramente debido a pérdidas mecánicas. El rendimiento de esta transmisión es función del par y el régimen transferido, pero apenas sufre cambios para las relaciones de par y régimen con las que trabajamos, por lo cual, asumiremos un rendimiento de transmisión constante y modelamos la potencia transferida a las ruedas tal que:

$$P_r = \eta_T \cdot P_e \quad (2.12)$$

siendo P_r la potencia transferida a las ruedas, η_T el rendimiento del sistema de transmisión y P_e la potencia efectiva del motor.

Por otro lado, la relación de transmisión suele reducir el régimen de giro transferido del motor a la rueda, aunque esta relación de transmisión para el régimen se va

Apartado 2. Modelado.

incrementando al subir de marcha, en detrimento de la transmisión para del par. Así pues, el régimen y el par transferidos desde el motor a la rueda quedan modelados por:

$$\omega_r = \omega_e / R_T \quad (2.13)$$

$$M_M = R_T \cdot M_e \quad (2.14)$$

la velocidad angular efectiva es ω_e , R_T la relación de transmisión de la marcha engranada, ω_r la velocidad angular de la rueda, M_e el par efectivo y M_M el par transferido a la rueda.

Por último queda modelar las ruedas, que lo son como un sólido rígido. Las ecuaciones para hallar la velocidad del vehículo y fuerza demandada en la rueda no son ningún misterio:

$$v_{veh} = r_r \cdot \omega_r \quad (2.15)$$

$$F_M = M_M / r_r \quad (2.16)$$

en estas ecuaciones v_{veh} es la velocidad del vehículo, r_r el radio de la rueda, ω_r la velocidad angular de la misma, M_M el par que ejerce la rueda y F_M la fuerza demandada en la rueda para mover el vehículo.

En la siguiente tabla podemos ver las relaciones de transmisión para cada marcha del vehículo, además de la transmisión final: ajuste entre la caja de cambios y las ruedas.

Valores para el estudio							
Marcha	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Transmisión Final
R. Transmisión del Par Motor	5.80	3.10	2.02	1.51	1.23	0.99	2.5

Tabla 2.3.

2.3. Resolución del modelo

Una vez hemos planteado el modelo físico del problema en cuestión, y antes pasar a las técnicas de optimización del problema (en este caso, antes de definir el perfil de conducción de mínimo combustible para un tramo dado) debemos determinar el método para el cálculo de las distintas variables del movimiento del vehículo, ya que nos encontramos frente a un problema de resolución iterativa.

En este trabajo hemos usado el método ‘forwards’ para el modelo motriz del vehículo. Para el cálculo de las variables durante todo el trayecto necesitamos partir de un punto inicial que resulte totalmente conocido, y así calcular estas variables punto a punto.

El modelo ‘forwards’ supone la resolución iterativa del problema de tal forma que las incógnitas de cada iteración son la aceleración y la velocidad en cada instante. Es posible calcular dicha aceleración a partir del pedal de acelerador, el cuál nos proporciona el gasto de combustible así como el par generado por el motor, la velocidad del instante anterior y el resto de variables del instante actual. La ecuación a resolver es:

$$P_{iner} = P_M - (P_{fr} + P_r + P_{aero} + P_p + P_{iner}) \quad (2.17)$$

$$\frac{dv_{veh}}{dt} = \frac{P_M}{m_{veh} \cdot v_{veh}} - C_f \cdot g \cdot \cos \phi - \frac{C_d \cdot \rho_{aire} \cdot A_f \cdot v_{veh}^2}{2 \cdot m_{veh}} - g \cdot \sin \phi \quad (2.18)$$

Conocemos la potencia motora debido a que la entrada del modelo es la posición del pedal de aceleración para alcanzar cierta velocidad en el instante siguiente en función de la velocidad que se quiera alcanzar. El controlador imita la forma de actuar de un conductor para mantener el vehículo a cierta velocidad.

En resumen, el modelo ‘forward’ trata de deducir la repercusión de una acción de control (acelerador, freno, marcha engranada) sobre el movimiento del vehículo. Es una aproximación de la actuación del vehículo.

En la figura 2.5 queda esquematizado de forma sencilla el sistema de control de actuación del modelo ‘forward’. En él, v_{veh}^* representa la velocidad que se pretende llevar durante el ejercicio de la conducción, v_{veh} es la velocidad del vehículo, α simboliza el pedal

Apartado 2. Modelado.

del acelerador, δ el pedal de freno, P_{mot} hace referencia a la potencia desarrollada en el motor y P_M a la potencia transmitida al eje de las ruedas.

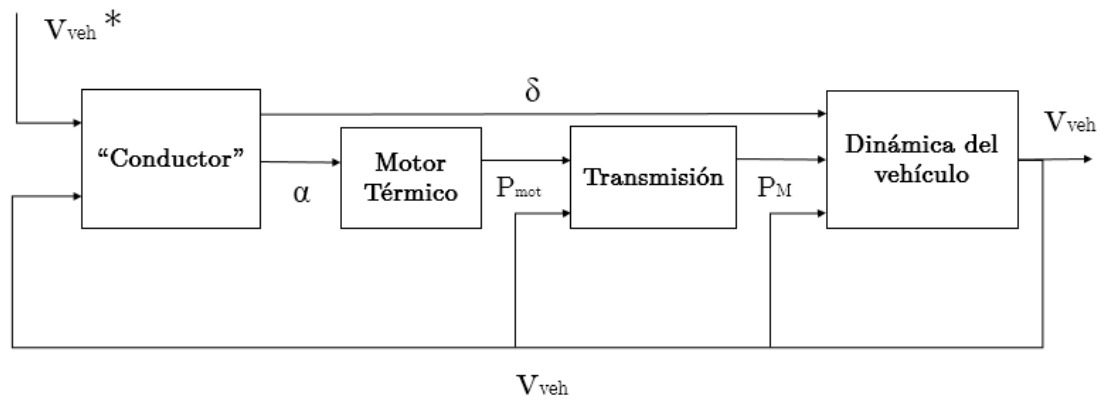


Figura 2.5

Ahora sí, conociendo las ecuaciones que determinan la dinámica del vehículo y cómo calcular el valor de las distintas variables a lo largo de trayecto, podemos centrarnos en su optimización.

Apartado 3

Metodología

Subapartados:

3.1. Descripción del problema de optimización	23
3.2. Herramienta auxiliar	26
3.2.1. Optimizador	26
3.2.2. Base de datos	31
3.3. Método de resolución	34
3.3.1. Elección de la solución óptima	42
3.4. Validez del método	49

3.1. Descripción del problema de optimización

Los viajes por ciudad, al contrario de lo que puede resultar un trayecto interurbano por autovía o por nacional, no son en absoluto monótonos; cabe la posibilidad de encontrar vehículos parados en doble fila interrumpiendo el paso, tener que detenerse en sucesivos semáforos en rojo o incluso hallar un policía local regulando el tráfico, entre otras opciones. Todos estos eventos, que obligan a detener el vehículo o reducir su velocidad durante el ejercicio de la conducción, no contribuyen a otra cosa que no sea aumentar el consumo de combustible.

Si se pretende recorrer un trayecto real de forma que se ahorre el máximo combustible posible, existe una gran cantidad de variables a tener en cuenta, así como también la incertidumbre sobre cuáles de estas variables pueden ser acontecidas. La manera general de abordar este problema consiste en el planteamiento de un problema de optimización determinista en el cual se minimiza el consumo de combustible. Para ello es requisito indispensable definir completamente dicho problema de optimización,

sabiendo que va a suceder en todo momento, sin dejar lugar a las incertidumbres (por ejemplo, si un trayecto tiene 3 semáforos, saber el estado en el cuál se encontrarán al pasar el vehículo). En particular, esto supone definir de antemano cuántas veces se detendrá el vehículo, durante cuánto tiempo o en qué lugares se encontrará tráfico, entre otros. Por supuesto, esto no es más que el planteamiento de un caso particular del problema que se trata de abordar al no considerar las incertidumbres como tales.

El objetivo de este trabajo consiste en abordar el problema anterior teniendo en consideración las incertidumbres que puedan suceder, esto es, un problema no determinista. Para ello, se pretende plantear un problema de optimización en el cual no simplemente se busca minimizar el consumo de combustible para un caso particular sino la esperanza estadística de consumo de combustible en un trayecto urbano para la casuística completa de posibles incertidumbres que puedan encontrarse. Esta incertidumbre es el punto de inflexión que marca la diferencia con respecto a los métodos deterministas que normalmente se aplican a problemas de optimización, ya que significa dar un paso más hacia la resolución de problemas reales.

A causa de las incertidumbres, en este estudio los métodos aplicados harán uso de diferentes simplificaciones e hipótesis con el fin de alcanzar la solución óptima. Las únicas incertidumbres que se tendrán en cuenta serán elementos restrictivos de la velocidad que puedan ser localizados de ante mano sobre el trayecto a recorrer: semáforos, para ser más concretos. Claro que, para ello, primero se necesita conocer la disposición de los semáforos a lo largo del trayecto y tener caracterizado su estado: el tiempo que puede retener parado a un vehículo por cada ciclo que completa estando en verde y en rojo. De esta manera, nuestro problema queda definido por un conjunto de parámetros referidos al trayecto total (parámetros deterministas): el límite de velocidad, la longitud total, el tiempo en el que ha de recorrerse, la localización de los semáforos a lo largo del trayecto y los tramos o secciones en los que queda dividido por los mismos; y por ciertas hipótesis: las incertidumbres únicamente son el estado de los semáforos, que éstos son independientes los unos de los otros (pues no conocemos el algoritmo por el que se rigen) y que la distribución probabilística del estado de los semáforos es conocida.

Apartado 3. Metodología.

Con todo lo anterior, se pretende obtener la estrategia de conducción que minimice la esperanza estadística del consumo de combustible en toda la casuística. Esta estrategia de conducción consiste en el perfil de velocidad que el vehículo debe seguir a lo largo de todo el trayecto, además del perfil de marcha engranada en el vehículo.

La manera de abordar este problema no determinista se basa en resolver numerosos problemas deterministas que permitan definir distintos perfiles de conducción óptimos por cada tramo del trayecto variando el tiempo disponible para recorrerlos, y comparar luego las distintas combinaciones de los perfiles de cada tramo del trayecto para así elegir los de menor consumo. Por tanto, cada problema determinista está referido a un tramo del trayecto total y un tiempo concreto en el que recorrerlo, y su solución es el perfil de conducción óptimo para recorrer dicho tramo en el tiempo establecido. Son problemas deterministas porque entre semáforos no se considera la opción de que surja ningún imprevisto.

Dados un tramo y un tiempo en el que recorrerlo, para calcular o determinar el perfil de conducción que minimiza el coste de combustible es imprescindible utilizar alguna herramienta que halle la solución de este problema determinista. En este trabajo se ha recurrido a un ‘método directo’ de resolución de problemas de control óptimo, que a su vez aplica un ‘método de colocación’ al sistema de ecuaciones del modelo para resolver el problema mediante el ‘método del punto interior’ (‘programación no lineal’). Al final, el sistema elaborado para la selección de la estrategia de conducción óptima es un método numérico, y como tal, para la resolución de problemas del tipo que aquí se plantea resulta conveniente aplicar dicho método con ayuda de un ordenador. Por ello, en este proyecto se ha implementado un software para la aplicación el método de optimización.

3.2. Herramientas

La herramientas externas de la cuales se nutre el procedimiento de este trabajo para seleccionar los perfiles de conducción óptimos en un trayecto son dos, denominadas optimizador y base de datos. El optimizador es un método determinista de resolución de problemas de optimización aplicado al nuestro: minimizar el consumo de combustible en un tramo (entre dos semáforos) del trayecto total cumpliendo con un tiempo fijado para recorrerlo. Y la base de datos nos proporciona el consumo y el perfil óptimo para un tramo dado en función de la distancia que ocupa, la velocidad media la velocidad inicial; ha sido creada a partir de la herramienta anterior.

3.2.1. Optimizador

Gestionar el gasto de combustible de un vehículo durante un trayecto de forma que sea ahorrado el máximo posible supone resolver un problema de optimización realmente complejo, pues hay infinidad de posibilidades para la conducción del trayecto y sólo buscamos algunas que cumplan con las restricciones impuestas. Además, dependiendo del estado del sistema en el punto de partida, se tendrá una solución óptima u otra.

Debido a la complejidad del problema, carece de sentido tratar de resolverlo analíticamente, resulta muchísimo más práctico resolverlo mediante la discretización del dominio del problema (distancia o tiempo según se plantee) y métodos numéricos.

Cualquier problema dinámico de control óptimo puede ser definido de la misma forma: una variable escogida para minimizar su valor que resulta de una integral, unas condiciones de contorno, unas restricciones y ciertas variables de estado y actuadores de control que son función del dominio (por lo que existirán ecuaciones diferenciales). Por tanto, la formulación habitual en la literatura para plantear un problema de optimización en términos de una variable de estado x , unos actuadores de control u , y un dominio (sea tiempo o espacio) t es la siguiente:

Apartado 3. Metodología.

-Valor a minimizar:

$$\mathcal{L} = \int_0^T f(x, u, t) dt \quad (3.1)$$

-Ecuaciones diferenciales (para un sistema dinámico de primer orden):

$$\dot{x} = l(x, u, t) \quad (3.2)$$

-Condiciones de contorno:

$$x(0) = x_0, \quad x(T) = x_f \quad (3.3)$$

-Restricciones puntuales:

$$g(x, u, t) \leq 0 \quad (3.4)$$

-Restricciones integrales:

$$\int_0^T N(x, u, t) dt = 0 \quad (3.5)$$

En cualquier problema de control óptimo, es indispensable la presencia de la integral cuyo valor se quiere minimizar, de las ecuaciones diferenciales (puesto que se trata de un problema dinámico) y al menos una condición de contorno. Por otro lado, la presencia de las condiciones de contorno y los dos tipos de restricciones descritas como ecuaciones del sistema dependerá del tipo de problema a resolver. Es decir, según el problema planteado, encontraremos unas restricciones u otras. En cualquier caso, siempre debemos contar con una hipótesis de partida que defina las condiciones de contorno y las restricciones. Si no se dispone de una hipótesis inicial no se puede resolver el problema de forma óptima ya que hay infinitud de formas que servirían como solución.

El término que se quiere minimizar, \mathcal{L} , viene definido por la integral de una función que evalúa el coste de las variables de estado y de las acciones de control en el periodo o dominio durante el que transcurre el problema. Las ecuaciones diferenciales sólo se aplican a las variables de estado, y las condiciones de contorno determinan el valor de las mismas variables y sus derivadas. Por su parte, los valores de las variables de estado

y de los actuadores pueden estar acotados o no entre unos valores máximos y mínimos en los diferentes puntos del problema, de ahí las posibles restricciones puntuales. La restricción integral es opcional, pero es una restricción que impone una condición de contorno fuerte, de forma que el método resolutivo siempre tratará de hacer que se cumpla. Así, el valor de un actuador como el pedal del acelerador puede estar acotado entre 0 y 1 (0: sin pisar el pedal, 1: pisando a fondo el pedal), o la restricción integral puede exigir que el tiempo en recorrer un tramo sean exactamente 25 segundos.

Para nuestro problema particular, el término a minimizar se corresponde con el consumo de combustible, el cuál depende de la variable de estado velocidad y de los actuadores denominados pedal de aceleración y pedal de frenado. Las condiciones de contorno nos fijarán el valor de la velocidad tanto al inicio como al final del tramo estudiado, y las restricciones puntuales acotarán el valor de la velocidad entre 0 y 50 km/h (pues en circuito urbano la máxima velocidad permitida por ley es de 50 km/h) y el valor de ambos pedales, acelerador y freno, entre 0 y 1. Por otro lado, la restricción integral impondrá siempre que el trayecto realizado se ejecute en el tiempo impuesto. Cabe destacar que el dominio utilizado para el planteamiento del problema ha sido la distancia en lugar del tiempo. De esta manera, las ecuaciones que definen nuestro problema de optimización determinista son:

-Combustible a minimizar:

$$W_f = \int_0^S f(v_{veh}, u_1, u_2, s) / v_{veh} ds \quad (3.6)$$

donde tenemos que W_f es el consumo acumulado de combustible, S la distancia del tramo, v_{veh} la velocidad el vehículo, u_1 y u_2 los pedales del acelerador y del freno, la función $f(v_{veh}, u_1, u_2, s)$ el conjunto de ecuaciones del modelo que determinan el gasto instantáneo de combustible y s el dominio expresado en distancia.

-Ecuación diferencial de la variable de estado velocidad:

$$v_{veh} \dot{=} l(v_{veh}, u_1, u_2, s) \quad (3.7)$$

Apartado 3. Metodología.

donde $g(v_{veh}, u_1, u_2, s)$ es el conjunto de ecuaciones del modelo que determinan la aceleración del vehículo.

-Condiciones de contorno:

$$v_{veh}(0) = v_{veh,0}, \quad v_{veh}(S) = v_{veh,S} \quad (3.8)$$

siendo $v_{veh,0}$ la velocidad del vehículo al principio del tramo y $v_{veh,S}$ la velocidad del vehículo al final del mismo.

-Restricciones puntuales:

$$v_{veh} \leq 50 \text{ km/h}, u_1 \in [0,1], u_2 \in [0,1] \quad \forall s \in S \quad (3.9)$$

-Restricciones integrales:

$$\int_0^S v_{veh}(v_{veh}, u_1, u_2, s) ds = T \quad (3.10)$$

siendo T el tiempo establecido para recorrer el tramo.

Para calcular el perfil óptimo de conducción a lo largo de un tramo sin que existan parones intermedios, en este trabajo se han recurrido a técnicas de ‘programación no lineal’. Siendo precisos, para el perfil óptimo de un tramo se ha empleado un método directo de resolución de problemas de control óptimo. Éste emplea el ‘método del punto interior’ para la resolución del problema que se propone, el cuál es una técnica de ‘programación no lineal’. Para poder aplicar el ‘método del punto interior’ se han de transcribir las ecuaciones que conforman el problema de optimización de manera específica. Las ecuaciones han sido transcritas usando el ‘método de colocación’.

Un método directo es un método numérico que se basa en la discretización de todo el dominio, así como de variables de estado y actuadores, para luego resolver el problema de optimización. Se trata de un método numérico potente y bastante robusto.

Método de colocación

El método de colocación es un método numérico que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs). Necesita discretizar el dominio del problema y dividirlo en intervalos. Así mismo, también requiere aproximar las variables de estado y los actuadores a funciones conocidas (generalmente polinomios), de forma que se pueda aproximar el barrido de valores de las variables de estado y de los actuadores a lo largo del dominio a vectores de longitud igual al número de intervalos en los que ha sido dividido el dominio; menos para las variables de estado, cuyos vectores serán tendrán una posición más que la de los actuadores. De esta forma tendremos una discretización del dominio en n puntos, y $n-1$ intervalos. Los vectores de las variables de estado y de los actuadores quedarán de la forma:

$$x \approx [x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n], u \approx [u_0, u_1, \dots, u_{n-2}, u_{n-1}] \quad (3.11)$$

Además, las derivadas y las integrales también se deben aproximar en función de los vectores de valores de variables de estado y de actuadores. Tanto para aproximar las derivadas como las integrales se ha empleado el método de Euler centrado, de manera que las derivadas quedan así:

$$\frac{d((x_0+x_1)/2)}{dt} \approx f\left(\frac{x_i+x_{i+1}}{2}, u_i\right) \approx \frac{x_{i+1}-x_i}{\Delta t} \quad (3.12)$$

y las integrales se expresan tal que:

$$\int_0^T L \cdot dt \approx \sum_{i=0}^{n-1} L\left(\frac{x_i+x_{i+1}}{2}, u_i\right) \quad (3.13)$$

Tras tener todo el dominio discretizado y aproximadas las variables de estado, los actuadores, las derivadas y las integrales podemos pasar a resolver el problema de optimización mediante cualquier método basado en técnicas de ‘programación no lineal’.

Método del punto interior

Para el trabajo en particular, al haber implementado íntegramente todo el trabajo en MathWorks® MATLAB, se ha usado un programa denominado ‘IPOPT’, el cuál se puede descargar gratuitamente en la red. Este programa se basa en el método del punto

Apartado 3. Metodología.

interior, útil para ‘programación no lineal’ pero el cuál no vamos a describir en profundidad. En líneas generales este método calcula los valores de las incógnitas (en este caso la velocidad del vehículo) recorriendo el espacio de búsqueda (espacio definido por las restricciones del problema) siguiendo el mínimo gradiente (dirección de búsqueda que minimiza el objetivo, en este caso el consumo de combustible), estimado mediante las derivadas del problema.

Aunque este método es bastante robusto, pues asegura una solución, no siempre proporciona la solución óptima, en tal caso proporcionará una solución sub-óptima.

Este método proporciona un mínimo local del problema el cual, dependiendo del valor inicial proporcionado al algoritmo, puede ser distinto. En el caso de que únicamente exista un mínimo, éste evidentemente es también el mínimo global del problema. Los métodos que garantizan que la solución es un mínimo global (por ejemplo, programación dinámica) son computacionalmente mucho más costosos y, por tanto, no son recomendables en la práctica para problemas complejos como el que se pretende abordar.

3.2.2. Base de datos

Como se ha mencionado anteriormente, el problema global con incertidumbres se divide a su vez en una enorme cantidad de pequeños problemas deterministas asociados a cada uno de los tramos del trayecto, en los cuales se ha de hallar el perfil de velocidad óptimo que minimiza el consumo de combustible. Además, estos problemas están perfectamente determinados por la distancia de cada tramo, la velocidad media y la velocidad inicial; estas velocidades son variables de decisión para el conductor (en este caso, para el método de optimización), pues la velocidad inicial se decide al final del tramo anterior según se detenga el vehículo o no, y la velocidad media se decide al comenzar el nuevo tramo.

Sabiendo esto, y asumiendo que se puede considerar despreciable la pendiente de la calzada (pues el estudio se ha realizado en Valencia, una ciudad muy llana), aparece la idea de crear una base de datos que proporcione el consumo de combustible y el perfil de

conducción que minimiza dicho consumo para cada uno de los tramos del trayecto, en función de las variables anteriores: distancia, velocidad inicial y velocidad media. Esto evita repetir cálculos para hallar el perfil óptimo de cada tramo (pues para más de un caso seguro que se repite el cálculo del mismo perfil optimizado: misma distancia, misma velocidad inicial y misma velocidad media) y agiliza la ejecución del método. Pero esta herramienta no sólo proporciona la cantidad de combustible consumido de una actuación óptima, sino que también da información sobre el frenado del vehículo, pues como más tarde se explicará, conocer esta información es de vital importancia para la obtención de resultados coherentes. Antes del fin de este apartado el lector podrá conocer qué datos proporciona respecto al frenado del vehículo y cómo se obtienen.

La base de datos ha sido construida con ayuda del optimizador, a partir del estudio de numerosos casos para los cuáles sólo variaban tres parámetros: la distancia del tramo a recorrer, la velocidad que lleva el vehículo al comenzar y la velocidad media con la que realizarlo. Es por ello que la base de datos resulta ser una matriz de tres dimensiones. Además, esta base de datos es sólo válida para el vehículo del mapa motor con el que se realiza el estudio.

A pesar de que los datos recogidos dependen de tres parámetros que varían, todos los casos estudiados y recogidos tienen un común denominador: la velocidad final. En todos y cada uno de los casos, el vehículo acaba parando al final del tramo, por lo que la velocidad final del vehículo en todos los casos es nula.

Para generar la base de datos, los parámetros de estudio que la conforman adquieren valores de ciertos intervalos, siendo estos valores coherentes para un circuito urbano (por ejemplo, establecer como límite velocidad 50 km/h). La tabla 3.1 recoge los intervalos en los que se mueven los parámetros anteriores:

Parámetros de Estudio	Distancia [m]	Velocidad Inicial [km/h]	Velocidad Final [km/h]	Velocidad media [km/h]	Límite de velocidad [km/h]
Intervalos	[20, 420]	[0, 50]	0	[10, 46.66]	50

Tabla 3.1

Apartado 3. Metodología.

Por otro lado, la información relativa a la parada del vehículo está constituida por: el punto considerado como el inicio de la parada (la elección de este punto es totalmente arbitraria, se puede establecer distintos criterios perfectamente sin que uno sea más válido que otro) y que es equivalente a la distancia de la frenada, el tiempo que invierte en frenar, el consumo acumulado del vehículo durante el frenado y la velocidad del vehículo con la que comienza el frenado.

En este trabajo se ha definido el punto inicial del tramo de parada como aquél situado a una distancia del final igual a la distancia de parada del vehículo si circulara con la velocidad media establecida para dicho tramo. Con la curva anterior de velocidad y tiempo de frenado, ecuaciones 3.17 y 3.18, se halla fácilmente la distancia de frenado.

$$x_{fr} = \int_{t_{fr}(v_{med})}^{t_{fr}(0)} v_{fr}(t) dt \quad (3.14)$$

Una vez son sabidas la distancia y su posición en la discretización que requería el optimizador, también sabemos la posición del instante inicial de la frenada sobre la discretización del vector de tiempos. Lo mismo ocurre para el vector de velocidades a lo largo del camino y con el vector de consumo instantáneo. Por tanto, ya tenemos la distancia y el tiempo de frenado, la velocidad a la cual iniciamos la frenada y el gasto de combustible durante toda la frenada.

La base de datos, al final, resulta ser una malla bastante fina sobre la que poder interpolar; y a pesar de que su construcción llevó varios días de cálculos para el ordenador, es esencial a la hora de agilizar la ejecución del método de selección de perfiles óptimos. Sin ella, cada vez que se pretendiese deducir los perfiles óptimos de conducción para un trayecto dado, se requeriría calcular mediante el optimizador anterior tantos casos que el método de optimización elaborado resultaría del todo ineficiente.

3.3. Método de resolución

El objetivo último del método resolutivo es proporcionar una estrategia de conducción que, cumpliendo con un tiempo establecido para recorrer un trayecto dado, minimice la esperanza estadística de consumo de combustible para la casuística que conforma el problema, es decir, un conjunto de perfiles de conducción óptimos para cada una de las posibles combinaciones del estado de los semáforos del recorrido.

-Valor a minimizar:

$$W_{fuel} = \int_0^S f(t_r, t_t, s) ds \quad (3.15)$$

W_{fuel} es la masa de combustible total consumido, t_r el estado de los semáforos, t_t el tiempo de acuerdo a un perfil de velocidad óptimo con el que recorrer cada tramo, s es el dominio del problema (distancia), S es la distancia del trayecto total y $f(t_s, t_t, s)$ el gasto instantáneo de combustible.

-Restricción integral de tiempo a cumplir:

$$\int_0^S t_t ds + \int_0^S t_s ds = T \quad (3.16)$$

donde T es el tiempo establecido para recorrer el trayecto.

La solución que propuesta por el método resolutivo debe consistir en una política o estrategia de conducción que determina los perfiles de velocidad a seguir en cada tramo del trayecto dependiendo de la información que recibe el vehículo con su paso por los semáforos. Es por ello que para distintos casos, los perfiles de velocidad a seguir que determina el sistema optimizador deben ser idénticos mientras la secuencia del estado de los semáforos también lo sea; estos perfiles de velocidad sólo cambiarán a partir del primer semáforo que no se encuentre en el mismo estado que sus homólogos en el resto de casos. Esto es un punto indispensable que debe cumplir el sistema de resolución, ya que el conductor no tiene ninguna certeza de cómo evolucionarán los acontecimientos a lo largo del recorrido: si no es posible saber qué va a suceder con exactitud en el siguiente punto de incertidumbre, no tiene sentido establecer perfiles de conducción completamente

Apartado 3. Metodología.

distintos para aquellas casuísticas cuyos semáforos iniciales se encuentren con estados idénticos.

Para la resolución del problema de optimización planteado en este proyecto se ha elaborado un método numérico, dicho método presenta similitudes tanto con el método de optimización por ‘fuerza bruta’ como con el método de optimización por ‘programación dinámica’. Ambos sistemas de resolución tienen en común una cosa: son un método numérico de optimización global que requiere una formulación discreta del problema, al igual que el conocimiento previo del dicho problema para hallar la mejor solución. La diferencia: el método de optimización por ‘programación dinámica’ resulta ser más rápido y ágil que el método por ‘fuerza bruta’.

El método de optimización por ‘fuerza bruta’, una vez conoce todas las posibles soluciones al problema, las compara una a una hasta que encuentra la que más conveniente. Éste resulta más ineficiente que el método de optimización por ‘programación dinámica’ ya que no descarta ninguna posibilidad hasta que no las ha comparado una a una, además, recalcula las distintas opciones por cada comparación.

Por otro lado, el método de optimización por ‘programación dinámica’, aunque también requiere el conocimiento previo de todo el problema, es un método capaz de resolver problemas de optimización de cualquier complejidad de forma más eficiente. Al contrario que en el método por fuerza bruta, éste no calcula cada vez todas las opciones posibles, sino que las calcula una única vez y las guarda en la memoria para luego ir comparando casos. Está basado en el principio de optimización de Bellman, el cual enuncia que, dado un problema con su solución óptima $u^*(t)$ en un intervalo $t \in [0, t_N]$, si se toma un punto intermedio cualquiera de su evolución, $x(t_k)$, la solución óptima de ese mismo problema a partir del punto $x(t_k)$ es precisamente la solución óptima del problema inicial, $u^*(t)$, en el intervalo $t \in [t_k, t_N]$.

Una de las principales ventajas de este método es que permite dividir el problema en problemas más pequeños hasta que podemos encontrar una solución trivial para cada uno de ellos. El método de optimización por ‘programación dinámica’ calcula la solución

óptima de un problema cualquiera evaluando únicamente las soluciones de sus problemas más pequeños en intervalos $[t_k, t_N]$. Recorre el problema desde el final hacia atrás, o desde el principio hasta al final, calculando en cada caso la solución óptima del nuevo mini-problema. Esta solución óptima la halla comparando el valor de la función coste (ecuación 3.1) de las distintas opciones de cada sub-problema.

Como ya se ha dicho, el método creado en este proyecto presenta similitudes con los otros dos anteriores. Una de ellas es la necesidad de discretizar el problema, requiere discretizar el dominio, los valores del actuador de control y los valores de la variable de estado. El dominio de nuestro problema resulta ser la distancia, y ésta se discretiza de tal forma que el trayecto completo queda dividido en distintos tramos o secciones por los mismo semáforos que encontramos en él. Si N es el número de semáforos del trayecto, tendremos $N + 1$ tramos o secciones del trayecto, cuyas distancias son las mismas que hay entre semáforos y la distancia desde los puntos inicial y final al semáforo más cercano. De esta manera, tendremos un dominio discreto:

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_N, s_{N+1}] \quad (3.17)$$

El actuador de control se corresponde con el tiempo escogido para recorrer cada tramo interno de la trayectoria (tiempo de actuación particular), lo cuál es equivalente a establecer una velocidad media, ya que cualquiera de los dos determina el perfil de conducción óptimo en ese tramo. Existe un tiempo mínimo por debajo del cual es imposible completar el tramo en dicho tiempo, por tanto, este valor mínimo será el límite inferior para la discretización del tiempo de actuación particular. Para hallar el tiempo mínimo de un tramo, primero se ha de conocer su curva de velocidad para aceleración y frenado máximos. Para el modelo de vehículo del mapa motor, ya venían ajustadas estas curvas, velocidad y tiempo, cada una en función de la otra. De modo que las curvas eran definidas como:

$$v_{acel} = f(t), f(0) = 0, t_{acel} = g(v), g(0) = 0 \quad (3.18)$$

$$v_{fr} = h(t), h(t_{fr,max}) = 0, t_{fr} = j(v), j(v_{max}) = 0 \quad (3.19)$$

Apartado 3. Metodología.

donde v_{acel} es la función velocidad para la aceleración máxima, t_{acel} la función tiempo para la aceleración máxima, v_{fr} la función velocidad para la frenada y t_{fr} la función tiempo para la frenada.

El tiempo mínimo para un tramo se calcula como la suma de tres tiempos: el tiempo de aceleración del vehículo desde la velocidad con que inicia el tramo hasta la velocidad máxima permitida, el tiempo de frenado desde la velocidad máxima hasta parar por completo y el tiempo que tarda en recorrer a la velocidad máxima permitida la distancia restante tras sustraer al tramo inicial la distancia que emplea el vehículo en acelerar y frenar. La expresión resulta:

$$x_{acel} = \int_0^{t_{acel}(v_{max})} v_{acel}(t) dt, \quad x_{fr} = \int_{t_{fr}(v_{max})}^{t_{fr}(0)} v_{fr}(t) dt \quad (3.20)$$

$$t_{min} = t_{acel}(v_{max}) - t_{acel}(v_{ini}) + t_{fr}(0) - t_{fr}(v_{max}) + \frac{d - x_{acel} - x_{fr}}{v_{max}} \quad (3.21)$$

aquí x_{acel} es la distancia empleada en acelerar el vehículo, x_{fr} la distancia de frenado, v_{max} la velocidad máxima permitida en el tramo, v_{ini} la velocidad con la cuál el vehículo comienza a recorrer el tramo, d es la distancia del tramo y t_{min} el tiempo mínimo en el que el vehículo puede recorrerlo.

En caso de que la distancia de aceleración más la de frenado sea mayor que la distancia total del tramo, se resuelve el siguiente sistema:

$$\int_0^{t_{acel}(v_{acel}(t1))} v_{acel}(t1) dt1 + \int_{t_{fr}(v_{fr}(t2))}^{t_{fr}(0)} v_{fr}(t2) dt2 = d, \quad v_{acel}(t1) = v_{fr}(t2) \quad (3.22)$$

$$t_{min} = t1 - t_{acel}(v_{ini}) + t_{fr}(0) - t2 \quad (3.23)$$

el sistema sólo trata de hallar $t1$ y $t2$.

A la hora de realizar esta discretización, se ha definido el límite inferior como el tiempo de actuación particular para el cual el vehículo es capaz de recorrer cada tramo partiendo y llegando del/al reposo, mientras que el tiempo máximo propuesto para el estudio será proporcional a la distancia del tramo en cuestión respecto de la distancia del trayecto total. El límite superior de los tiempos de actuación particulares será definido como el tiempo que nos proporcione una velocidad media de 10 km/h como tiempo de

actuación particular de dicho tramo, pues llevar una velocidad media inferior a ésta no resulta práctico a la hora de circular en un vehículo motorizado. Por tanto, la discretización del tiempo de actuación particular para un tramo i queda expresada de la siguiente forma:

$$t_{t\ i} = [t_{t\ i, min}, t_{t\ i, 2}, \dots, t_{t\ i, max}] \quad (3.24)$$

en esta expresión, i es el subíndice del tramo, $t_{t\ i}$ es el vector de la discretización de los tiempos de actuación particulares de tramo i , $t_{t\ i, min}$ el tiempo mínimo de actuación particular y $t_{t\ i, max}$ el tiempo máximo de actuación particular para dicho tramo.

La variable de estado lógicamente equivale al estado de los semáforos (tiempo que pueden retener parado a un vehículo). Para la discretización del estado de los semáforos también debemos tener en cuenta una restricción puntual: el tiempo que puede retener un vehículo cada semáforo se acota en un intervalo comprendido entre 0 y el tiempo máximo en rojo del mismo. Luego, el estado de los semáforos se discretiza en m puntos, de tal manera que quede un vector de tiempos de parada posibles por cada semáforo y que recoja un caso en el que el tiempo de parada es nulo (es decir, el semáforo se encuentra en verde) y $m - 1$ tiempos de parada más hasta el máximo de dicho semáforo. Para un semáforo, el vector de tiempos de parada quedaría tal que así:

$$t_{r\ i} = [0, t_{r\ i, 1}, t_{r\ i, 2}, \dots, t_{r\ i, m-2}, t_{r\ i, max}], \quad t_{r\ i, j} \in [0, t_{r\ i, max}] \quad (3.25)$$

donde i es el subíndice de cada semáforo, $t_{r\ i, max}$ el máximo tiempo en rojo que puede permanecer el semáforo i , $t_{r\ i}$, el vector de la discretización de los tiempos de parada de cada semáforo y $t_{r\ i, j}$ cada elemento del vector $t_{r\ i}$. La discretización del estado de cada semáforo no será igual para todos, variará según el tiempo máximo que pueda permanecer en rojo cada semáforo, pero todos estarán discretizados en m puntos.

Al igual que los otros dos métodos de optimización, éste debe conocer todas las posibles soluciones del problema antes de hallar la óptima, pero antes ha de conocerse toda la casuística posible del problema. Para ello, es necesario combinar las distintas discretizaciones del estado de cada uno de los semáforos, de forma que obtengamos todas

Apartado 3. Metodología.

las secuencias posibles del estado de los semáforos. El número de distintas combinaciones de los estados de los semáforos es igual a:

$$\textit{Combinaciones posibles} = m^N \quad (3.26)$$

La matriz que recoge las distintas combinaciones de los estados de los semáforos tendrá tantas filas como combinaciones posibles y tantas columnas como semáforos tengamos.

Por otro lado, también se han de combinar las discretizaciones de los tiempos de actuación particulares de cada tramo, para contar con todas las posibles secuencias de perfiles de conducción. A su vez, las combinaciones anteriores se deben volver a combinar, de forma que por cada secuencia del estado de los semáforos existan varias secuencias diferentes del tiempo de actuación particular de los tramos. Ahora bien, estas secuencias del estado de los semáforos y del tiempo de actuación particular de los tramos han de cumplir con la restricción impuesta por la ecuación 3.15, de forma que la suma de los tiempos de parada en cada semáforo y los tiempos de actuación particulares de cada tramo sea igual al tiempo estipulado para recorrer el trayecto total. Cada posible caso que no cumpla con dicha restricción será descartado como posible solución. Esta capacidad para descartar ciertos casos, es otra similitud del método de optimización elaborado en el proyecto con el método de optimización basado en ‘programación dinámica’, que confiere cierta agilidad respecto al método basado en ‘fuerza bruta’.

No obstante, no todas las combinaciones de velocidad media (o tiempos en los que recorrer cada tramo) y tiempo parado en los semáforos son casos válidos para estudiar porque pueden ser imposibles de realizar: por ejemplo, partiendo del reposo y teniendo que parar al final del tramo, es imposible recorrer cualquier distancia con una velocidad media igual a la máxima permitida, pues el vehículo debería alcanzar la velocidad máxima y quedarse parado de forma instantánea.

En definitiva, el criterio para discernir casos posibles de casos imposibles es el tiempo mínimo en el que el vehículo puede realizar el trayecto fijado: si el tiempo mínimo para realizar el trayecto es mayor que el tiempo que tardaría en realizarlo con la velocidad

media impuesta, el caso queda descartado. Este tiempo varía según la velocidad inicial del vehículo, y cuanto menor sea la velocidad inicial, más casos imposibles de realizar habrá para dicha velocidad inicial. Para hallar el tiempo mínimo de un tramo nos servimos de las ecuaciones 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22y 3.23.

También cabe señalar, que antes de realizar ninguna discretización, se debe comprobar que el tiempo de actuación total establecido para el trayecto sea lo suficientemente grande como para recorrer dicho trayecto con los tiempos mínimos de actuación particulares atendiendo a cualquier posible secuencia del estado de los semáforos. Como ya se ha comentado, se calcula el tiempo mínimo con las ecuaciones 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 considerando que el vehículo parte y llega del/al reposo. La expresión para el cálculo del tiempo mínimo en el cuál recorrer el trayecto es:

$$t_{min,total} = \sum_{i=1}^{N+1} t_{t\ i,min} + \sum_{i=1}^N t_{r\ i,max} \quad (3.27)$$

donde $t_{min,total}$ es el tiempo mínimo del trayecto completo para poder recorrerlo.

En caso de que el tiempo establecido sea menor que el tiempo mínimo necesario, el procedimiento de optimización no se ejecuta.

Una vez se sabe cuál es toda la casuística posible, es posible pasar calcular el consumo de combustible de cada caso y comparar para cada secuencia posible del estado de los semáforos cuál es la combinación óptima de perfiles de conducción de cada tramo con el fin de determinar la estrategia de conducción óptima. El consumo de combustible de cada uno de los casos se calcula con ayuda de la base de datos.

Para calcular el consumo total de cada caso posible el problema, es necesario interpolar con la base de datos. Se interpola dentro de la base de datos para obtener el consumo de cada tramo y el sumatorio del consumo de cada tramo, junto con el consumo de combustible durante las paradas en los semáforos, resulta ser el consumo total del caso.

$$W_{fuel} = \sum_{i=1}^{N+1} W_{fuel,i} + \sum_{i=1}^N \int_0^{t_{r\ i,j}} f(t_r) dt_r \quad (3.28)$$

Apartado 3. Metodología.

donde encontramos que $W_{fuel,i}$ es el consumo de combustible de cada tramo, $f(t_r)$ es el gasto de combustible instantáneo del vehículo parado y $t_{r,i,j}$ el tiempo que permanece en rojo el semáforo que retiene el vehículo.

Pero no basta con interpolar datos: en el caso de que el vehículo realice un tramo sin que deba parar habrá que servirse, a parte del consumo del recorrido, del resto de datos que la base proporciona: tiempo de frenado, distancia de frenado, velocidad con que se inicia la frenada y consumo durante la frenada. Con estos datos se puede calcular realmente el consumo del trayecto. Por cada tramo en el que no pare el vehículo, se resta el consumo durante el frenado al consumo de este tramo; y luego se aprovecha la velocidad con que inicia la frenada y la distancia de frenada para calcular fielmente el consumo del tramo posterior. Al tramo que le sigue, para interpolar y obtener el consumo que toca, se le añade la distancia de frenado del anterior y se establece como velocidad inicial del nuevo tramo la velocidad con la que iniciaría la frenada en el anterior. Ergo:

$$W_{fuel,i} = W_{f,tramo} - W_{f,frenada} \quad (3.29)$$

$$longitud_{i+1} = d_{i+1} + longitud_{frenada,i} \quad (3.30)$$

$$v_{inicial,i+1} = v_{frenada,i} \quad (3.31)$$

donde $W_{f,tramo}$ es el consumo de combustible del vehículo para la distancia total del tramo, $W_{f,frenada}$ el consumo de combustible del vehículo durante la frenada, d_i la longitud de cada tramo entre semáforos, $longitud_{frenada,i}$ la longitud de frenada por cada tramo, $longitud_{i+1}$ la distancia de modificada de cada tramo teniendo en cuenta que el vehículo pare o no, $v_{frenada,i}$ la velocidad con la que el vehículo inicia el frenado en cada tramo y $v_{inicial,i+1}$ la velocidad con que iniciaría el vehículo el tramo posterior suponiendo que el vehículo no para en el tramo actual.

3.3.1. Método de selección de candidatos: óptimo

La solución obtenida mediante la aplicación de este método debe representar el mismo perfil de conducción para aquellas secuencias del estado de los semáforos que sea idénticas, hasta el punto donde comiencen a diferir dichos estados. Por ejemplo, se estudia un trayecto con dos semáforos, y existen dos casos que coinciden en el estado del primer semáforo debiendo detener el vehículo el mismo tiempo en ambos casos, pero en el segundo los tiempos de parada son distintos; en ambos casos el perfil de conducción óptimo resulta idéntico hasta llegar al segundo semáforo. De esta manera, es posible el método resolutivo no proporcione la solución óptima para un caso particular, pero si proporciona la solución óptima del problema con incertidumbres, ya que esta solución minimiza la esperanza estadística del consumo de combustible

Para hallar una solución de este tipo, de forma genérica, el método elige la solución óptima para cada intervalo del dominio discretizado en función de la secuencia del valor de las variables de estado de los puntos discretos del dominio anteriores. Particularizando al problema planteado, este método elige el perfil óptimo de conducción de cada tramo en función de la secuencia del estado de los semáforos anteriores a dicho tramo, por lo que habrá más de un perfil de conducción óptimo para cada uno de estos tramos; salvo para el primero, pues sólo hay un único estado posible para el punto de partida y es el reposo. Para la elección de los perfiles óptimos de cada tramo se recorre el trayecto total comenzando por el primer tramo. Conforme se avanza en el trayecto, el número de secuencias posibles del estado de los semáforos anteriores al tramo estudiado crece, al igual que el número de perfiles óptimos para dicho tramo.

Por cada tramo del trayecto estudiado, el método de optimización exige determinar todas las posibles combinaciones del estado de los semáforos anteriores para luego buscar el perfil óptimo del tramo según la combinación del estado de los semáforos anteriores. Dado que para el primer tramo a estudiar sólo existe un posible estado del punto de partida, sólo habrá una combinación posible de estados; mientras que para el resto de casos, el número de combinaciones será:

$$\text{Combinaciones} = m^{i-1} \quad (3.32)$$

donde m es el número de discretizaciones del estado de los semáforos e i indica el tramo de estudio.

Una vez se ha seleccionado un tramo de estudio, por cada secuencia del estado de los semáforos anteriores a dicho tramo, se han de estudiar todos los tiempos de actuación particular para dicho tramo. Cada tiempo de actuación particular para dicho tramo formará parte de varios casos de todos los posibles, pero no todos estos casos presentarán la misma secuencia del estado de los semáforos anteriores al tramo estudiado. Por lo cuál, para el tramo y la secuencia de estados en cuestión sólo serán analizados aquellos casos, correspondientes a cada tiempo de actuación particular del tramo, cuya secuencia de estados iniciales sea igual a la seleccionada antes. Además, habrá que descartar los tiempos de actuación particular que no formen parte de un conjunto de casos suficientemente grande como para representar todas las combinaciones del estado de los semáforos posibles cumpliendo con la secuencia del estado de los semáforos anteriores al tramo. Este número de combinaciones restantes viene de determinado por:

$$n = m^{N+1-i} \quad (3.33)$$

donde n es el número de combinaciones del estado de los semáforos restantes, m el número de discretizaciones del estado de los semáforos, N el número de semáforos e i el indicador del tramo de estudio.

Siendo ya objeto de estudio un tiempo de actuación particular para un tramo, el método de optimización realiza una criba más antes de pasar a calcular la esperanza media de consumo. Si el abanico de casos de los que forma parte el tiempo de actuación particular es lo suficientemente grande, cabe la posibilidad de que varios casos representen la misma combinación del estado de los semáforos. Por tanto, el método de optimización elimina aquellos casos que, para una misma combinación del estado de los semáforos, presentan mayor consumo de combustible; de forma que por cada combinación posible sólo se queda con la óptima, aquella que minimiza el consumo de combustible.

Una vez se tienen los perfiles de conducción candidatos a ser solución de un tramo y de una secuencia del estado de los semáforos anteriores a dicho tramo, el método de resolución de problemas de optimización demanda el cálculo la esperanza consumo de combustible para luego elegir el perfil de conducción óptimo para el tramo y la secuencia en cuestión. El perfil óptimo será aquél que presente una menor esperanza de consumo. El consumo de combustible medio esperado se calcula según la siguiente expresión:

$$\overline{W_{fuel}} = \sum_{i=1}^n (W_{fuel_i} \cdot Prob_i) \quad (3.34)$$

siendo W_{fuel_i} el consumo total de cada combinación de perfiles a lo largo de todo el trayecto y $Prob_i$ la probabilidad de la combinación de semáforos de cada caso. Al ser sucesos independientes unos otros, la probabilidad de que se encuentre cierta combinación de los estados de un semáforo resulta ser el producto de la probabilidad del estado de cada semáforo.

Habiendo ya determinado el conjunto de soluciones óptimas, una por cada caso posible, tan sólo quera representar las distintas variables de los perfiles de conducción a lo largo de la trayectoria: velocidad, régimen de giro del motor, marcha engranada, par motor, pedal del acelerador, pedal del freno, gasto de combustible acumulado y gasto de combustible instantáneo.

En las figuras 3.1 y 3.2 es posible ver dos perfiles de conducción determinados a partir de este método. Han sido elaborados para un tramo de 450 m que cuenta con dos semáforos, uno situado a 150 m del inicio y otro a 250 m. El primer perfil de conducción, figura 3.1, se corresponde con un caso en el cual, el vehículo no debe detenerse en el primer semáforo, pero sí en el segundo durante 15 s. Para el caso del otro perfil de conducción, figura 3.2, el vehículo no debe pararse en el primer semáforo, y sí en el segundo, pero 9 s. Como se ve, la solución que proporciona el problema define una política de conducción que varía según la información que recibe de los semáforos a su paso por ellos, pues ambos perfiles de conducción son iguales hasta llegar al segundo semáforo; semáforo para el cuál la combinación del estado de los semáforos deja de ser igual. Esto

Apartado 3. Metodología.

hace que el perfil de velocidad en el último tramo (tras el segundo semáforo) varíe para cumplir con el tiempo de carrera dado. El tiempo fijado para el trayecto es de 87 s.

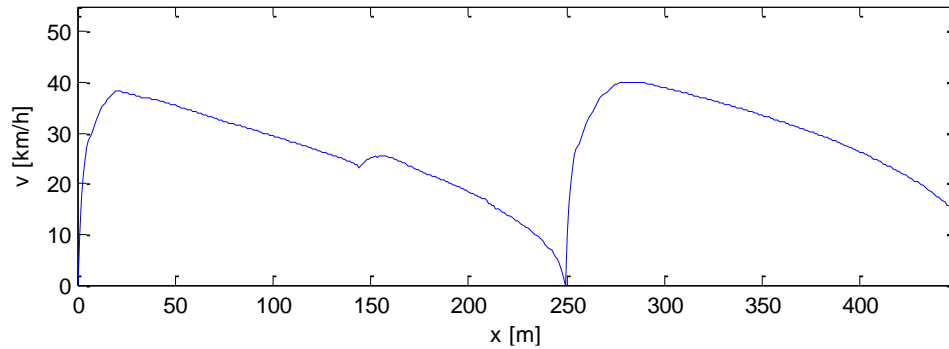


Figura 3.1.1: Perfil de la velocidad.

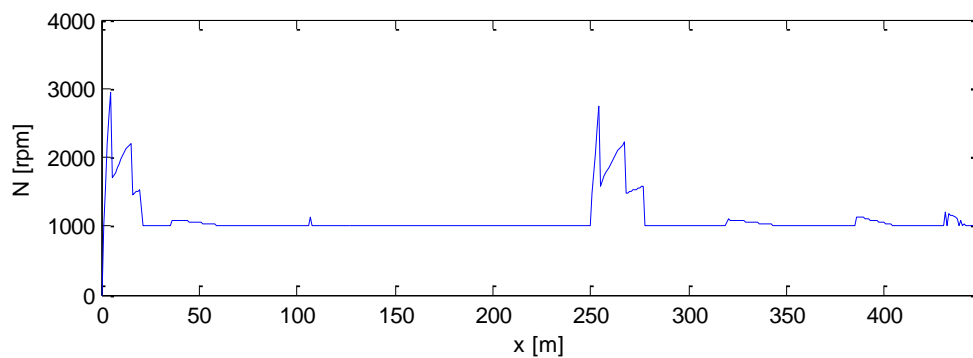


Figura 3.1.2: Perfil del régimen de giro del motor.

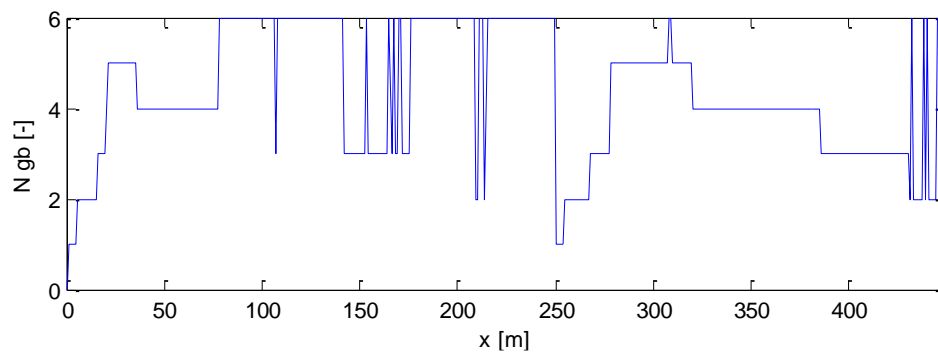


Figura 3.1.3: Perfil de la marcha engranada.

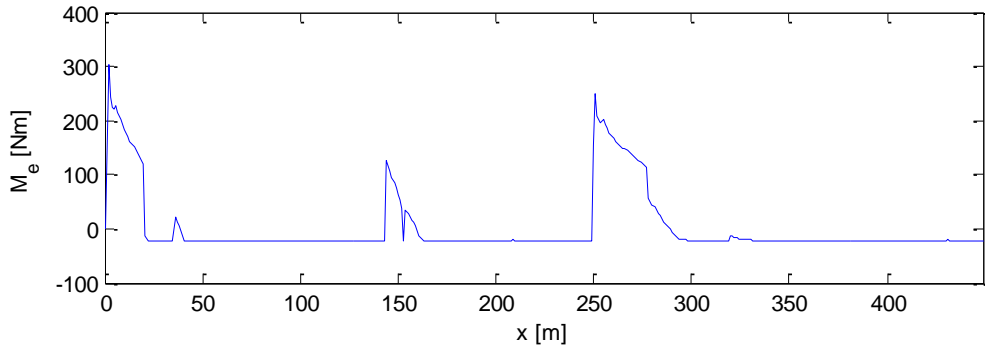


Figura 3.1.4: Perfil del par generado por el motor.

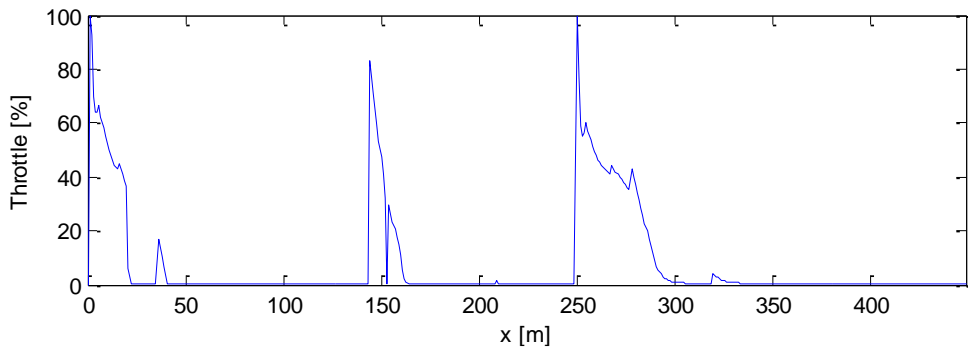


Figura 3.1.5: Perfil del pedal acelerador.

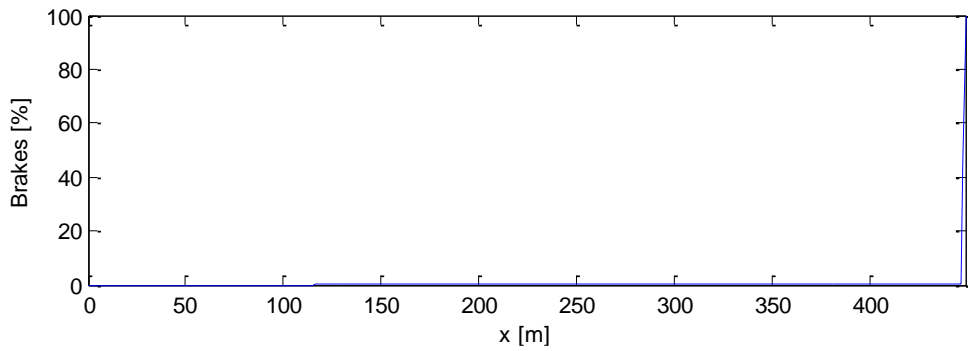


Figura 3.1.6: Perfil del pedal de freno.

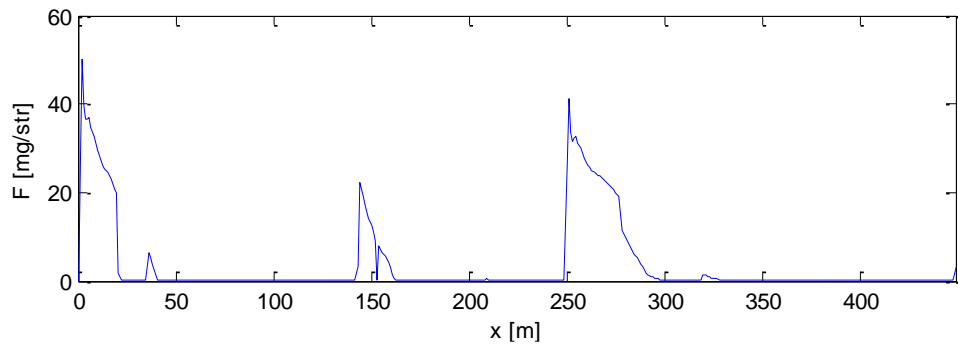


Figura 3.1.7: Perfil del consumo de combustible instantáneo.

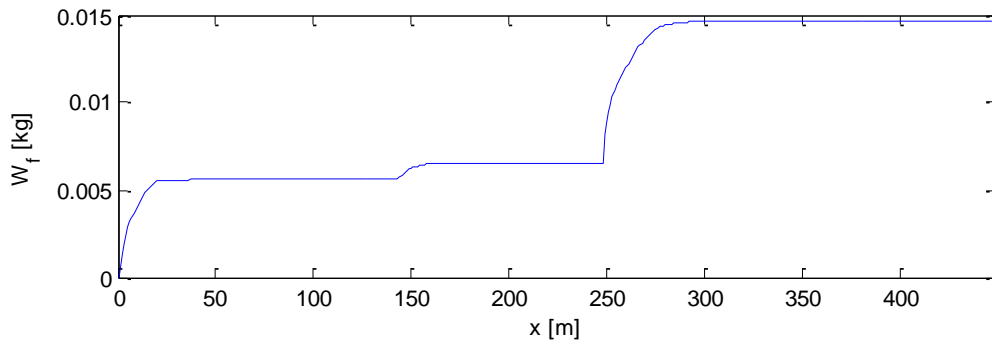


Figura 3.1.8: Perfil del consumo de combustible acumulado.

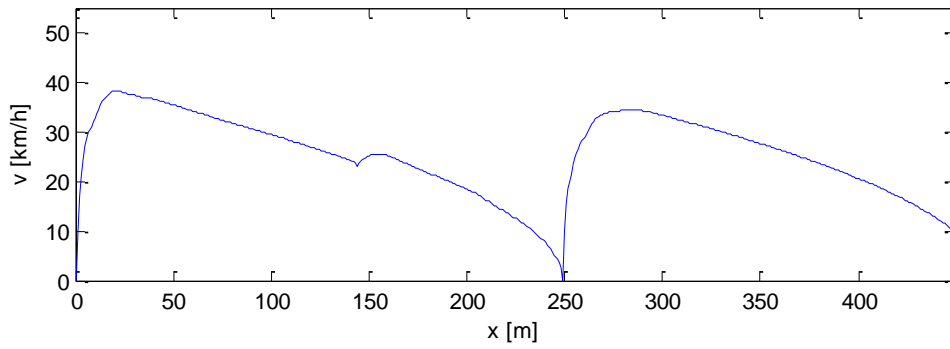


Figura 3.2.1: Perfil de la velocidad

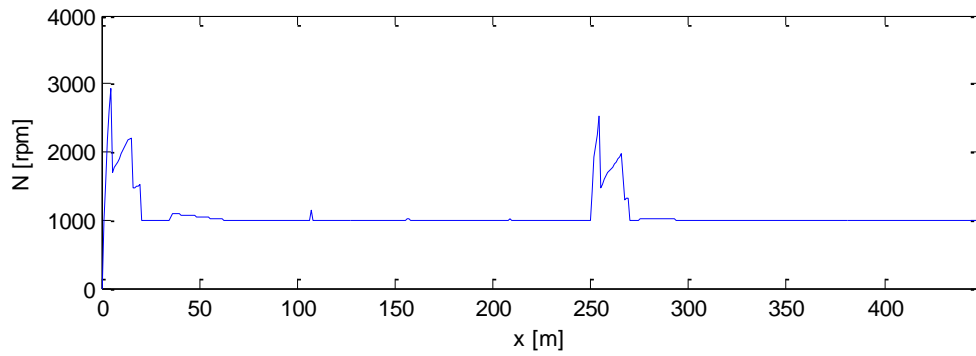


Figura 3.2.2: Perfil del régimen de giro del motor.

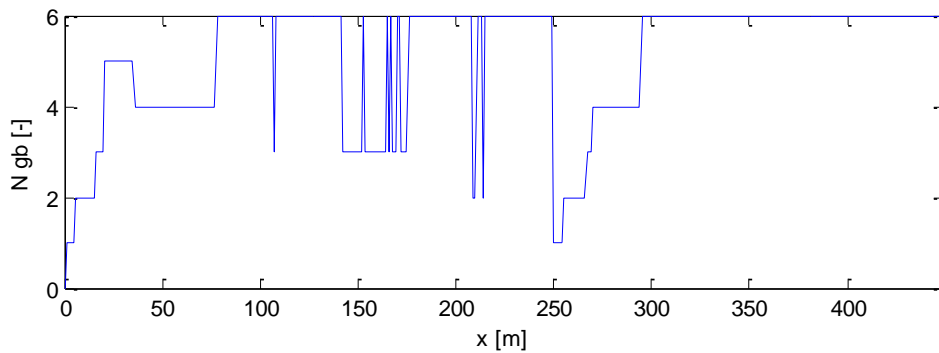


Figura 3.2.3: Perfil del marcha engranada.

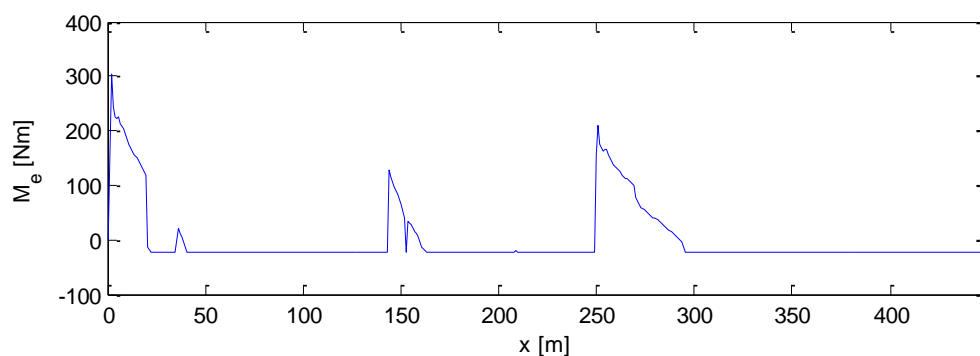


Figura 3.2.4: Perfil del par generado por el motor.

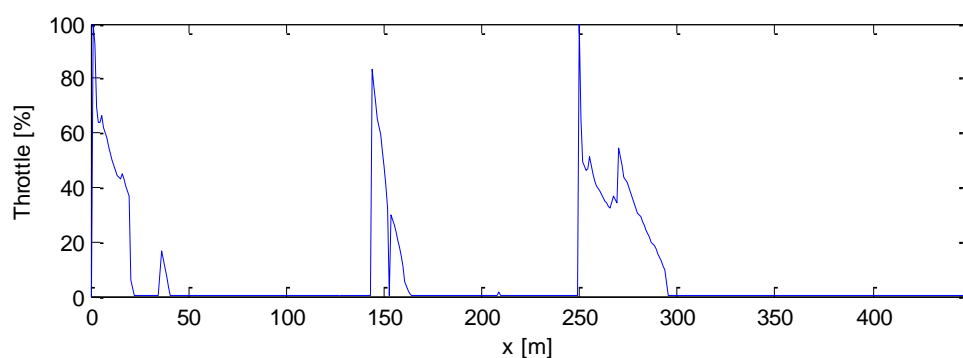


Figura 3.2.5: Perfil del pedal acelerador.

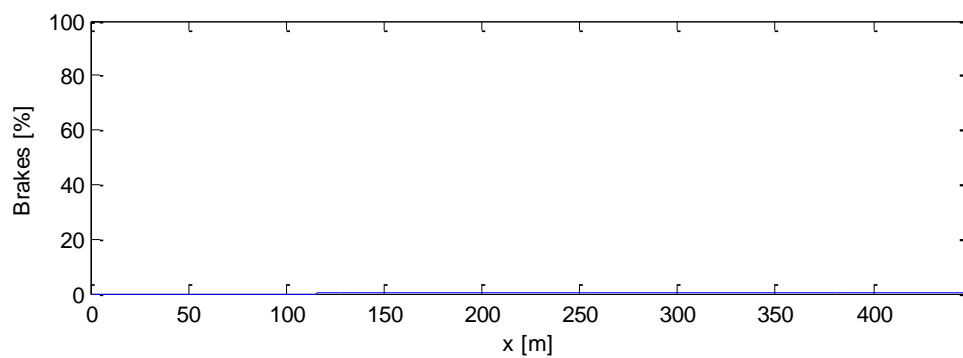


Figura 3.2.6: Perfil del pedal freno.

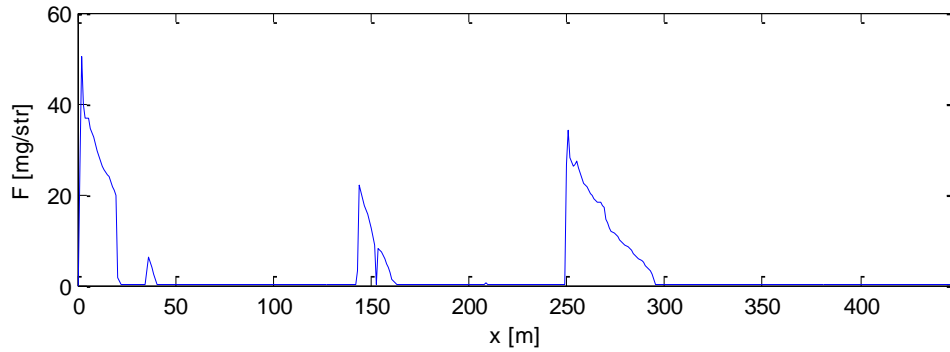


Figura 3.2.7: Perfil del consumo de combustible instantáneo.

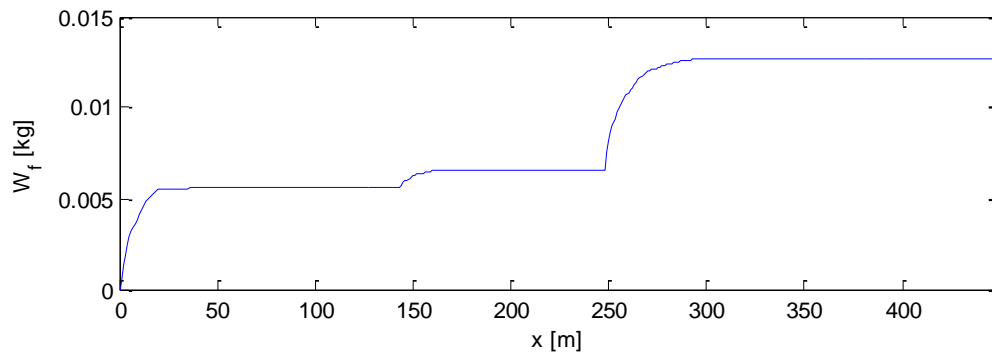


Figura 3.2.8: Perfil del consumo de combustible acumulado.

3.4. Validez del método

El método establecido para la selección de perfiles óptimos sólo contempla la aparición de fenómenos que modifiquen la conducción del vehículo en ciertos puntos cuya localización es sabida de antemano. Asimismo, se debe conocer la probabilidad de que esos sucesos pasen para determinar las soluciones óptimas. Es por ello que este método es apropiado para resolver problemas simplificados (aunque esto ya había quedado claro en la descripción del problema), resultaría imposible plantear un método que de antemano determinara unos perfiles de conducción óptimos para cualquier situación real ya que no se pueden tener en cuenta todas las variables aleatorias que entran en juego. Para plantear un método así sería necesario crear un método que adivinara el futuro.

Por tanto, el proceso resolutivo aquí propuesto es sólo válido para circuitos que cumplan con la condición antes mencionada: sólo podrán tener lugar fenómenos

restrictivos para la velocidad del vehículo cuya probabilidad para que ocurra y localización sobre el circuito sean conocidas. En el problema propuesto para resolver se ha supuesto los semáforos como los elementos que introducen los fenómenos restrictivos de la velocidad del vehículo, pero podrían plantearse también señales de ceda el paso o señales de stop. Por ejemplo, una señal de stop obligaría a detener el vehículo siempre a su altura, y la incertidumbre resultaría ser el tiempo que se está parado, siendo el tiempo parado en la señal de stop una variable de estado del problema (al igual que sucede con los semáforos).

Este método es útil para cualquier circuito propuesto, independientemente de si es circuito urbano o extraurbano e independientemente también del número de elementos restrictivos de la velocidad del vehículo. Se trata de un sistema muy robusto que permite obtener soluciones siempre. Aunque las soluciones que ofrece no son exactamente las óptimas para todos y cada uno de los posibles casos, su conjunto sí es la solución óptima al problema con incertidumbres, pues el conjunto de soluciones que proporciona minimiza la esperanza estadística del consumo de combustible.

Ahora bien, al poner en práctica este método, aparece el inconveniente del tiempo de ejecución y la vastedad de datos que manejar para problemas muy grandes. Además de que sería absurdo tratar de aplicar este método con lápiz y papel para problemas muy discretizados pues habría que emplear una infinidad de tiempo y de folios, la gran cantidad de información que se debe manejar supone una gran limitación incluso si no importara el tiempo de cálculo que debiera emplear un ordenador (pues al final daría resultados): es posible que la ejecución del método requiriese ocupar más memoria de la que dispone el ordenador.

El método sigue siendo válido aunque no se disponga de una base de datos que te ayude a computar el consumo de todos los casos posibles. Eso sí, sin la base de datos, el tiempo para llevar a cabo el método crece enormemente, porque lleva a resolver el problema de optimización de consumo de combustible por cada tramo interno de camino total una y otra vez. Debido a ello, contar con una base de datos que permita obtener el consumo del tramo resulta extremadamente útil. Aunque esta base de datos permite

Apartado 3. Metodología.

reducir el tiempo de aplicación del proceso resolutivo, también introduce límites o barreras. La base de datos es construida en base a un rango de valores para la distancia a recorrer, la velocidad inicial del vehículo y la velocidad media que debe llevar durante el trayecto; así mismo, los perfiles de conducción óptimos calculados para la base de datos se obtienen teniendo en cuenta el límite de la velocidad permitida. Por tanto, si el problema que se pretende resolver se sale de los intervalos de valores para los que se ha construido la base de datos no será posible precomputar el consumo de todos y cada uno de los casos, y posiblemente, tampoco encontrar la solución óptima. Claro está que la base de datos es una herramienta externa al método que resulta útil, y su elaboración, al ser totalmente arbitraria, debe ajustarse al problema que se desea resolver.

Apartado 4

Análisis de los Resultados

Para comprobar la utilidad del método implementado, serán comparados los perfiles de conducción de la solución óptima proporcionada por dicho método con los perfiles de conducción óptimos hallados con el método determinista y con un estilo de conducción que mantiene la velocidad constante a lo largo de cada tramo (tratando de simular una conducción estándar). A éste último modelo de conducción se le denominará de ahora en adelante como “conductor”. Como es lógico, en la comparación de sendos tipos de conducción, se ha analizado un mismo trayecto y tiempo de ejecución.

En primer lugar, para el análisis de las distintas formas de conducir serán enfrentados en una gráfica la probabilidad de cada combinación del estado de los semáforos posible y el consumo de combustible que supondría para recorrer el camino establecido. Después se estudiará un diagrama de barras del consumo de combustible medio esperado para cada estilo de conducción. En segundo lugar, y continuando con la comparativa entre los estilos de conducción, se señalarán en un par de casos las diferencias que suponen estos distintos estilos para la evolución del perfil de cada una de las variables estudiadas.

Tras esto, se analizará el efecto que tiene la distribución probabilística del estado de los semáforos en el ahorro de combustible que supone seguir la estrategia de conducción proporcionada por el método de optimización con incertidumbres. Y por último, será evaluado el efecto del tiempo establecido para recorrer el trayecto sobre el consumo de combustible.

Los resultados que mostramos en este apartado se corresponden para el estudio de un trayecto de 450 m de longitud que cuenta con dos semáforos. El primero de ellos se sitúa a 150 m del punto de partida y permanece 80 segundos en verde por cada 20 segundos que lo hace en rojo; el segundo semáforo se encuentra a 250 m del inicio y permanece 60 segundos en verde por cada 15 segundos que lo hace en rojo. El tiempo

establecido para recorrer este trayecto es de 87 segundos, la discretización temporal para realizar cada tramo del camino se ha realizado segundo a segundo, y para la discretización del estado de los semáforos se han considerado 6 estados posibles: un estado en verde (0 s de parada) y 5 estados en rojo (con 5 posibles tiempos de parada). Esto supone que la casuística final será constatada por 36 casos posibles. También cabe señalar que para ver el efecto de la distribución probabilística se ha reducido el tiempo que los semáforos permanecen en verde a 32 y 22 segundos respectivamente; y para el estudio del efecto del tiempo en el cuál recorrer el trayecto, se han estudiado varios tiempos de carrera comprendidos entre 80 y 120 segundos.

Análisis del estilo de conducción

Para el análisis inicial de los distintos tipos de conducción se ha fijado el tiempo para recorrer el trayecto en 87 segundos. En la figura 4.1 se enfrenta la probabilidad de cada caso estudiado y el combustible consumido durante su realización, tanto para la estrategia de conducción óptima con incertidumbres como para el modelo “conductor”.

Cada punto representa un caso de todos los eventos posible para el circuito urbano, es decir, una combinación posible de estados de los semáforos. Cada uno de estos casos tiene un consumo de combustible y una probabilidad diferente de que tenga lugar, aunque bastantes de estos puntos coinciden en el nivel de probabilidad, ya que sólo hay dos semáforos y dos niveles de probabilidad para cada semáforo.

Si se fijan, podrán discernir que para un mismo nivel de probabilidad, por lo general son los casos pertenecientes a la estrategia de conducción óptima aquellos que menor consumo presentan. Es más, sólo en el nivel inferior de probabilidad se tienen casos pertenecientes a la estrategia de conducción óptima cuyo consumo de combustible pueda ser mayor que el consumo de los casos del método “conductor”. Viendo que para los mismos niveles de probabilidad, el combustible empleado en cada caso es siempre menor para la estrategia desarrollada en este trabajo, se puede asegurar que la esperanza estadística de consumo de combustible será menor para dicha estrategia que para el

Apartado 4. Análisis de los Resultados.

modelo “conductor”. Aunque en esta gráfica no aparecen recogidos la probabilidad y el consumo de combustible de los casos optimizados de forma determinista, es seguro que la esperanza media de combustible será mínima; pero es posible que la diferencia de la esperanza estadística de consumo de combustible entre la solución determinista y la solución con incertidumbres sea muy baja.

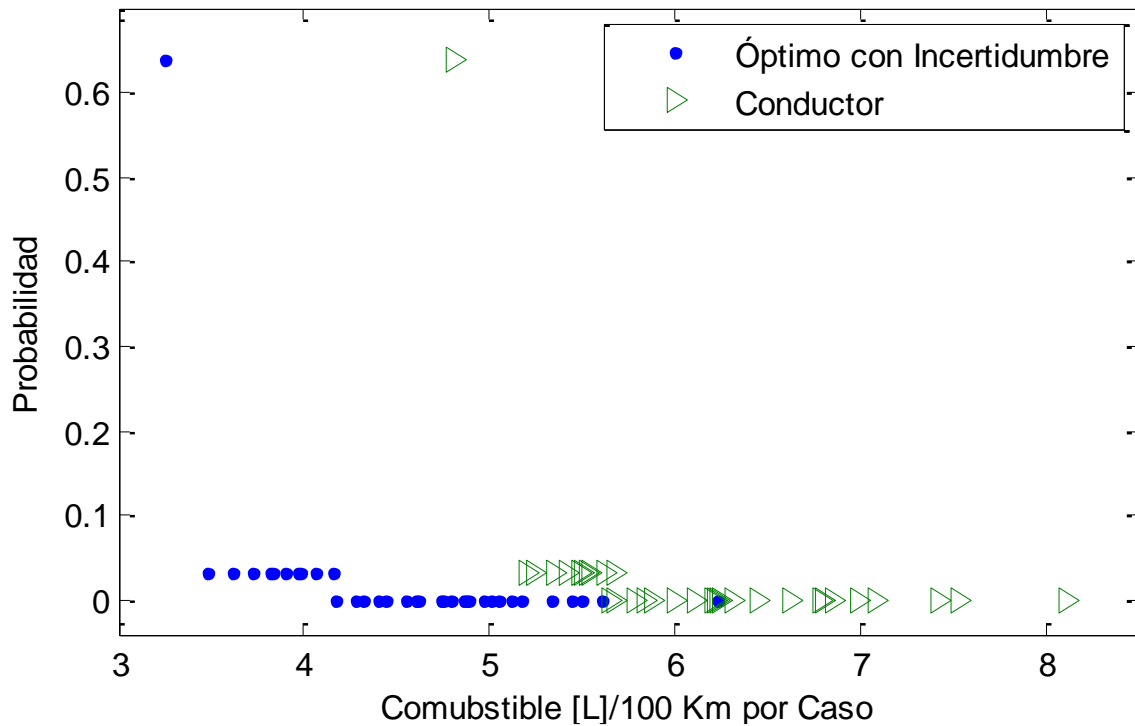


Figura 4.1

Comprueben ahora si las pesquisas que acaban de ser establecidas estaban bien fundamentadas o no. La figura 4.2 representa el diagrama de barras del consumo medio de combustible que se espera gastar cada 100 Km con cada estilo de conducción diferente, y la figura 4.3 también es otro diagrama de barras: en ella, la esperanza estadística de consumo de combustible de cada estilo aparece expresada en porcentaje respecto del modelo “conductor”. Según las gráficas, para el trayecto y el tiempo establecidos, la solución determinista del problema ofrece el menor consumo esperado, seguida muy de cerca por la solución óptima al problema con incertidumbre, y el mayor consumo de combustible recae sobre el modelo “conductor”; por tanto, las pesquisas establecidas anteriormente son ciertas.

Por cada 100 Km, se espera que con el modelo “conductor” sean empleados 5.08 L de combustible, mientras que el consumo esperado para la solución óptima con incertidumbres es de 3.52 L (69.20% del consumo de “conductor”) y 3.38 L (66.55% del consumo de “conductor”) para la solución determinista. Luego, aplicar la estrategia que desarrolla el método elaborado en este trabajo supondría ahorrar un 30.80% del combustible empleado en una forma de conducción estándar, es decir, 1.56 L de combustible cada 100 Km. Si el precio del gasoil y la gasolina suele situarse entre 1.05 y 1.30 €, el ahorro económico que implica la estrategia de conducción determinada por el método de optimización con incertidumbres puede oscilaría entre 1.64 y 2.03 € cada 100 Km, lo que no es para nada despreciable.

Esperanza Estadística de Consumo de Combustible

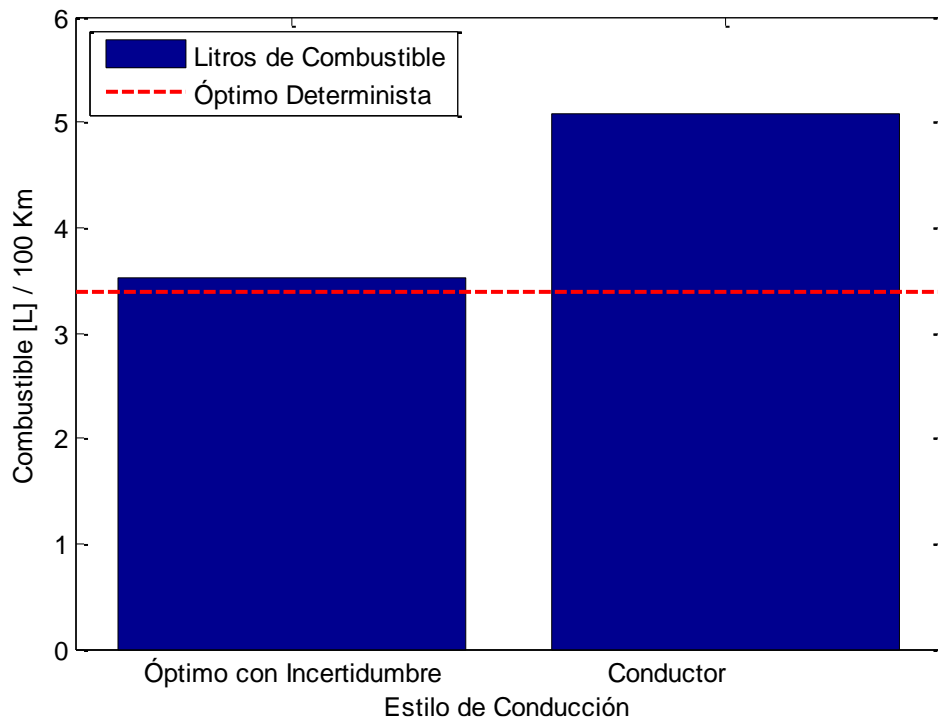


Figura 4.2: Consumo esperado, 3.38 L para la solución determinista, 3.52 L para la solución con incertidumbres, 5.08 L para el modelo “conductor”.

Esperanza Estadística de Consumo de Combustible

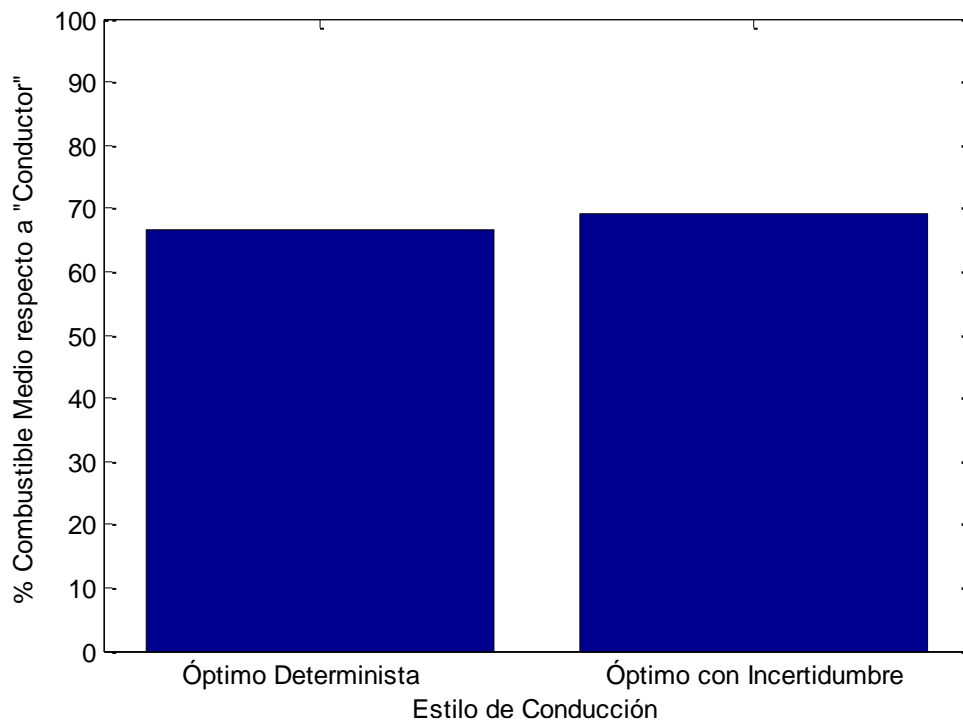


Figura 4.3: Porcentaje del consumo esperado, 66.55% para la solución determinista, 69.20% para la solución con incertidumbres.

Ahora mostraremos la evolución de cada una de las variables del perfil de conducción para dos casos representativos de las distintas combinaciones de la situación de los semáforos. El primer caso, figuras 4.4, es aquél donde encontramos el primer semáforo en rojo durante 20 segundos y el segundo en verde; y el segundo caso, figuras 4.5, supondrá parar 8 segundos en el primer semáforo y 15 segundos en el último.

En cada uno de estos casos, vemos que el consumo acumulado de combustible para el estilo de conducción óptimo es siempre el menor a lo largo de todo el trayecto, y éste crece al cambiar al estilo de conducción óptimo con incertidumbres, así como al cambiar al modelo “conductor”. En los casos representados, el consumo acumulado de combustible del método de optimización con incertidumbres es menor que el consumo acumulado del modelo “conductor”. No obstante, podría resultar que en algún caso el consumo acumulado del modelo “conductor” fuera ligeramente menor que el del método de optimización con incertidumbres, puesto que su finalidad es determinar una estrategia que pueda ser seguida siempre, tomando perfiles de conducción alternativos según el desarrollo de las

eventualidades del trayecto. Al final, busca los perfiles de conducción que permiten reducir el consumo de combustible medio.

Por un lado, se observa que, tanto en un caso como en otro, los estilos de conducción de la soluciones óptimas (tanto determinista como con incertidumbres) presentan también consumos similares; los perfiles que siguen la velocidad, el régimen de giro, el acelerador y el freno también lo son. Es lógico que estos dos estilos de conducción presenten perfiles del pedal del acelerador y del pedal del freno similares, ya que los perfiles de velocidad también lo son; y dado que el gasto de combustible es proporcional al pedal del acelerador (por lo que seguirá un perfil muy parecido a éste), al final son el acelerador y el freno, combinados con la marcha del vehículo, los elementos que determinan su velocidad. La escasa diferencia en el consumo de combustible se debe sólo al hecho de que la solución determinista cuenta con ventaja: en este problema se sabe de antemano el estado de los semáforos.

Sin embargo, no ocurre lo mismo con el perfil de conducción del modelo “conductor”. Este último es totalmente distinto: al mantener una velocidad constante a lo largo del trayecto, el pedal del acelerador y la marcha en granada presentan un perfil bastante plano, salvo por las zonas de aceleración y frenado. El modelo “conductor apenas hace funcionar al motor con un rendimiento elevado, por el contrario, los otros dos estilos de conducción sí lo llevan a regímenes de funcionamiento de alto rendimiento; de ahí la gran diferencia en el consumo de combustible.

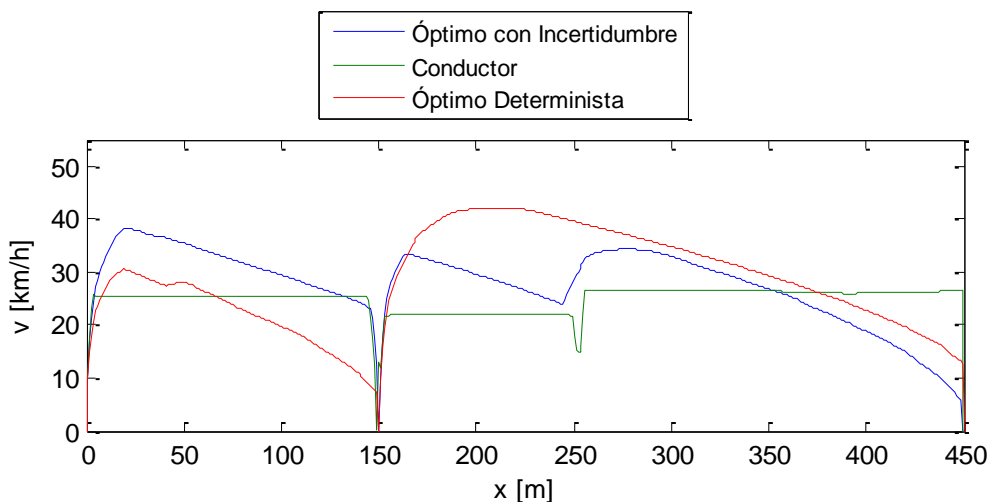


Figura 4.4.1: Perfil de la velocidad.

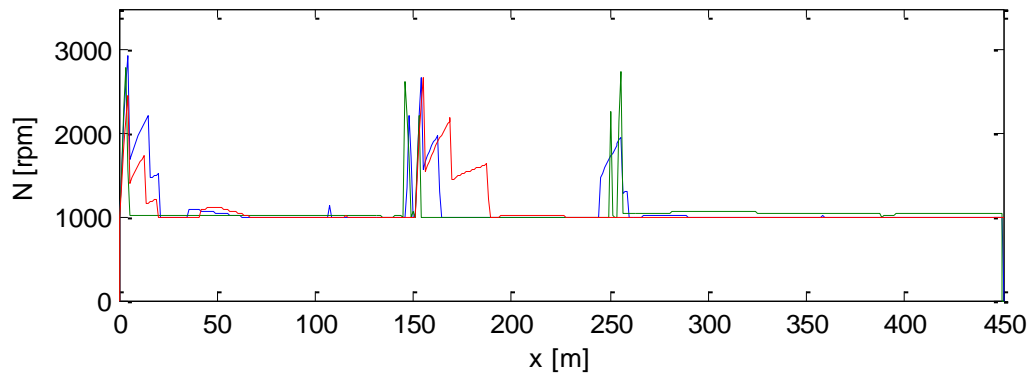


Figura 4.4.2: Perfil del régimen de giro del motor.

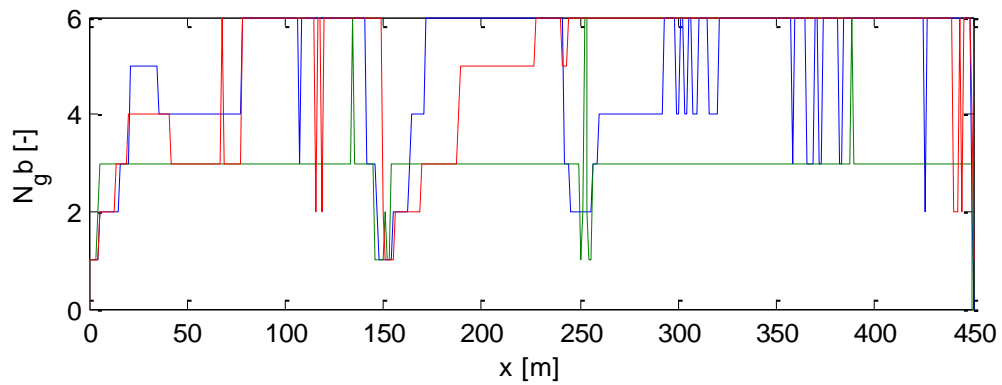


Figura 4.4.3: Perfil de la marcha engranada.

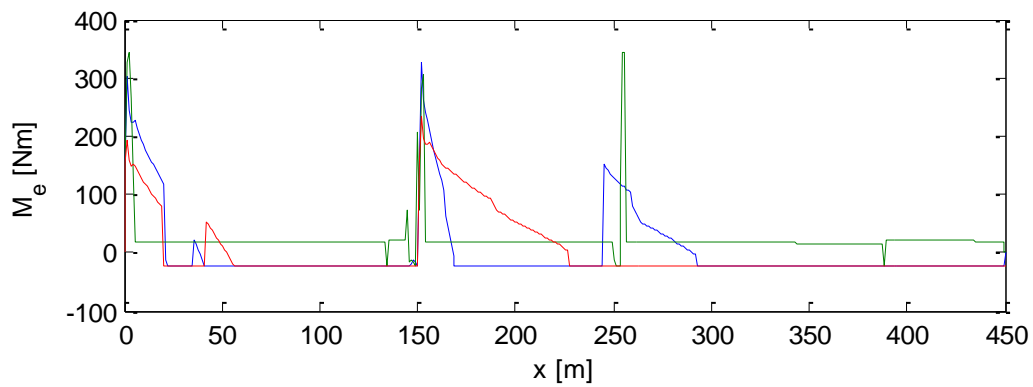


Figura 4.4.4: Perfil del par generado por el motor.

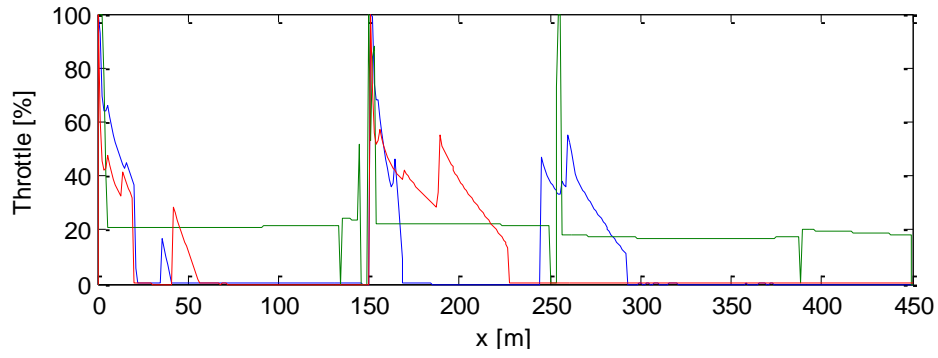


Figura 4.4.5: Perfil del pedal acelerador.

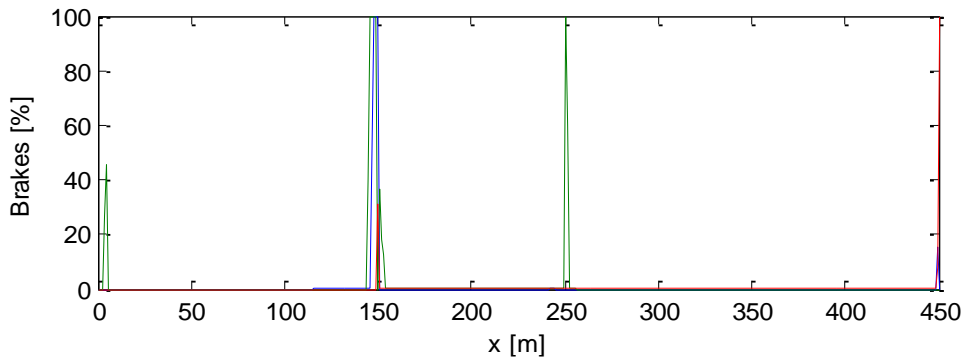


Figura 4.4.6: Perfil del pedal de freno.

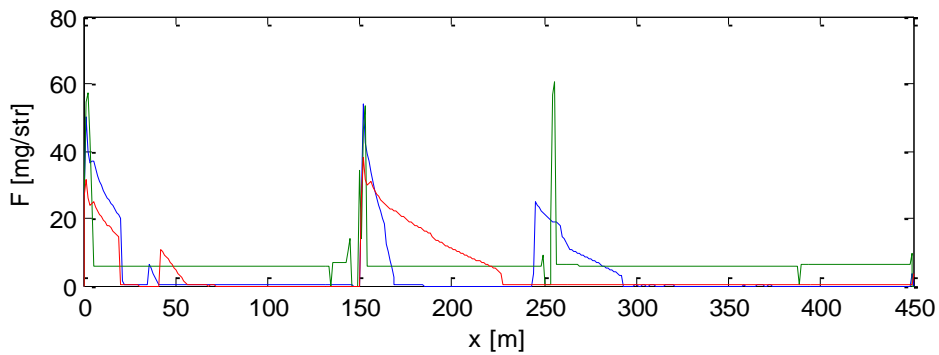


Figura 4.4.7: Perfil del consumo de combustible instantáneo.

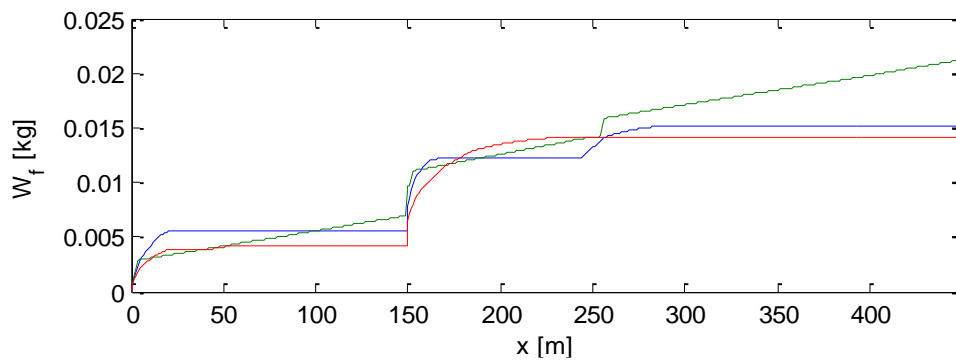


Figura 4.4.8: Perfil del consumo de combustible acumulado.

Apartado 4. Análisis de los Resultados.

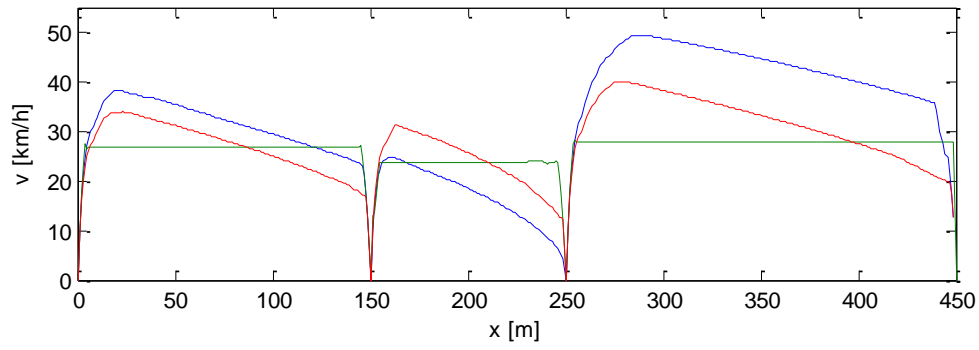


Figura 4.5.1: Perfil de la velocidad.

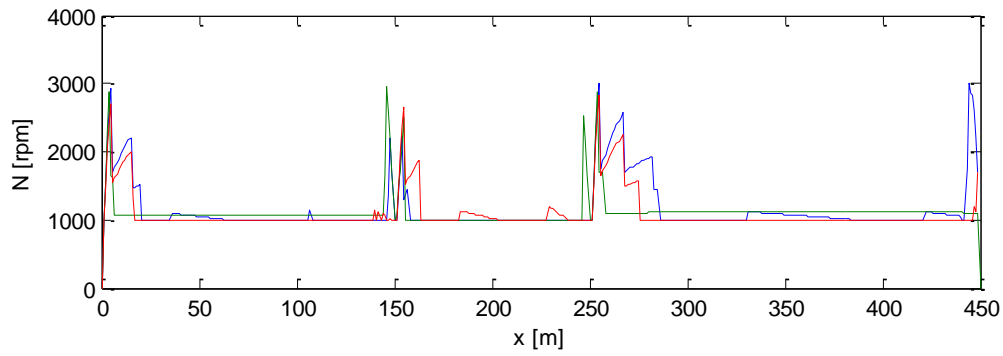


Figura 4.5.2: Perfil del régimen de giro del motor.

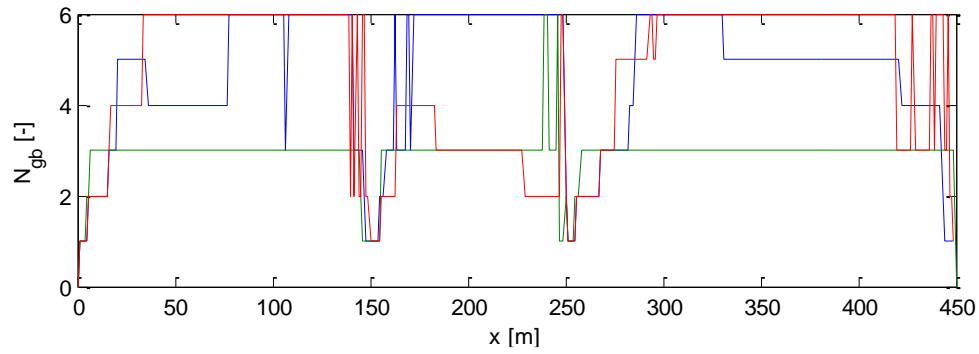


Figura 4.5.3: Perfil de la marcha engranada.

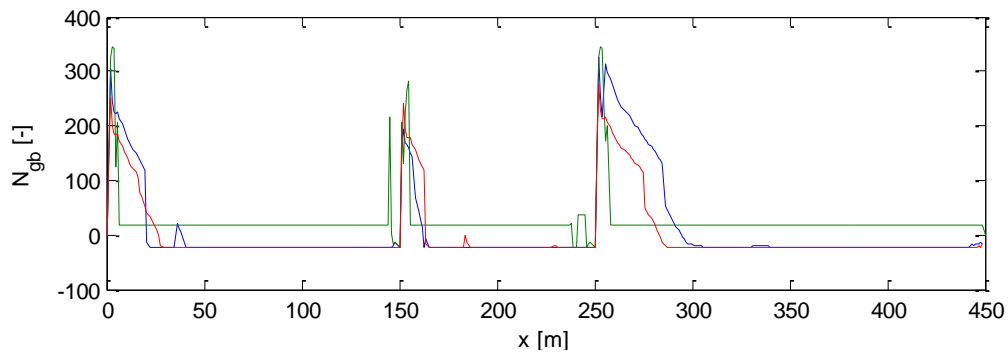


Figura 4.5.4: Perfil del par generado por el motor.

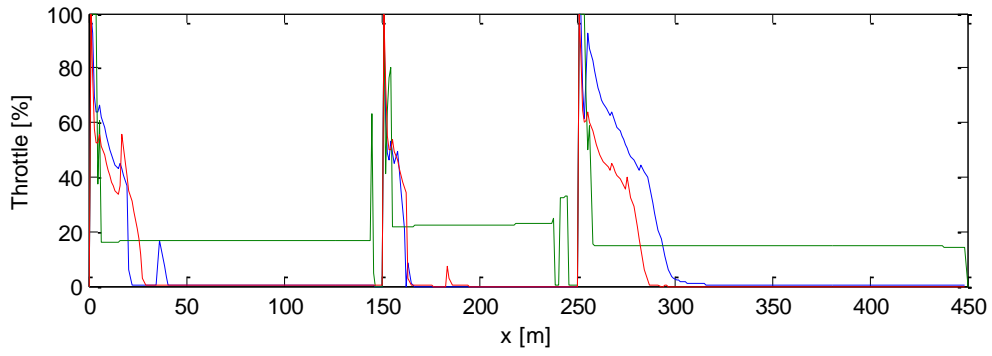


Figura 4.5.5: Perfil del pedal acelerador.

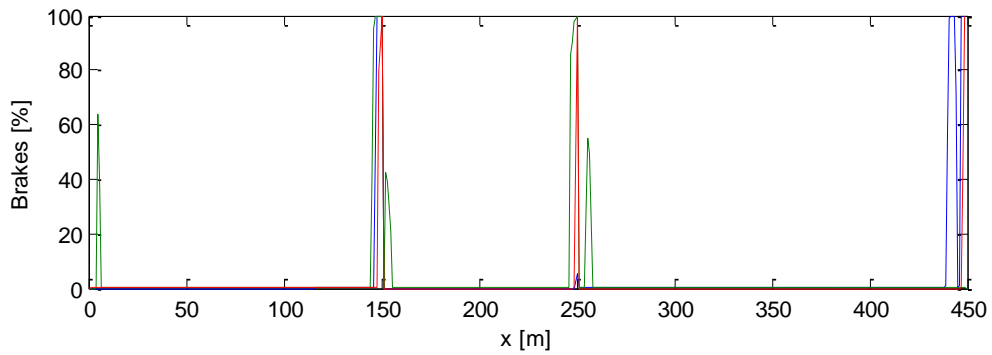


Figura 4.5.6: Perfil del pedal de freno.

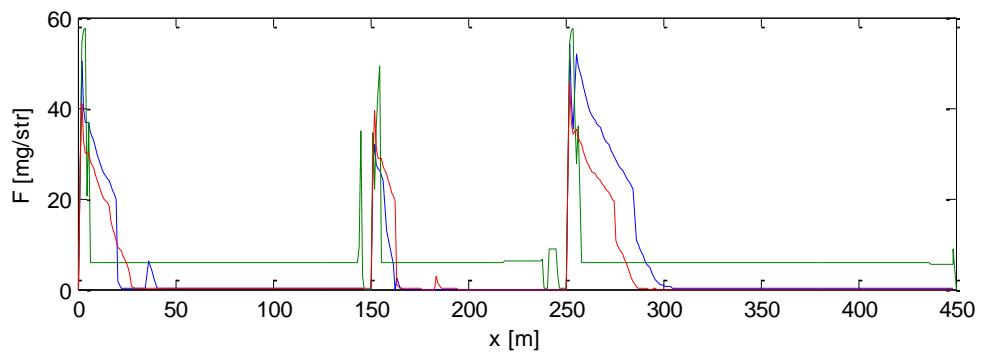


Figura 4.5.7: Perfil del consumo de combustible instantáneo.

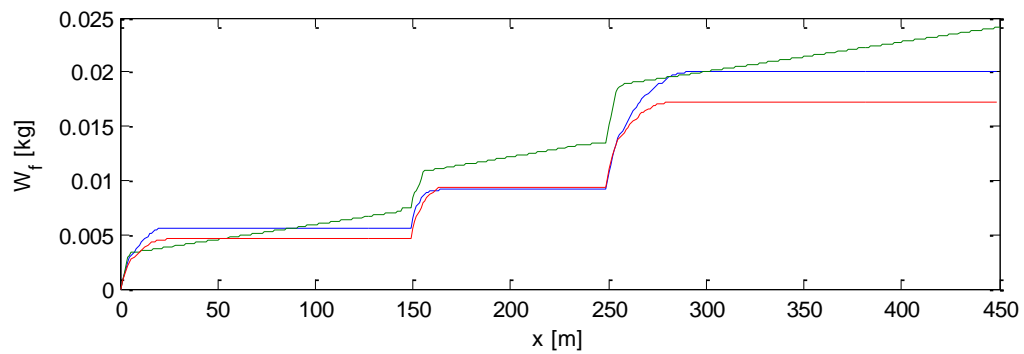


Figura 4.5.8: Perfil del consumo de combustible acumulado.

Apartado 4. Análisis de los Resultados.

Efecto de la distribución probabilística del estado de los semáforos.

En esta sección, se estudiará que sucede con el consumo de combustible esperado al modificar la distribución probabilística de la casuística del problema. En el ejemplo anterior, el tiempo que permanecían los semáforos en verde era bastante mayor que el tiempo que permanecían en rojo: 80/20 para el primer semáforo y 60/15 para el segundo, es decir, permanecían 4 veces más tiempo en verde que en rojo. Eso implicaba una probabilidad muy alta de encontrar los semáforos en verde, mayor que el 60%. Ahora, el tiempo en verde de los semáforos ha sido reducido, siendo: 32/20 para el primer semáforo y 22/15 para el segundo. De esta manera, sólo permanecen en verde 1.6 y 1.46 veces más tiempo en verde cada semáforo. Esto permite acercar la probabilidad de que aparezcan en rojo los semáforos a la probabilidad de que aparezcan en verde. Al comparar el gráfico de la figura 4.6 con el de la figura 4.1, se puede observar que, además de haberse modificado la probabilidad de los distintos casos, también se ha visto modificada la distribución del consumo de combustible (esto último sólo para la solución óptima con incertidumbre, no para el modelo “conductor”).

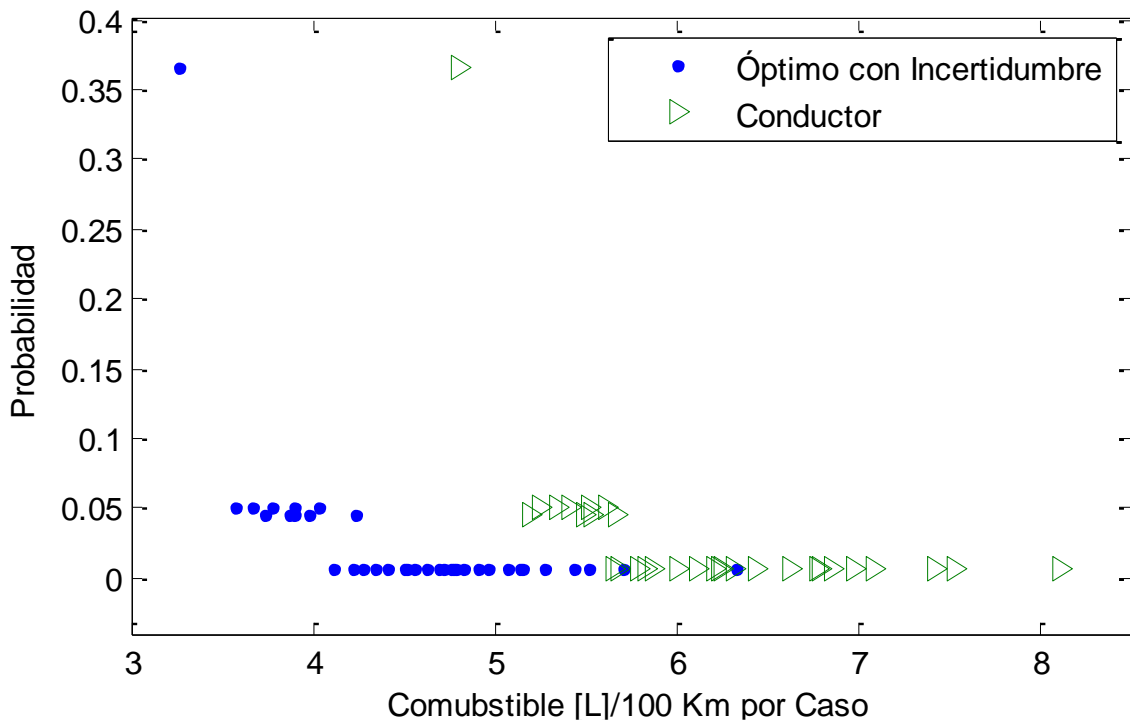


Figura 4.6

Dado que, con respecto al ejemplo anterior, ha aumentado la probabilidad de encontrar los semáforos en rojo, ha aumentado la probabilidad de encontrar aquellas combinaciones del estado de los semáforos que mayor consumo de combustible suponen para el vehículo. Por tanto, la esperanza estadística de consumo de combustible también ha crecido. En la figura 4.7 se puede ver consumo medio de combustible esperado cada 100 km para cada estilo de conducción en función de la probabilidad que exista de encontrar los semáforos en rojo.

Como punto positivo, las soluciones proporcionadas por los métodos de optimización determinista y con incertidumbres siguen siendo las de menor consumo y siguen suponiendo un ahorro de combustible importante respecto al estilo de conducción supuesto como estándar: modelo “conductor”. De hecho, la diferencia de consumo de combustible entre el modelo de conducción estándar y las estrategias propuestas por modelos optimizados es prácticamente constante, por lo que la eficiencia del método de optimización respecto a este parámetro es cuasi constante. Como era lógico, la esperanza de consumo de combustible se incrementa a la misma vez que aumenta la probabilidad de encontrar los semáforos en rojo.

Por otro lado, vemos que la diferencia de combustible empleado entre el caso optimizado determinista (conocidos los estados de los semáforos de antemano) y la solución con incertidumbres es muy pequeña. En la figura 4.8 queda representada la diferencia de consumo de combustible entre ambas soluciones en porcentaje respecto a la solución determinista. No obstante, la máxima diferencia de consumo de combustible entre estos casos no llega al 3% del combustible empleado con el método determinista. También se ve que conforme nos acercamos a los extremos, es decir, que la probabilidad de encontrar un semáforo en rojo sea 0 o del 100%, nos lleva a que la solución óptima determinista y la solución óptima con incertidumbres sean la misma. Esto se debe a que el problema completo estaría totalmente determinado y no habría incertidumbres: el semáforo siempre sería encontrado en verde o en rojo.

Esperanza Estadística de Consumo de Combustible

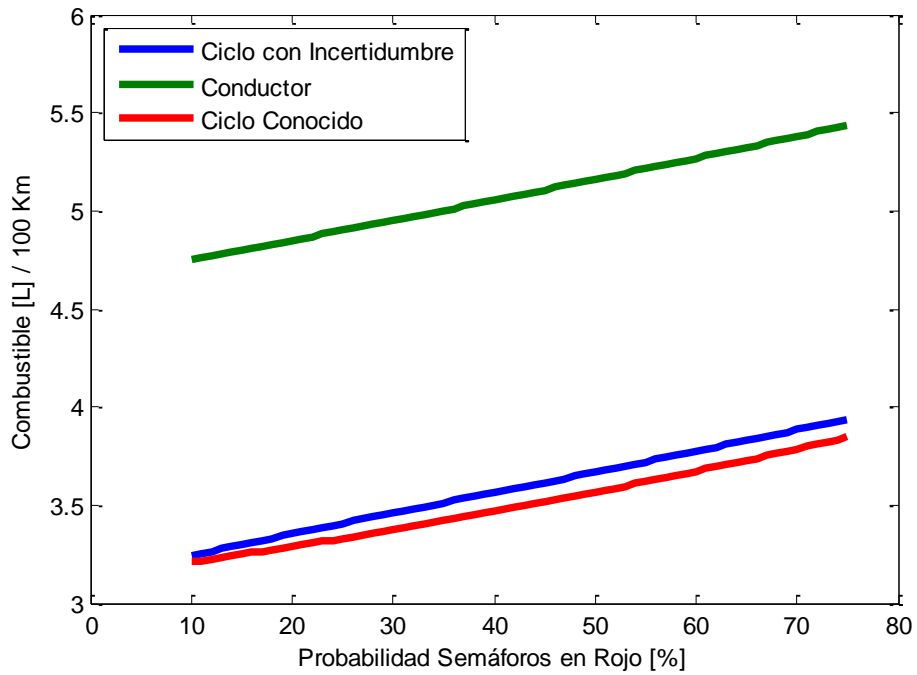


Figura 4.7: Consumo esperado cada 100 km según la probabilidad de encontrar en rojo los semáforos.

Esperanza Estadística de Consumo de Combustible

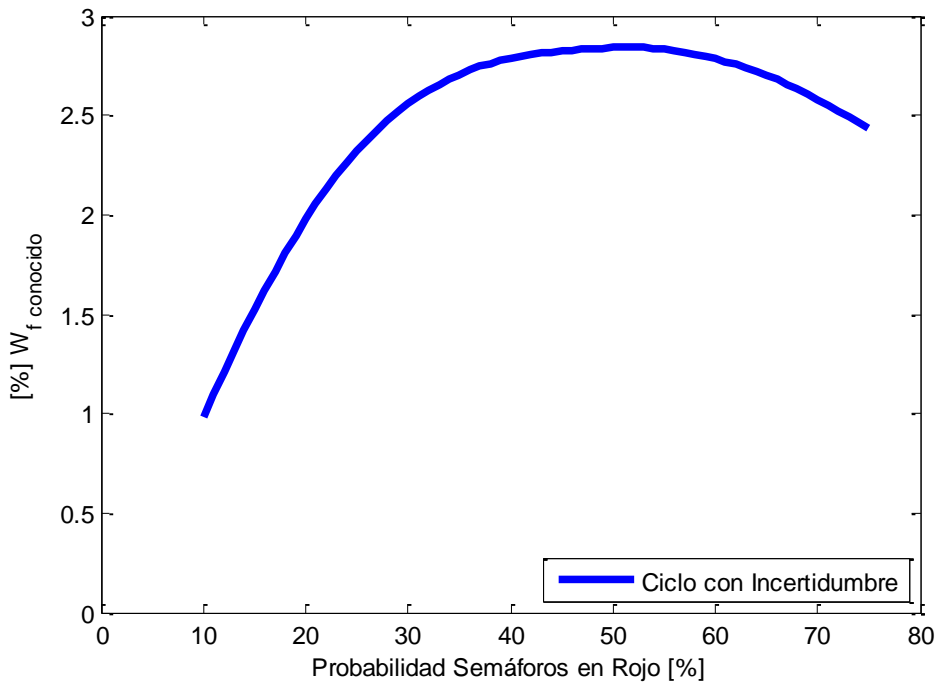


Figura 4.8: Diferencia del consumo de combustible entre las soluciones optimizadas en porcentaje respecto de la solución optimizada para problemas deterministas.

Efecto del tiempo de carrera.

En la figura 4.9 queda representado el diagrama de barras referido al combustible medio esperado para cada tiempo de carrera. El trayecto estudiado es el mismo que antes, y se han mantenido los tiempos en verde y rojo de los semáforos de primer ejemplo, pero ahora fijamos distintos tiempos para recorrerlo: 80, 84, 87, 90, 93, 99 y 120 segundos. Se puede ver, por la forma del gráfico, que existe un tiempo para recorrer el trayecto que minimiza el consumo de combustible esperado. Por lo que, si se pretende reducir lo máximo posible la esperanza estadística de consumo de combustible, sería buena idea realizar un estudio del tiempo de carrera para encontrar aquél que minimiza dicha esperanza estadística. Se observa que el consumo de combustible crece de forma precipitada cuando el vehículo circula rápido, lo cuál es lógico, pues pone a funcionar el motor a cargas muy elevadas. Pero también se ve que si el vehículo va demasiado lento, el consumo de combustible vuelve a aumentar, esto se debe a que el motor está funcionando durante mucho tiempo con cargas muy bajas (bajos rendimientos).

Esperanza Estadística de Consumo de Combustible

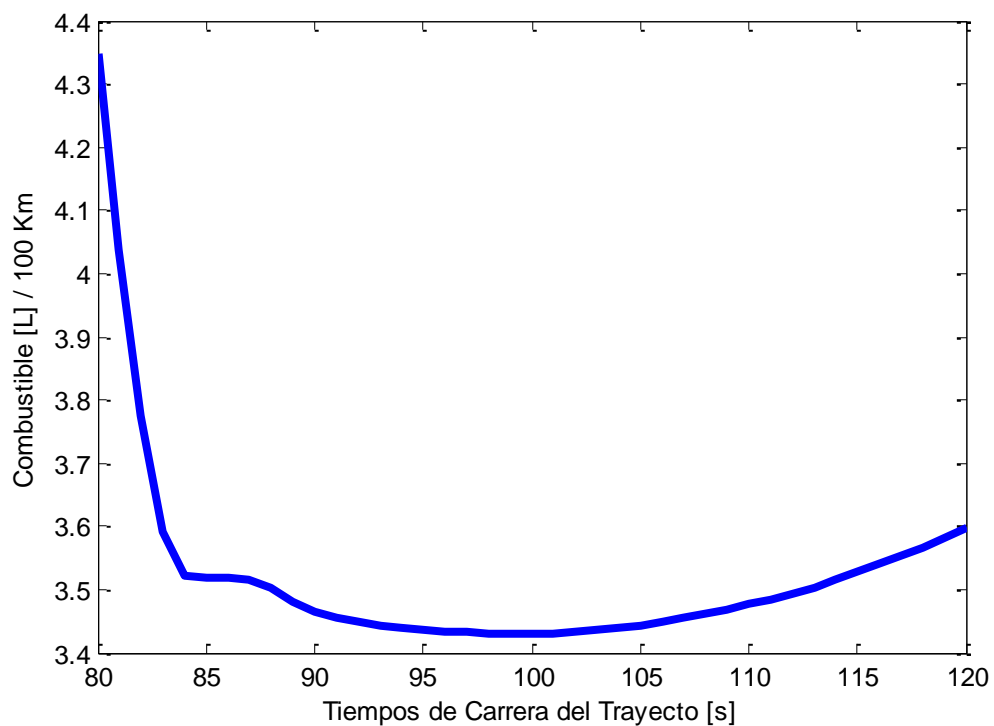


Figura 4.9

Apartado 5

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de resolución de problemas de optimización con incertidumbres, cuya solución plantea una estrategia de actuación a seguir según se vayan desarrollando los sucesos y obteniendo información del entorno. Para el planteamiento del sistema resolutivo, es necesario conocer en cierta medida el evento que puede tener lugar. Lo que se conoce de estos eventos son las distintas formas en las que pueden desarrollarse, y así plantear distintas estrategias para abordarlos. Este sistema resolutivo consiste en un método numérico que establece ciertas similitudes con métodos de optimización basados en técnicas de ‘programación dinámica’, por lo que necesita siempre conocer el problema completo antes de determinar las soluciones óptimas. Esto hace que sea un sistema robusto.

En particular, el método elaborado se ha aplicado para la elección de perfiles de conducción óptimos en circuito urbano con incertidumbres, con el fin de establecer una guía o modelo de conducción que minimice el gasto de combustible medio. Para un circuito urbano, estos eventos inciertos se traducen en elementos restrictivos de la velocidad, y siendo más concretos, para el problema planteado son semáforos. La forma en que se desarrollan es la evolución del estado de los mismos semáforos, es decir, si se encuentra en verde o en rojo; y si es rojo, el tiempo que debemos permanecer parados por el semáforo. La incertidumbre de este problema reside en que desconocemos el algoritmo por el que se rigen los semáforos, pues si lo conociéramos tendríamos totalmente definido el problema y sabríamos la manera en la que se desarrollarían los acontecimientos. Pero como desconocemos este algoritmo, consideramos los semáforos como independientes, por lo que la combinación de sus estados resulta totalmente aleatoria para nosotros. La solución que establece el sistema de optimización, aunque la combinación del estado los semáforos no sea la misma completamente, proporciona un mismo perfil de conducción mientras la secuencia del estado de los semáforos iniciales sea

la misma. La estrategia de conducción solo variará a partir del primer semáforo cuyo estado sea distinto al resto.

El método, cómo ya se ha dicho, siempre proporciona una solución, es robusto, pues tiene ciertas similitudes con métodos basados en ‘programación dinámica’: requiere conocer el problema al completo para dar con la solución óptima. Aunque de esta manera siempre hallará una solución, esta técnica para hallar la solución óptima puede no es la más eficiente: cuanto mayor sea el tamaño del problema (mayor distancia del trayecto, mayor número de semáforos), más tiempo y memoria se necesitará para resolver el problema planteado. De hecho, al aumentar el tamaño del problema, el tiempo y la memoria que quiere el sistema crecen de forma potencial.

Por ello, igual se podrían plantear diversas formas de ahorrar en tiempo y memoria. Una de estas formas sería realizar una discretización más pobre del estado de los semáforos y de los tiempos en los que recorrer cada sección entre semáforos. De esta forma se tendrían menos casos que evaluar, no obstante, esta propuesta haría disminuir también la calidad de la solución.

Otra propuesta podría consistir en afinar más el intervalo de discretización de los posibles tiempos en los que recorrer cada tramo interno del camino propuesto, es decir, reducir el intervalo de tiempos de carrera de cada tramo donde buscar el tiempo que minimiza el consumo en dicho tramo. De esta manera ahorraríamos en tiempo de ejecución del sistema y memoria que ocupar sin perder calidad en la solución óptima.

Por otro lado, ya que el sistema busca los perfiles de conducción óptimos para reducir el consumo de combustible medio, no estaría de más añadir un proceso iterativo que determinara también el tiempo óptimo de carrera en el cuál realizar el circuito urbano en lugar de que sea el usuario quién establezca el tiempo para recorrer dicho circuito. Pues como se ha visto en el apartado 4, análisis de los resultados, existe un tiempo que minimiza este consumo medio. Ahora bien, si ya de por sí el sistema requiere mucho tiempo y mucha memoria para resolver problemas, incluir esto sería seguir sumando tiempo y memoria requeridos para la ejecución del método.

Apartado 5. Conclusiones.

Otra manera de mejorar el sistema de resolución elaborado, sería incluir la posibilidad de que los elementos restrictivos de la velocidad no fuesen sólo semáforos, sino que también pudieran ser señales de tráfico como ceda el paso o stop, pues también es posible conocer su localización en el camino. Ambos son fáciles de implementar en el método. Los estados del ceda el paso son iguales que los de un semáforo, puede que no tengas que parar o sí: de no tener que parar sólo habría que reducir la velocidad en ese punto, para el caso contrario sólo habría que establecer un máximo para el tiempo de parada. En cuanto a un stop, el estado es único, pues siempre hay que pararse en su localización; y al igual que con el ceda el paso, sólo requiere establecer un tiempo máximo de espera, los cuales seguirían un criterio arbitrario.

Asimismo, se podrían considerar otros agentes reguladores o restrictivos de la velocidad del vehículo en el tramo, como el tráfico. Introducir un elemento restrictivo como éste tampoco supone un gran esfuerzo: podría implementarse como un factor que multiplicara a la velocidad máxima permitida según la densidad del tráfico, de forma que llevaría a que el vehículo realizara perfiles de conducción con una velocidad media más baja.

El método de optimización en sí no está limitado a un tamaño de problema, si se tiene tiempo y memoria suficiente, este método puede resolver problemas de tamaño cualesquiera que se le plantee. Quizá el tiempo sea el factor menos restrictivo a la hora de establecer los límites resolutivos del método elaborado, pues ya conocemos de otras investigaciones en las que tienen los ordenadores trabajando día y noche durante meses para resolver un problema de 'CFD', por ejemplo; sin embargo, la capacidad y la memoria está limitada, y habrá problemas que debido a su tamaño podrán llenar por completo la memoria del computador. Claro está, esto ya se trata de una limitación del aparato con el que estemos trabajando.

En cuanto a la capacidad de optimización del método para la elección de perfiles de conducción que minimicen la esperanza estadística de consumo de combustible, sabemos que es realmente buena. No proporciona la misma solución que obtendríamos en un problema determinista, pues el problema tratado en el proyecto tiene en cuenta la

incertidumbre, pero esta solución, por lo general, proporciona una estrategia de conducción cuya esperanza de consumo de combustible es muy parecida a la dictaminada en problemas deterministas. Como ya se ha visto en el apartado 4, resultados, tanto la solución determinista como la solución proporcionada teniendo en cuenta las incertidumbres, proporcionan niveles de ahorro de combustible muy similares respecto a un estilo de conducción estándar.

Teniendo todo esto presente, el método elaborado para la resolución de problemas de optimización con incertidumbre, y más concretamente, el método elaborado para la elección de perfiles de conducción óptimos en circuito urbano que minimicen el consumo de combustible puede resultar útil para ciertas aplicaciones.

Como ya fue expuesto en la introducción, a día de hoy, la población está mucho más concienciada sobre el estado medio ambiental del planeta, tanto por temas como el cambio climático, la capa de ozono o la contaminación en las ciudades. También es un tema de gran preocupación el vaciado de las reservas de recursos energéticos fósiles. Por ello creo que, para el ciudadano, resultaría interesante contar con una herramienta en su vehículo o en su móvil que le ayudara a reducir a ahorrar combustible y a aliviar en cierta medida su conciencia pensando que está reduciendo las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

De igual manera, se está apostando cada vez más por la automatización, y concretamente, en la industria del automóvil se están realizando serias investigaciones sobre la conducción autónoma del mismo vehículo; por lo que no es descabellado pensar que dentro de la conducción autónoma de los vehículos quede hueco para implementar sistemas de conducción encaminadas a minimizar el gasto de combustible.

Y más de lo mismo para empresas de transporte urbano. A cualquier empresario le brillan los ojos si descubre una nueva manera de reducir costes, por lo que es lógico pensar que puedan estar muy interesados en establecer cualquier sistema que les permita ahorrar combustible por poco que sea. Una flota de autobuses recorriendo las calles de una ciudad noche y día consumo cantidades inmensas de gasoil a diario, por lo que ahorrar cierta

Apartado 5. Conclusiones.

cantidad de combustible a diario, al cabo de un año puede suponer grandes diferencias en los costes de la empresa.

Por todo ello, y sabiendo las pequeñas limitaciones que supone, si se desarrolla y evoluciona este método de optimización de perfiles de conducción para minimizar el consumo medio de combustible, de forma que sea más eficiente y contemple más variedad de eventualidades restrictivas para los perfiles de velocidad; se considera que este método y su línea de evolución tienen un potencial de interés y aplicación muy grande para el sector del automóvil tanto a nivel de usuario como de empresario.

II Presupuesto

En este documento se va a realizar el estudio de los costes asociados a la realización del presente proyecto. En este documento se tienen en cuenta los costes materiales, de amortización de equipos y de recursos humanos necesarios para la evaluación de los costes parciales y totales del proyecto.

El presupuesto de este proyecto se estructura en una única fase informática: elaboración de un método numérico para la selección de perfiles de conducción óptimos que minimicen el consumo medio de combustible en circuito urbano con incertidumbre y análisis de los resultados obtenidos con dicho método. El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo durante tres meses.

Presupuesto de la elaboración del método numérico

Para la elaboración del sistema de resolución de problemas de optimización con incertidumbre ha intervenido como recurso humano un ingeniero aeroespacial encargado de elaborar el modelo físico del vehículo y adaptarlo a un programa de resolución de problemas de optimización para calcular los perfiles de conducción óptimos para una distancia dada, además de elaborar el método numérico para la selección de perfiles de conducción óptimos que minimice el consumo medio de combustible en circuito urbano con incertidumbres, así como una base de datos útil para el problema planteado, y de analizar los resultados proporcionados por el método elaborado para extraer conclusiones sobre su utilidad y proponer mejoras.

Así como se incluyen los costes de los recursos humanos, también se han de incluir los costes de amortización del equipo informático utilizado como herramienta de trabajo y el periodo de amortización del software usado para el modelado del vehículo y la implementación del sistema de resolución de problemas de optimización con incertidumbre.

Coste del modelado

El coste que ha supuesto la elaboración del modelado del vehículo y la estrategia planteada para la resolución del sistema que establece el modelo está recogido en la siguiente tabla:

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
Ingeniero aeroespacial	30 horas	60 €/h	1800,00 €
Total			1800,00 €

Tabla 1: Costes del modelado.

Coste de programación

Para la realización de este proyecto se ha requerido la implementación de numerosos “scripts” extensos en cuanto a líneas de código, tales como un software para adaptar el modelado del vehículo a un programa para la resolución de problemas de optimización sin incertidumbre o el software en el cuál se aplica el método elaborado para la resolución de problemas de optimización con incertidumbre para la selección de los perfiles óptimos que minimizan el consumo medio de combustible en circuito. El coste estimado para esta parte queda reflejado aquí debajo:

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
Ingeniero aeroespacial	120 horas	60 €/h	7200,00 €
Total			7200,00 €

Tabla 2: Costes de programación.

Coste de simulación y análisis de los resultados

En esta parte del proyecto ha sido realizada la validación del modelo elaborado y de la estrategia de resolución del sistema de ecuaciones planteado en el modelo, además de haberse generado la base de datos auxiliar para la resolución del problema planteado en

este proyecto o haber analizado los resultados proporcionado por el sistema de optimización de perfiles de conducción en circuito urbano con incertidumbres y así comprobar la validez del método y sugerir mejoras para él. El presupuesto para esta es:

Concepto	Unidades	Coste unitario	Importe
Ingeniero aeroespacial	150 horas	60 €/h	9000,00 €
Total			9000,00 €

Tabla 3: Costes de simulación y análisis de resultados.

Amortización del equipo informático

Este apartado debe incluirse por dos motivos: el coste de los potentes equipos informáticos utilizados durante el proyecto y la obsolescencia de los mismos, pues con el tiempo pierden prestaciones y cada vez encontramos en el mercado equipos con mayores prestaciones.

Para la elaboración del modelo y del programa para aplicar el sistema de selección de perfiles de conducción óptimos en circuito urbano con incertidumbre se ha trabajado con un equipo Asus, modelo G53S, versión G53SX, de sistema operativo Windows® 7, capaz de manejar enormes cantidades de datos dinámicamente. Posee un procesador de cuádruple Intel Core i7-2670QM a 2,2 GHz 8 GB de memoria RAM DDR3 1333 MHz y 1 TB de disco duro. También debemos incluir la amortización del software utilizado para todos los cálculos matemáticos y de simulación: MathWorks® MATLAB, con la versión 2012a.

Aunque casi la totalidad del proyecto ha sido realizado en instalaciones y despachos diseñados para trabajos de investigación pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia, las cuales son cedidas de forma gratuita para este tipo de trabajos, se ha de tener en cuenta como coste de amortización el coste que supone el uso de las mismas.

Por tanto, el coste de amortización del equipo informático es el siguiente:

Concepto	Coste total	Periodo de amortización	Periodo amortizado	Coste de amortización
Ordenador ASUS	1299 €	4 años	3 meses	81,19 €
Software MATLAB	12000 €	12 años	3 meses	250,00 €
Instalaciones	60000 €	20 años	3 meses	750,00 €
Total				1081,19 €

Tabla 4: Costes de amortización del equipo informático.

Presupuesto total del proyecto

La siguiente tabla recoge los distintas partes del presupuesto total del proyecto.

Presupuesto Total del Proyecto	
Concepto	Importe
Costes del modelado	1800,00 €
Costes de programación	7200,00 €
Costes de simulación y análisis de resultados	9000,00 €
Costes de amortización del equipo informático	1081,19 €
Subtotal	19081,19 €
Costes Indirectos (5% del subtotal)	954,06 €
Beneficio Empresarial (6% del subtotal y costes indirectos)	1202,12 €
IVA 21% (salvo amortización eq. info. y costes indirectos)	3780,00 €
Total	25017,37 €

Tabla 5: Presupuesto total del proyecto.

Por consiguiente, el coste global del proyecto suma #VEINTICINCO MIL DIECISIETE EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS DE EURO#.