

Sistema de aviso en tiempo real de la velocidad óptima para minimizar consumo respetando la duración máxima del viaje

Felipe Jiménez Alonso

Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil INSIA-UPM, España

Wilmar Cabrera Montiel

Investigador, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil INSIA-UPM, España

Santiago Tapia Fernández

Profesor colaborador, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales-UPM, España

Francisco Aparicio Izquierdo

Director, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil INSIA-UPM, España

RESUMEN

El estilo de conducción influye significativamente en el consumo de combustible de un vehículo. En este trabajo se presenta un algoritmo que permite calcular en tiempo real el perfil de velocidades necesario para cubrir un recorrido en un tiempo determinado a la vez que optimiza el consumo de combustible. El algoritmo se basa en la Programación Dinámica y tiene en cuenta la orografía del terreno, las características del sistema propulsor del vehículo y las retenciones de tráfico para informar al conductor el perfil de velocidad que debe mantener para reducir el consumo de combustible y cumplir con el objetivo de tiempo de viaje. El algoritmo evalúa periódicamente si el conductor ha seguido las indicaciones del sistema y analiza los posibles adelantos y retrasos ocurridos durante el viaje para adaptar las recomendaciones de velocidad de los tramos siguientes de recorrido. Esta supervisión continua resulta especialmente útil en caso de encontrarse el vehículo con retenciones que le obliguen a reducir la velocidad por debajo de la recomendada, de forma que el algoritmo recalcula un nuevo perfil de velocidades en cuanto desaparezca la retención manteniendo el criterio de optimizar consumo y respetando el tiempo de llegada al destino. El algoritmo se ha probado en recorridos reales logrando ahorros de combustible significativos. También garantiza el llegar a destino según el horario marcado siempre que sea posible, respetando los límites de velocidad de la carretera.

1. INTRODUCCIÓN

La optimización del consumo de combustible en automóviles puede ser abordada desde diferentes puntos de vista. Un enfoque puede ser aquel que provee información a los conductores acerca de las buenas prácticas de conducción para lograr una conducción eficiente o eco-driving. Esta perspectiva es la realizada mediante campañas educativas por parte de gobiernos y fabricantes de coches donde se crean manuales (Ford-Werke, 2014; DGT, 2014; IDAE, 2007) para difundir dicha información a los conductores. Existen numerosas referencias sobre consejos para conducir de forma eficiente (Truong, 2008).

Además de estos manuales, los fabricantes de coches pueden incluir herramientas que indican la eficiencia del estilo de conducción del propietario del vehículo. Un ejemplo de este tipo de sistemas es ECODRIVE® de la compañía Fiat que permite al usuario descargar en un pendrive información de los recorridos realizados por el vehículo y mediante una aplicación de ordenador presentar estadísticas sobre el ahorro de combustible obtenido. Los fabricantes de coches han incorporado de serie sistemas como la indicación de la marcha adecuada o un control para activar el modo económico del coche tal como lo hizo BMW con su concepto EfficientDynamics®. Además, los fabricantes constantemente están realizando mejoras a nivel de manufactura, optimizando los sistemas de tracción, la aerodinámica de los vehículos, etcétera; con el objetivo de reducir el consumo de combustible. Desde un enfoque académico se puede investigar la optimización de combustible mediante la influencia del estilo de conducción, la topología de los sistemas de propulsión y los sistemas de control diseñados para lograr una conducción que permita lograr algún ahorro de combustible. En Rhys-Tyler y Bell (2009) se estudió el estilo de conducción de 40 personas y su influencia sobre el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Los 40 participantes del estudio condujeron un mismo vehículo sobre un recorrido de prueba que era igual para todos. El estudio arrojó que el conjunto de conductores podían ser clasificados en varios clústeres en función de su estilo de conducción. Los conductores que utilizaron grandes aceleraciones también tendían a frenar más fuerte y en el final del recorrido se notaba que el consumo de combustible obtenido era considerable. Esto podría indicar una relación directa entre conducción brusca y un gasto alto de combustible pero el estudio también indica que una conducción demasiado cautelosa también producía una cantidad de emisiones contaminantes elevada en el caso de una velocidad promedio baja. Los resultados de este estudio indican que el comportamiento del conductor influye de manera significativa en el consumo de combustible de un vehículo. Utilizando un simulador, 12 conductores, un display de consumo instantáneo, un estilo de eco-driving promovido en Japón (Jama, 2008) y un estilo alemán de eco-driving descrito por Ford en Ford-Werke, (2014); Hiraoka et al (2009) hallaron que mostrar el valor de consumo instantáneo al conductor produce un ahorro de combustible de 9.9%. Este estudio también indica que el valor de ahorro de combustible es de 15.4% si se utiliza el estilo de eco-driving japonés y 14.5% si se emplea el estilo alemán. Otros autores hablan que al utilizar eco-driving los resultados de ahorro de combustible pueden incluso llegar hasta el 25% (Taniguchi, 2008).

El entrenamiento de los conductores en el uso correcto de las técnicas de eco-driving ha sido el objetivo del sistema presentado por Andersson y Bredberg (2009). Este sistema evalúa las acciones de un conjunto de conductores de camiones en Suecia y obtiene una calificación porcentual que indica la semejanza de cada acción de conducción respecto a la indicada por las estrategias de eco-driving. El estudio de dichos datos resultó en una semejanza promedio de 70.8% y una disminución de 13% en el consumo de combustible después de la implantación de dicho sistema en los camiones.

En los estudios sobre eco-driving por lo general no se menciona la relación que tiene el porcentaje de ahorro de combustible con el tiempo de recorrido. La investigación realizada por Cerbe et al (2009) indica que la elección de ruta, el estilo de conducción y la velocidad máxima son de gran influencia en el consumo de combustible. En este estudio comprobaron que utilizando dos rutas diferentes para llegar a un mismo destino, empleando eco-driving en la ruta más corta y conduciendo de forma típica en la otra ruta que era más larga y rápida, se obtuvo un ahorro de combustible de 43% y un tiempo de recorrido incrementado en un 15%. Otros experimentos realizados en este estudio mostraron reducciones de combustible de 27.6%, 10.8% y 10.9% cuando el tiempo de recorrido se incrementaba en 7.8%, 6.25% y 7.5% respectivamente.

Hellström (2010) presenta un sistema de optimización de combustible para camiones que utiliza la información de pendientes del tramo de 1500 metros de carretera que se encuentra justo delante del vehículo y calcula, mediante Programación Dinámica (Bertsekas, 2005; Larson y Casti, 1978), la referencia de velocidad que el control de crucero debe cumplir para recorrer dicho tramo. Los valores de ahorro de combustible obtenidos no presentan gran variación del tiempo de recorrido pues reducciones de 4.89% y 6.20% en el gasto de combustible ocasionaron aumentos en el tiempo de recorrido de 0.27% y 1.62% respectivamente (Hellström et al, 2009).

2. METODOLOGÍA

Cabrera-Montiel et al (2012) presentan la funcionalidad de un algoritmo que minimiza el consumo de combustible de un vehículo utilizando la Programación Dinámica y el perfil de pendientes de la carretera. En este algoritmo se definen unos parámetros de ponderación para el tiempo de viaje y para el consumo de combustible que directamente establecían la velocidad promedio en torno a la cual el vehículo debería circular por el tramo de carretera sobre el cual se realizaba la optimización. Esta velocidad óptima solamente es constante para el caso especial donde el perfil de pendientes es completamente llano. Cuando en la simulación se utilizaban perfiles de carretera reales, la velocidad variaba a causa de las pendientes, lo cual no garantizaba llegar al destino en el tiempo de recorrido previamente establecido. En un entorno real, los atascos asociados a las horas punta y otros imprevistos también pueden ocasionar que el tiempo de recorrido deseado inicialmente no se cumpla, por lo tanto, en este artículo se presentan estrategias para que el algoritmo de optimización tenga en cuenta los factores que puedan modificar el tiempo de recorrido y logre ajustar el perfil de velocidad óptima con el fin de llegar al destino en el tiempo deseado inicialmente. Estas estrategias deben tener en cuenta el tiempo de ejecución del algoritmo y proveer la capacidad de presentar la información al conductor en tiempo real.

2.1 Descripción del algoritmo de optimización básico

El algoritmo definido por Cabrera-Montiel et al (2012) discretiza la velocidad del vehículo para utilizar una escala de valores que varían desde V_{min} hasta 120 km/h con pasos de 4

km/h. El perfil de pendientes de la carretera se crea utilizando una escala de valores desde -10% hasta +10% separados en pasos de 1% para poder definir cada tramo de 20 metros de carretera. El objetivo del algoritmo es crear el perfil de velocidad óptima utilizando una concatenación de transiciones de velocidad que sean unidas de acuerdo a los criterios de optimización dados por la Programación Dinámica. De acuerdo a la discretización de la velocidad y del perfil de pendientes de la carretera, una transición de velocidad podría tener la forma mostrada en la figura 1. Las constantes N y D son valores enteros mayores que cero.

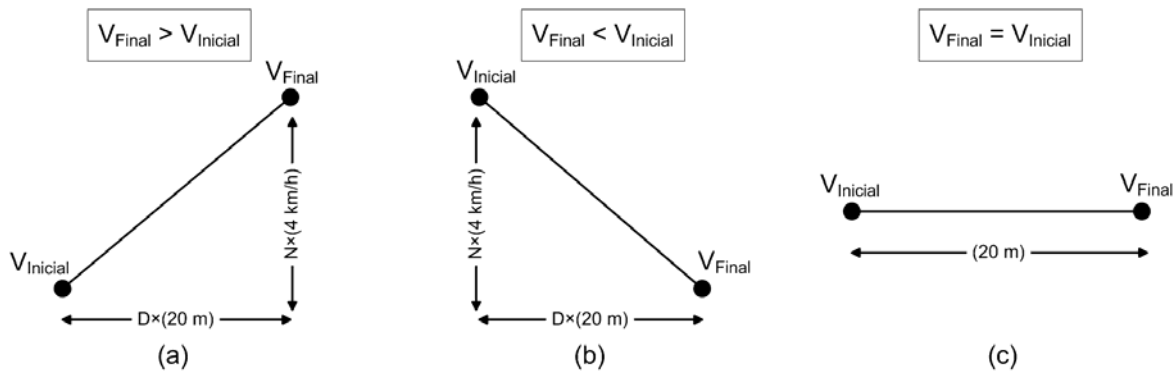


Fig. 1 – Transiciones de velocidad en casos de aceleración (a), deceleración (b) y velocidad constante (c)

Es de notar que el ancho de cada transición de velocidad está definido como un múltiplo del paso de discretización del perfil de pendientes. Esta consideración se debe a que el rango de aceleración de cada marcha del coche es diferente y una transición de velocidad puede requerir varios pasos de discretización de distancia para llevarse a cabo.

Previamente a la aplicación de la Programación Dinámica, se debe establecer el conjunto de transiciones de velocidad posibles para el vehículo en estudio. Para ello, se combinan todos los posibles valores de velocidad inicial, velocidad final, marcha engranada y grado de pendiente de carretera. Todas las posibles combinaciones resultantes se simulan en alguna herramienta que provea la viabilidad de la transición de velocidad, el consumo de combustible y el tiempo transcurrido. En este estudio se ha tomado como base el concepto de simulación definido en ETH (2005) para hallar el consumo de combustible de cada transición de velocidad viable. ETH (2005) también ha sido utilizado por Hounsham (2008) para la obtención de datos de consumo de combustible cuando la variable de entrada a la herramienta de simulación es un perfil de velocidades.

Teniendo ya el conjunto de transiciones de velocidad posibles y el rango de pendientes donde pueden ejecutarse, la Programación Dinámica se encarga de crear el perfil de velocidad óptima. La velocidad y marcha engranada inicial que el vehículo tiene en el punto de distancia inicial del recorrido es tomado como origen de todos los posibles perfiles de velocidad para la optimización. La técnica de la Programación Dinámica va

uniendo transiciones de velocidad desde el inicio del recorrido y continúa avanzando en pasos de 20 metros hasta el final del recorrido. En cada punto de distancia que avanza, crea nuevas trayectorias de velocidad y de marcha engranada. Estas trayectorias se acumulan y generan de nuevo más trayectorias. Esto provoca una generación exponencial de posibles perfiles de velocidad que aumenta en cada paso de 20 metros de distancia. Para contrarrestar esto, la Programación Dinámica evalúa en cada punto de distancia del recorrido la existencia de perfiles de velocidad que puedan conectar el punto inicial del recorrido con el punto de distancia actual. Estos perfiles tendrán en común los valores de velocidad y marcha engranada del punto de distancia actual pero no describirán la misma trayectoria en los puntos de distancia intermedios. Bajo estas condiciones se pueden comparar estos perfiles de velocidad y elegir el mejor de ellos con intención de reducir el número de perfiles a tratar y la generación de nuevos perfiles a partir de ellos. La forma que tiene la Programación Dinámica para comparar los perfiles que llegan al mismo punto de distancia con iguales valores de velocidad y marcha engranada es mediante el uso de una función objetivo o función de coste J . Esta función evalúa cada uno de estos perfiles coincidentes y elige de todos ellos uno sólo, el cual se encargará de unir el punto inicial del recorrido con el punto de distancia actual para los valores de velocidad y marcha engranada definidos en el punto de distancia actual.

La función objetivo utilizada en este algoritmo es similar a la utilizada en Hellström (2010) y se define mediante la Ecuación (1).

$$J = \alpha \cdot F + \beta \cdot T \quad (1)$$

En esta ecuación, F representa la cantidad de combustible y T el tiempo actual de recorrido. Los coeficientes α y β son valores enteros que ponderan el consumo de combustible y el tiempo de recorrido. Al incrementar el valor de β , se incrementa el valor promedio de velocidad del perfil óptimo calculado por la Programación Dinámica. En simulaciones realizadas con un vehículo tipo turismo, se alcanzaron ahorros de combustible de hasta 5.2% cuando el perfil de velocidad óptimo se comparaba con un perfil de velocidad constante que tuviera el mismo tiempo de recorrido total.

2.2 Disminución del tiempo de ejecución para el cálculo del perfil de velocidades de un recorrido extenso

Dependiendo de las variables consideradas en la Programación Dinámica y de su discretización, el tiempo de ejecución de los algoritmos que la utilizan puede llegar a ser muy largo. Esto se debe al incremento exponencial del número de posibles soluciones creadas en cada iteración. El algoritmo de optimización básico presentado en Cabrera-Montiel et al (2012) tarda 49 segundos para encontrar el perfil de velocidad óptimo de un recorrido de 20 km, pero este tiempo de ejecución se incrementa de forma exponencial cuanto más largo es el tramo de recorrido considerado para la optimización de consumo de combustible.

Debido a que el conductor de forma voluntariamente puede dejar de seguir un perfil de velocidad óptimo o una retención de tráfico lo obligue a hacerlo, se debe calcular un nuevo perfil de velocidad para cumplir con el tiempo de recorrido deseado. El tiempo de cálculo del nuevo perfil debería ser lo suficientemente corto para que el usuario del sistema no perciba una interrupción prolongada de información sobre la velocidad adecuada.

Hellström (2006) realiza simulaciones sobre el largo del tramo futuro de carretera que debe tenerse en cuenta para obtener ahorros de combustible utilizando la estrategia de Programación Dinámica. Los autores indican que el ahorro de combustible tiende a ser constante a partir de un horizonte de 2000 metros y determinan el punto de velocidad final de horizonte de carretera mediante una función que relaciona la variación de energía cinética del coche y el consumo de combustible que la produce.

En nuestro estudio, el hallazgo del punto de velocidad final de un horizonte de carretera sometido a Programación Dinámica se produce mediante la superposición de dos perfiles de velocidad parciales. Debido a que el cálculo del perfil de velocidad óptimo de un recorrido largo puede llegar a ser inviable para aplicaciones de tiempo real, se crea una aproximación de este perfil uniendo trozos de perfiles de velocidad más cortos. El perfil de velocidad creado mediante el solapamiento de los perfiles parciales se asemeja mucho al perfil óptimo del recorrido completo. En la Figura 2 se explica este método.

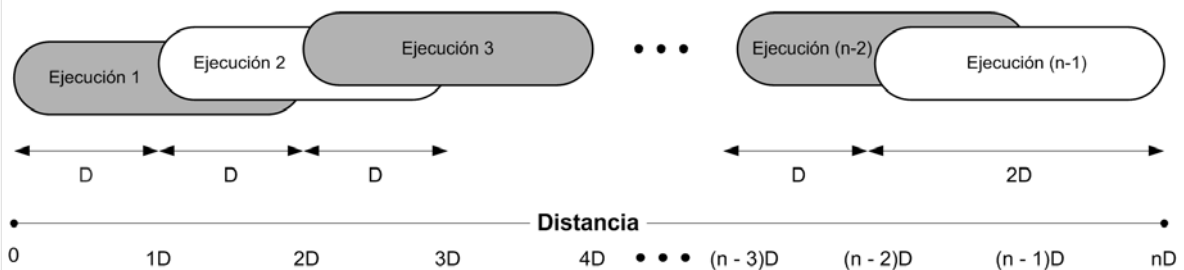


Fig. 2 – Solapamiento de perfiles de velocidad parciales

Siendo D la longitud de los perfiles de velocidad parciales y nD la longitud final del recorrido a optimizar, se halla el perfil de velocidad óptima del tramo comprendido entre 0 y $2D$ empezando con la velocidad del vehículo en el punto de distancia 0 y finalizando con una velocidad nula en el punto de distancia $2D$. Este primer perfil parcial contendrá una fase de deceleración que finaliza en el punto de distancia $2D$ que no formaría parte del perfil aproximado pero es utilizado para finalizar los perfiles parciales. Se escoge un punto de velocidad del perfil parcial resultante como valor inicial del siguiente perfil de velocidad parcial. Este punto no debe pertenecer a la fase de deceleración de la parte final del perfil parcial. En la Figura 2 se toma el punto de velocidad ubicado en la mitad del primer perfil parcial pero puede ser cualquiera que no esté influenciado por la deceleración de la parte final del perfil parcial. El resultado de esta primera ejecución de la Programación Dinámica es el hallazgo de la primera parte del perfil aproximado, la

porción de velocidad comprendida entre las distancias 0 y 1D.

Desde el punto de velocidad escogido como inicio del segundo perfil parcial se ejecuta nuevamente la Programación Dinámica y se finaliza este nuevo perfil parcial en el punto 3D finalizando en una fase de deceleración hacia velocidad nula. Este proceso halla otro trozo del perfil aproximado pero esta vez comprendido desde el punto de distancia 1D hasta el punto 2D si el punto de velocidad escogido como inicio del siguiente perfil parcial es el ubicado en la distancia 2D. Realizando este mismo procedimiento a lo largo de todo el recorrido para calcular por trozos el perfil aproximado de velocidad óptima, se llega al último tramo de 2D del recorrido. En este último tramo, una única ejecución de la Programación Dinámica sobre una distancia 2D permite hallar el trozo final del perfil aproximado de velocidad óptima. La unión de todos los perfiles parciales calculados obtiene el perfil aproximado de velocidad óptima.

2.3 Influencia del tráfico sobre el perfil de velocidad óptimo

Existen sistemas como el descrito en Giszczak (2006) que tienen en cuenta los límites de velocidad máxima de la carretera para sugerirle al conductor un valor de velocidad que le permita llegar a tiempo a su destino.

El algoritmo de optimización de consumo de combustible implementado tiene en cuenta las restricciones de velocidad de la carretera ya que, adicionalmente al perfil de pendientes, los límites máximos de velocidad son utilizados por la Programación Dinámica en cada sección del recorrido. Otra característica que se introduce al algoritmo es la capacidad de recalcular el perfil de velocidad óptima en función de las posibles retenciones de tráfico horario de la carretera o en el caso que un vehículo lento se incorpore delante del vehículo siendo optimizado impidiéndole seguir la velocidad establecida. La idea es dotar al algoritmo de las herramientas necesarias para que se cumpla el tiempo máximo de viaje establecido después de sufrir la pérdida de tiempo ocasionada por un vehículo lento u otro tipo de retención. Para llevar esto a cabo, la estrategia que utiliza el algoritmo de optimización está basada en la introducción de datos de velocidad promedio de todas las secciones del recorrido en función de la hora del día. Esta información se provee mediante una matriz que indica la velocidad promedio de secciones de 250 metros de la carretera en intervalos de tiempo de 6 minutos. De esta manera, el conductor establece la hora deseada de llegada al destino y el algoritmo se encarga de indicarle el perfil de velocidades que debe seguir para llegar al destino a tiempo mientras consume el mínimo combustible posible. La estrategia para que el conductor recupere el tiempo perdido debido a retenciones durante el recorrido es modular la velocidad del vehículo en función del tiempo de viaje restante. Dicha modulación de velocidad se logra a través del ajuste del factor β de la función objetivo de la Ecuación (1) durante el procedimiento explicado en la sección 2.2 que calcula cada perfil de velocidad parcial que forma parte del perfil aproximado de velocidad óptima.

Antes de que un perfil parcial de velocidad sea calculado, se utiliza la información de la matriz que contiene la velocidad promedio horaria de todas las secciones de la carretera para estimar la posible hora de llegada al destino. Para realizar dicho cálculo se considera que el vehículo se desplaza utilizando un perfil de velocidad constante sobre las secciones de carretera que faltan para llegar al destino. En caso de que existan restricciones debido a límites máximos de velocidad o velocidades promedio menores que la establecida en este perfil constante, el vehículo bajaría su velocidad usando una deceleración constante para adaptarse al valor requerido por estas secciones de carretera y franja horaria. Cuando la restricción de velocidad finalice, el vehículo aceleraría de nuevo para volver al nivel de velocidad constante que tenía antes de la retención. Esto se continúa realizando hasta finalizar la última sección de 250 metros de recorrido obteniéndose el tiempo estimado de viaje. Este mismo procedimiento se realiza para cada uno de los valores de velocidad que el vehículo tiene discretizados para la Programación Dinámica y se escoge el menor valor de velocidad constante que cumpla el criterio horario establecido por el conductor. Debido a que este valor de velocidad equivale a un único valor del factor β de la función objetivo, se utiliza dicho valor de β en la ejecución de la Programación Dinámica del siguiente perfil parcial de velocidad. Utilizando esta estrategia se crean los perfiles de velocidad que minimizan el consumo de combustible del vehículo cumpliendo con la hora de llegada al destino aunque hayan existido atascos durante el recorrido.

3. EXPERIMENTOS

3.1 Comparación entre el perfil óptimo de velocidad y su aproximación

Un experimento llevado a cabo para establecer las diferencias entre un perfil de velocidad óptima y su correspondiente aproximación se muestra a continuación. Se plantea hallar el perfil óptimo de velocidad para un recorrido de 18 km comprendido entre los kilómetros 120 y 138 de la carretera Madrid-Barcelona. La Figura 3 indica el perfil de pendientes de dicho tramo de carretera.

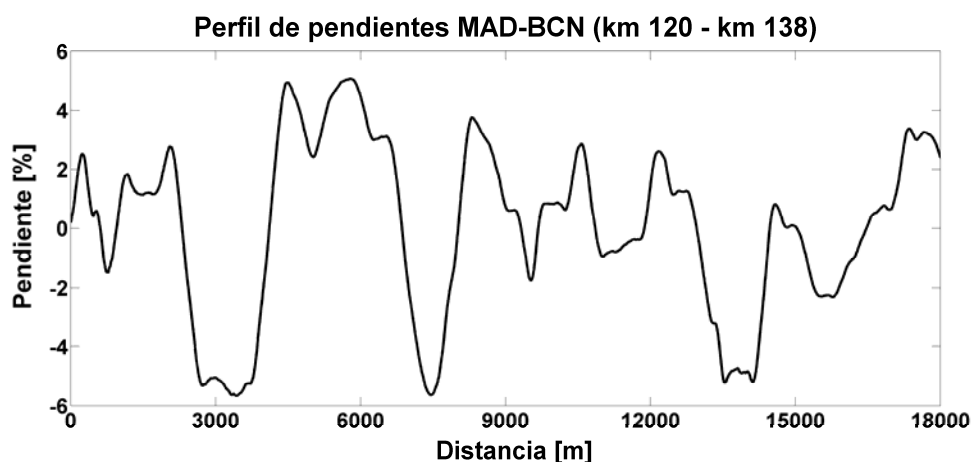


Fig. 3 – Perfil de pendientes del recorrido

Para el experimento, se define un valor del factor β fijo para todo el recorrido que establezca un perfil de velocidad cercano a 84 km/h. El largo de cada perfil parcial de velocidad es de 6000 metros de los cuales los 3000 primeros metros de cada perfil parcial de velocidad son extraídos para la creación del perfil óptimo aproximado. El vehículo utilizado en las simulaciones es un Ford Focus con motor ZETEC 2.0L de gasolina. Los perfiles de velocidad resultantes se muestran en la Figura 4.

Se puede apreciar que los perfiles de velocidad son parecidos y sólo tienen diferencias alrededor de los puntos de distancia correspondientes a los kilómetros 6 y 12 del recorrido.

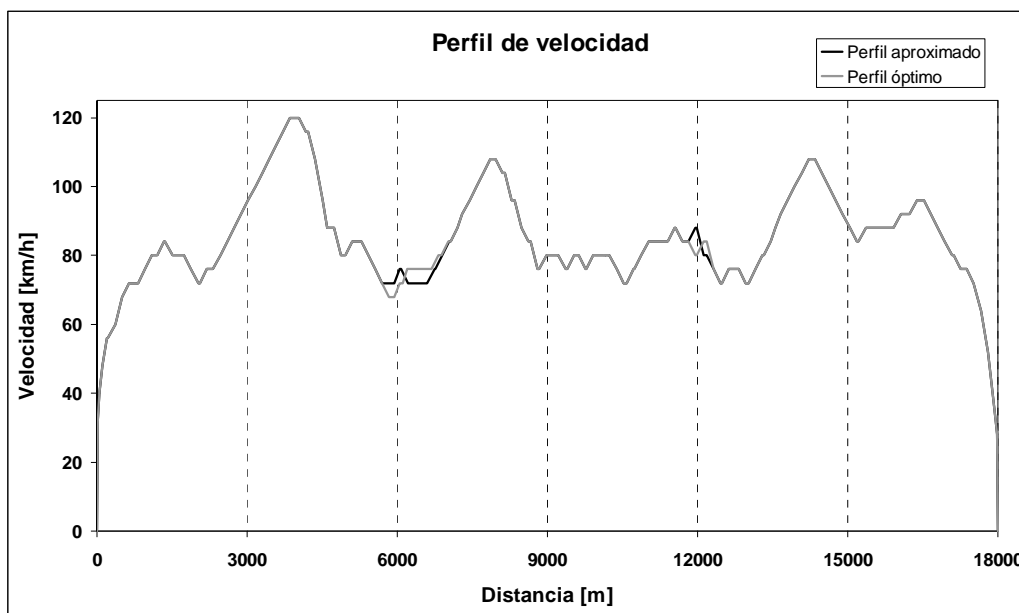


Fig. 4 – Comparación entre el perfil óptimo y su aproximación

En las simulaciones realizadas con el modelo de consumo presentado en ETH (2005), el perfil de velocidad óptimo obtuvo un consumo de combustible de 665.75 gramos y un tiempo de recorrido de 795.45 segundos. Los datos para el consumo de combustible y tiempo de recorrido del perfil aproximado de velocidad fueron de 665.18 gramos y 795.76 segundos. Las diferencias entre el perfil óptimo y el aproximado son de 0.09% en el consumo de combustible y de 0.04% en el tiempo de recorrido.

3.2 Reacción del algoritmo de optimización ante retenciones de tráfico

Una característica del algoritmo de optimización de consumo de combustible implementado es la modificación del perfil de velocidad para lograr cumplir con el tiempo de viaje máximo establecido en caso de presentarse retenciones de tráfico durante el recorrido. Para esto se ha considerado una retención de tráfico simulando un vehículo lento que ingresa a la carretera en el kilómetro 17.75 y recorre 1500 metros a 16 km/h antes de abandonarla. Las discretizaciones utilizadas para describir la longitud y la duración del atasco son 250 metros y 6 minutos respectivamente.

3.2.1 Comparación de perfiles de velocidad resultantes ante una retención de tráfico cuando el perfil de pendientes de la carretera es llano

El perfil óptimo de velocidad en una carretera ideal de pendientes nulas es un perfil de velocidad constante. Esta condición permite que se muestren claramente las modificaciones del perfil de velocidad óptima a causa del atasco.

Suponiendo que se desean recorrer 50 km llanos en 45 minutos, se realiza una comparación entre las 3 situaciones descritas a continuación:

- Situación 1: Recorrido sin atasco.
- Situación 2: Recorrido con atasco no programado.
- Situación 3: Recorrido con atasco programado (la aparición del atasco es conocida desde el inicio del recorrido por producirse de forma periódica).

La situación 1 representa la condición ideal donde el vehículo recorre la carretera en ausencia de atascos. La situación 2 es la ocasionada por un vehículo lento que se incorpora a la carretera de manera inesperada ocasionando el atasco. En esta situación, la velocidad de los tramos previos al atasco debe ser igual al de la situación que no contiene atasco, ya que se supone que el algoritmo no prevé la aparición del vehículo lento. En la situación 3 se va a considerar que el atasco se produce de forma cotidiana y que el algoritmo tiene conocimiento de ello desde el inicio del recorrido.

Para la comparación de las situaciones descritas, se considera una discretización de la velocidad del vehículo en pasos de 4 km/h y una configuración del algoritmo de optimización de forma que se calculen tramos de 5000 metros del perfil aproximado de velocidad en cada ejecución de Programación Dinámica. Los perfiles de velocidad óptima obtenidos para las 3 situaciones se presentan en la Figura 5.

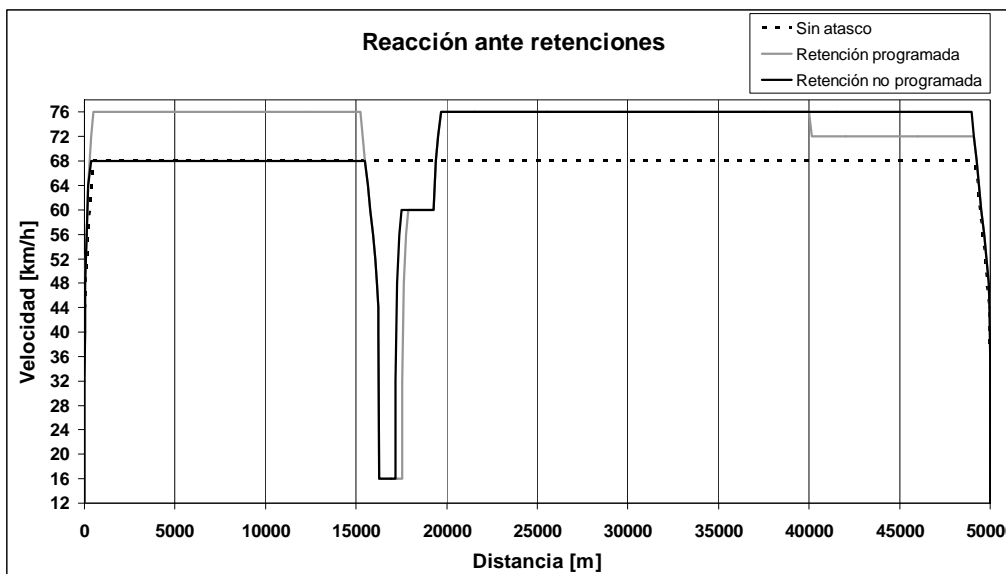


Fig. 5 – Reacción del algoritmo de optimización en presencia de retenciones de tráfico durante un recorrido llano

Si los 50 km del recorrido se realizaran en 45 minutos exactamente, considerando movimiento uniforme, ausencia de atascos y excluyendo el tiempo invertido en la aceleración inicial y en deceleración final, se obtendría una velocidad constante de 66.6 km/h. Debido a que la discretización de la velocidad del vehículo es de 4 km/h, el perfil resultante de la situación 1 establece 68 km/h como la velocidad óptima lo que produce un tiempo de recorrido total de 44.52 minutos.

En la situación 2, la velocidad del vehículo antes del atasco es igual que la velocidad óptima de la situación 1 (68 km/h) puesto que el atasco es un evento inesperado. Justo después del atasco, el algoritmo de optimización debe calcular los valores de velocidad siguientes para que no se modifique el tiempo de llegada al destino. Dichos valores deben estar acordes con la discretización de velocidad del vehículo. Por esta razón, el algoritmo calcula una velocidad de 76 km/h que se mantiene hasta la parte final del recorrido. El tiempo de viaje obtenido en este caso es de 44.75 minutos.

En la situación 3, el algoritmo tiene información previa sobre el atasco que se va a producir durante el recorrido. Por este motivo, la velocidad de la primera parte del recorrido es mayor que la presentada durante la situación 2. Entre el km 20 y el km 40 las velocidades presentadas por la situación 2 y 3 son iguales pero después del km 40 la velocidad del perfil de la situación 3 disminuye a 72 km/h. Esto permite que el tiempo que gana la situación 3 al ir con mayor velocidad durante el inicio del recorrido produzca una velocidad menor en la parte final del recorrido. La última ejecución de la Programación Dinámica calcula que, escogiendo dentro del conjunto discreto de velocidades del vehículo, un valor de 72 km/h le permite cumplir con los requerimientos de tiempo del recorrido. La duración del viaje en esta situación es de 44.79 minutos. Una diferencia importante entre los perfiles de las situaciones 2 y 3 es que el perfil de la situación 2 sale antes del atasco. Esto es debido a que el vehículo se encuentra antes el atasco en la situación 3. Otro factor a considerar es que el circular a una velocidad mayor al principio del recorrido puede ayudar a tener un margen de tiempo de recorrido más grande. Esto es beneficioso cuando se presenta una retención no programada en los últimos kilómetros del recorrido que represente un riesgo para el cumplimiento del tiempo máximo de llegada al destino.

3.2.2 Comparación de perfiles de velocidad resultantes ante una retención de tráfico cuando el perfil de la carretera no es llano

En la sección anterior se expone el método que utiliza la Programación Dinámica para modular la velocidad promedio de los perfiles parciales que crean el perfil aproximado de velocidad óptima. En una carretera con pendientes, la optimización de consumo produce cambios en la velocidad del vehículo, por tanto, se plantea el mismo estudio de las situaciones 1, 2 y 3 de la sección 3.2.1 para analizar la influencia de las pendientes sobre la creación de los perfiles de velocidad parciales pero utilizando un perfil de pendientes de carretera real. Se escoge el tramo comprendido entre los kilómetros 120 y 170 de la

carretera Madrid-Barcelona para dicho estudio. El perfil de pendientes de estos 50 km de carretera se muestra en la Figura 6 y el tiempo máximo de recorrido deseado es nuevamente 45 minutos.

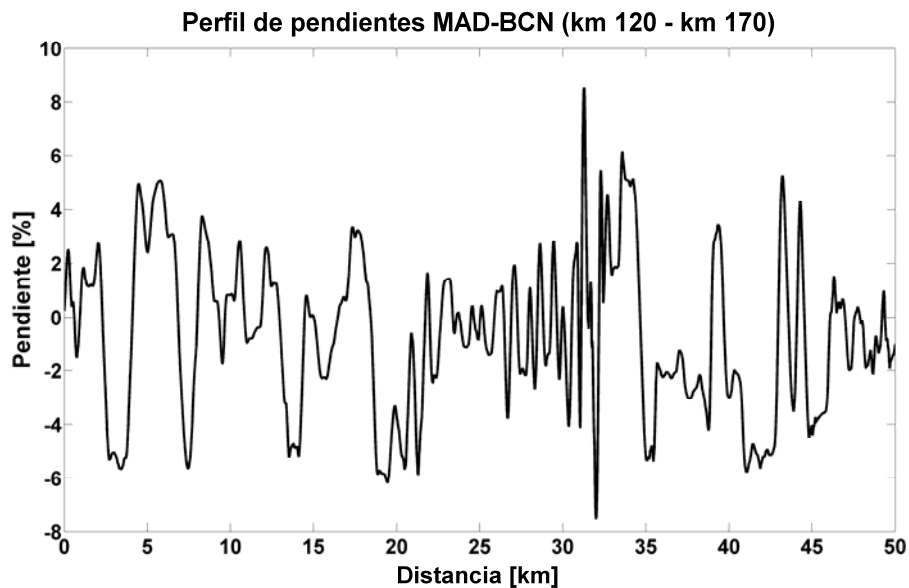


Fig. 6 – Pendientes de la carretera Madrid-Barcelona entre los kilómetros 120 y 170

Las reacciones del algoritmo de optimización ante las 3 situaciones contempladas se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 7. La Tabla 1 contiene la velocidad calculada para cada una de los solapamientos del algoritmo de Programación Dinámica que dan como resultado los perfiles parciales de velocidad. Estos perfiles parciales son los que conforman cada perfil aproximado de velocidad óptima de las situaciones 1, 2 y 3. A partir de dichos perfiles aproximados, se escogen los parámetros de ponderación de la función de coste que permite realizar la Programación Dinámica teniendo en cuenta las pendientes. La Figura 7 muestra los perfiles de velocidad óptima para cada una de las situaciones de tráfico estudiadas.

| Velocidad calculada de cada perfil parcial [km/h] | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Número de perfil parcial | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Sin atasco | 68 | 68 | 68 | 68 | 64 | 64 | 60 | 60 | 52 |
| Con atasco no programado | 68 | 68 | 68 | 68 | 76 | 76 | 72 | 72 | 68 |
| Con atasco programado | 76 | 76 | 76 | 76 | 76 | 72 | 72 | 72 | 64 |

Tabla 1 – Velocidad de cada perfil parcial de velocidad calculado para las situaciones de retención de tráfico considerando el recorrido con pendientes

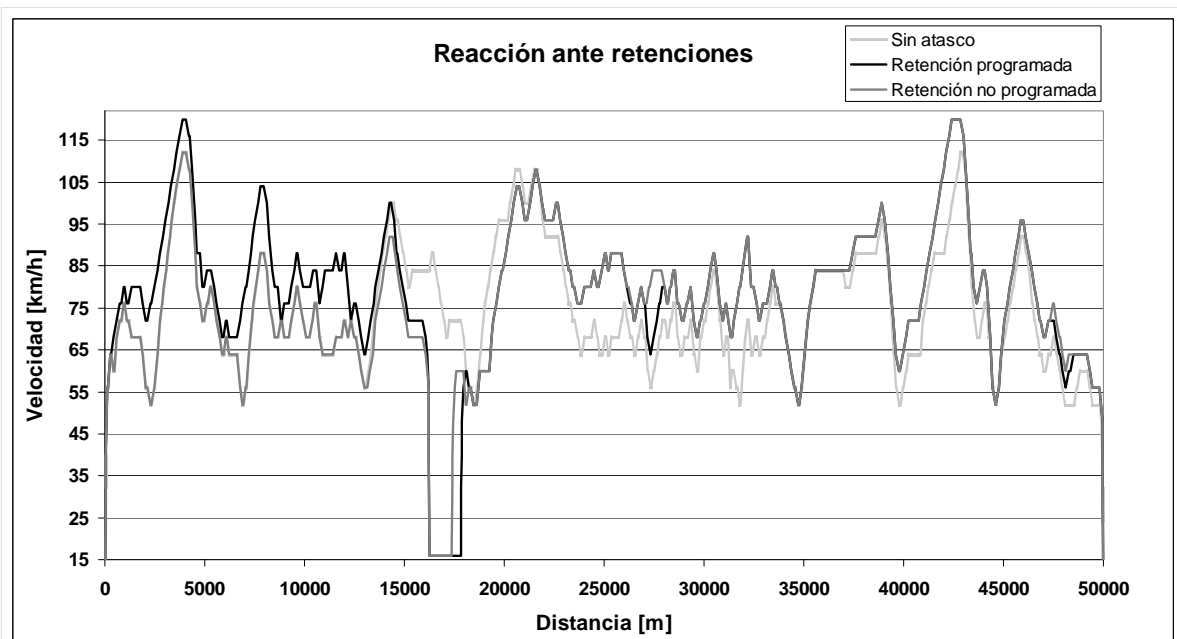


Fig. 7 – Reacción del algoritmo de optimización en presencia de retenciones de tráfico durante un recorrido con pendientes

En los perfiles de velocidad óptima obtenidos, los perfiles resultantes de las situaciones 1 y 2 son iguales durante los tramos de recorrido previos al atasco debido que no existe información de retenciones presentes en el recorrido. Después de que el perfil de la situación 2 sufre la pérdida de tiempo causada por el atasco, su velocidad sobrepasa a la de la situación 1 durante varios tramos de recorrido para poder llegar a tiempo al destino. Este aumento de la velocidad también puede verse en la Tabla 1 cuando se compara la velocidad de los perfiles parciales de los tramos 5 - 9 de estas dos situaciones.

El perfil de la situación 3 inicia el recorrido con una velocidad superior a la de los perfiles de velocidad de las situaciones 1 y 2 tal como lo muestran los valores de velocidad de los tramos 1 - 4 de la Tabla 1 y las curvas de velocidad de la Figura 7. Esto es debido al conocimiento previo que se tiene sobre el atasco, lo cual hace que el algoritmo trate de ganar tiempo de viaje durante los tramos anteriores al atasco. Aunque parte del tiempo que gana lo pierde por llegar al atasco antes que el perfil de la situación 2, se puede notar que no todo el tiempo ganado es desperdiciado en el atasco, pues en dos de los tramos posteriores al atasco (tramos 6 y 9) se obtienen valores de velocidad de perfil parcial menores que los presentados por la situación 2.

En cuanto a los tiempos de recorrido obtenidos, la situación 1 permite llegar al destino en 41.7 minutos, la situación 2 en 43.5 minutos y la situación 3 en 43.1 minutos. Por tanto, el algoritmo de optimización obtiene un tiempo de viaje inferior al máximo establecido (45 minutos) en las 3 situaciones de retención de tráfico consideradas.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se muestran diversas mejoras del algoritmo de optimización de combustible implementado en Cabrera-Montiel et al (2012) basado en Programación Dinámica. Debido al proceso iterativo con el cual la Programación Dinámica encuentra el mínimo de su función objetivo, la optimización de combustible para un recorrido, se incrementa el tiempo de cálculo hasta que se vuelve inviable la ejecución en tiempo real. Para dotar al algoritmo de la capacidad de optimizar en tiempo real un recorrido largo (100 km o superior), se realiza la optimización de trozos del recorrido y los perfiles de velocidad calculados se solapan entre sí para obtener una versión aproximada del perfil de velocidad óptima que minimiza el consumo de combustible de todo el recorrido. Se muestra que un perfil óptimo y su correspondiente perfil aproximado son muy similares pues en una comparación cuantitativa de ellos se alcanzaron diferencias de 0.09% y 0.04% en consumo de combustible y tiempo de viaje respectivamente.

Otra mejora incluida en el algoritmo de optimización es la capacidad de cumplir con los requerimientos de tiempo máximo de viaje que el conductor establezca para el recorrido. Esto se logra teniendo en cuenta la información de velocidad límite de todas las zonas de la carretera y de las posibles retenciones de tráfico que el vehículo puede encontrarse durante el recorrido. Con esta información, el algoritmo tiene conocimiento previo de las retenciones de tráfico habituales de la carretera y puede calcular la velocidad promedio a la cual debe desplazarse el vehículo sobre cada tramo del recorrido con el objetivo de llegar a tiempo al destino mientras optimiza el consumo de combustible. En el algoritmo de optimización de consumo también se ha contemplado la influencia que tienen las retenciones de tráfico inesperadas sobre el tiempo total del viaje. Si se presentan atascos inesperados, el algoritmo es capaz de adaptar el valor de velocidad de los siguientes tramos de recorrido para recuperar el tiempo perdido en dichas retenciones y así no incumplir el tiempo máximo de llegada al destino. Se utilizó el algoritmo para calcular el perfil de velocidad óptima para un recorrido de 50 km y tiempo máximo de viaje de 45 minutos. Utilizando una carretera real y diferentes situaciones de tráfico durante el recorrido, los perfiles de velocidad obtenidos cumplieron con el límite de tiempo considerado para culminar dicho viaje.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto TRA2010-0225-C03-03)

6. REFERENCIAS

ANDERSSON, J. y BREDBERG, L. (2009). Iterative driver training. *Proceedings of 16th ITS World Congress, Septiembre 21-25 de 2009*, CD-ROM. Estocolmo.

BERTSEKAS, D.P. (2005). *Dynamic programming and optimal control*. Athena Scientific, tercera edición, Belmont. ISBN: 1-886529-26-4

CABRERA-MONTIEL, W., TAPIA-FERNÁNDEZ, S., JIMÉNEZ-ALONSO, F., APARICIO-IZQUIERDO, F. (2012). Optimización de consumo de combustible de vehículos basada en programación dinámica. *Dyna, Ingeniería e industria* 87(5), pp. 574-583.

CERBE, T.M., KUHNERT, A., STRUBE, S. (2009). Fuel saving potential of car navigation systems. *Proceedings of 16th ITS World Congress, Septiembre 21-25 de 2009*, CD-ROM. Estocolmo.

DGT. (2014). Conducción eficiente. Dirección general de tráfico. Disponible en Internet. http://aplch.dgt.es/PEVI/documentos/catalogo_recursos/didacticos/did_adultas/Conduccion_eficiente.pdf

FORD-WERKE GMBH. (2014). Ford eco-driving program. Disponible en Internet. <http://www.ford-eco-driving.de>

GISZCZAK, A. (2006). Driving tests for just-in-time navigation in road transport. *Proceedings of 13th ITS World Congress, Octubre 8-12 de 2006*, CD-ROM. Londres.

HELLSTRÖM, E. (2010). Look-ahead control of heavy vehicles. *Tesis doctoral*. Linköping University, Linköping.

HELLSTRÖM, E., FRÖBERG, A., NIELSEN, L. (2006). A real-time fuel-optimal cruise controller for heavy trucks using road topography information. *SAE 2006 World Congress & Exhibition*, Abril 3-6 de 2006. Detroit.

HELLSTRÖM, E., IVARSSON, M., ÅSLUND, J., NIELSEN, L. (2009). Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice* 17(2), pp. 245-254.

HIRAOKA, T., TERAOKA, Y., MATSUMOTO, S., YAMABE, S. (2009). Quantitative evaluation of eco-driving on fuel consumption based on driving simulator experiments. *Proceedings of 16th ITS World Congress, Septiembre 21-25 de 2009*, CD-ROM. Estocolmo.

HOUNSHAM, S. (2008). Optimisation and control of thermal recovery for a hybrid vehicle. *Tesis doctoral*. Loughborough University, Loughborough.

IDAE. (2007). Manual de conducción eficiente para vehículos turismo. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Disponible en Internet. <http://web.ua.es/es/ecocampus/documentos/campanas/movilidad/manual-conduccion-eficiente.pdf>

JAMA. (2008). Reducing CO2 Emissions in the Global Road Transport Sector. Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. Disponible en Internet. http://www.jama-english.jp/publications/2008_CO2_RoadTransport.pdf

LARSON, R.E. y CASTI, J.L. (1978). *Principles of dynamic programming. Part I: Basic analytic and computational methods*. Marcel Dekker Inc, New Cork. ISBN: 0-8247-6589-3

ETH. (2005). QSS-Toolbox. Versión 2.0.1 [en línea]. Institute for Dynamic Systems and Control of Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich, Suiza. Disponible en Internet. <http://www.idsc.ethz.ch/Downloads/DownloadFiles/qss/qss.zip>

RHYS-TYLER, G.A. y BELL, M.C. (2009). Influencing driver behaviour for environmental benefit: The role of ITS technologies. *Proceedings of 16th ITS World Congress, Septiembre 21-25 de 2009*, CD-ROM. Estocolmo.

TANIGUCHI, M. (2008). Eco-driving and fuel economy of passenger cars. *Proceedings of IEE, Japan Annual Meeting, 2008*, P. S21(5-8). Fukuoka

TRUONG, L. (2008). Wise Bread's Wise Driving Guide: 108 Tips to Raise Your Fuel Economy. Disponible en Internet. <http://static.webwarriortools.com.s3.amazonaws.com/ebooks/wise-driving-tips.pdf>