

Modelo para la Conducción Eficiente y Sostenible basado en Lógica Borrosa

Miguel Villeta^a, Tamara Lahera^a, Silvia Merino^a, José G. Zato^{a,b}, José E. Naranjo^{a,b,*}, Felipe Jiménez^b

^a Departamento de Sistemas Inteligentes Aplicados, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia km 7, 28031, Madrid, España.

^b Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), Madrid, Carretera de Valencia km 7, 28031, Madrid, España.

Resumen

Uno de los principales objetivos en el ámbito de los sistemas inteligentes de transporte, consiste en fomentar los principios de la conducción sostenible. En este ámbito, uno de los elementos menos estudiados desde el punto de vista de la optimización y la eficiencia es la sostenibilidad en la distribución urbana de mercancías, aspecto hacia el que se orienta parte del proyecto TECMUSA (Tecnologías para la Movilidad Urbana Sostenible y Accesible), orientado al desarrollo de herramientas que mejoran la eficiencia de este tipo de transporte urbano, desde el punto de vista del análisis de la conducción humana, en sus conductas y sus reacciones. De esta manera, este trabajo presenta un sistema basado en un modelo lingüístico de decisión desarrollado utilizando sistemas inteligentes (lógica borrosa) que obtiene una evaluación de la eficiencia en la conducción. Este sistema ha sido diseñado, implementado y probado mediante simulaciones y refinado en ensayos en vehículos reales con el fin de realizar un ajuste correcto del modelo, tomando como patrón el comportamiento de los conductores humanos en la realización de conducción eficiente o no eficiente. Este modelo puede ser utilizado como base para el desarrollo de sistemas avanzados de asistencia a la conducción orientada a la mejora de la eficiencia y la reducción de emisiones y del consumo de combustible. *Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.*

Palabras Clave:

Conducción eficiente, lógica borrosa, sistemas inteligentes de transporte, modelo lingüístico.

1. Introducción

Una de las peculiaridades de la sociedad actual, reside en el abuso del consumo de energía de una forma severa, dado que en muchos de los hábitos diarios existen excesos que implican un derroche y consumo de forma irresponsable, agrediendo a su propia eficiencia y alejándose de la sostenibilidad, lo cual supone un uso enorme del recurso en comparación a su posibilidad de renovación [European Environment Agency, 2010]. Uno de los ámbitos en los que más se percibe dicha característica es en el sector del transporte, donde además se registra uno de los índices de emisión a la atmósfera de CO₂ más altos [European Commission, 2009]. Además, según estudios realizados en el año 2010 [IDAE, 2010a] por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía) en base a la directiva 1999/94/CE del Parlamento Europeo, el sector responsable de cerca del 40% del consumo final de energía fue el transporte. Dentro de este 40%, el transporte de carretera representó el 80% de dicho consumo. El empleo de energía de los vehículos privados en España representó alrededor del 50% del total de los consumos del transporte por carretera, correspondiendo fundamentalmente el resto, al tráfico de mercancías y con una minoría total (3%), al colectivo relativo a los pasajeros.

El transporte precisa de actuaciones que permitan mejorar su eficiencia energética y reducir de forma significativa sus consumos [European Commission, 1999], para lo cual ha de intervenir la tecnología, aportando recursos que posibiliten la disminución del gasto energético en aquellas actividades en las que sea viable.

Teniendo en cuenta los argumentos anteriores, cabe mencionar que hoy en día hay multitud de modelos matemáticos destinados a lograr reducciones en el consumo de energía en el transporte desde el punto de vista de la mecánica del vehículo [Casanova, 2006, Casanova et al. 2009]. Por otra parte, se han producido varios enfoques desde el punto de vista urbanístico [Quak, 2009]. Sin embargo, hay una tercera vía para tratar de reducir el consumo de energía en el transporte, cambiando el comportamiento del conductor, desde una manera de conducir no eficiente a un modo de conducción ecológica. Esta tercera vía es el foco del presente trabajo, orientado al desarrollo de un modelo de conducción ecológica que se podría utilizar como base para cualquier tipo de sistema de eco-asistencia que ayuda a reducir el consumo de energía en la conducción.

En consecuencia, el propósito de este trabajo es desarrollar un sistema que calcula la eficiencia del conductor desde el punto de vista humano, analizando su comportamiento al volante y sus

* Autor en correspondencia.

Correo electrónico: joseugenio.naranjo@upm.es (José E. Naranjo),

URL: www.segvauto.com

respuestas a ciertas situaciones, en lugar de analizar solamente la información suministrada por el vehículo. Para ello, se pretenden utilizar sistemas inteligentes con capacidad para modelar el conocimiento procedimental de los conductores humanos, los cuales permiten, además, realizar un ejercicio de abstracción a cerca del tipo de vehículo utilizado.

Para conseguir efectuar una conducción eficiente y sostenible, la actitud del conductor, así como su estilo de conducción son dos factores decisivos a la hora de reducir el consumo global de carburante. En nuestro modelo consideraremos fundamentalmente el estilo de conducción, ya que la actitud queda fuera de nuestro ámbito de trabajo.

1.1. Claves de la eco-conducción

Desde el punto de vista del tipo de conducción que se realice, se han publicado diversos estudios para determinar aquellos factores de los que depende la eficiencia [Makaras et al., 2011] o la seguridad [Ossen et al. 2011]. Ha quedado claro que el estilo de conducción es una variable clave que puede influir para reducir el consumo y las emisiones contaminantes [Reichart et al., 1998, Berry, 2010]. Algunos artículos de conducción ecológica, analizan el ahorro de combustible alrededor del 15% [Hiraoka et al. 2009] y el 25% [Taniguchi, 2008]. Fonseca et al [Fonseca et al., 2010] analizaron el efecto del estilo de conducción en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, llegando a la conclusión de que la conducción ecológica puede conducir a un ahorro de combustible del 14% y el consumo realizando una conducción agresiva puede aumentar en un 40%. En esta línea, Casanova et al [Casanova et al., 2009] propone un índice para clasificar el estilo de conducción. En general, estos porcentajes de ahorro de combustible se calculan sin tener en cuenta el tiempo de viaje. Cerbe et al [Cerbe et al., 2009] evaluó el consumo y el tiempo de viaje a lo largo de una ruta en 3 escenarios diferentes. Los resultados mostraron un ahorro de combustible de alrededor del 27,6%, 10,8% y 10,9% cuando los tiempos de viaje se incrementaron en un 7,8%, 6,25%, 7,5% respectivamente. Sistemas de ahorro de combustible, con un proceso de optimización que implica un ahorro de combustible y tiempo, no alcanzan valores tan generosos. Li y Tennant [Li et al., 2009] presentaron porcentajes de ahorro de combustible de alrededor del 3%-4% y Hellström [Hellström, 2007] habla sobre una prueba experimental en la que un gran camión ahorra hasta un 3,5% en combustible al viajar una distancia de 120 km sin necesidad de aumentar el tiempo de viaje.

En [Potter, 2009] se han desarrollado una serie de reglas y recomendaciones para llevar a cabo una conducción sostenible, que son beneficiosas tanto para cada individuo, ya que se conseguirá un ahorro en el consumo de carburante y aumento en la seguridad, como para el medio ambiente, pues el objetivo es disminuir la contaminación ambiental y reducir las emisiones de CO₂. El IDAE en colaboración con la DGT (Dirección General de Tráfico), ha realizado un estudio [IDAE, 2005b], en el que se registran una serie de dichas reglas y modos de comportamientos, heredados de otros países de la Unión Europea, para aprovechar las tecnologías de los vehículos actuales y ejecutar una conducción eficiente y racional. Asimismo, se podrían citar otras prácticas habituales en los conductores de la sociedad actual que deberían evitarse, como por ejemplo durante la conducción, es recomendable evitar el uso del aire acondicionado, siempre que las condiciones lo permitan, así como no mantener las ventanillas completamente abiertas, dado que se tratan de factores que

contribuyen al incremento del consumo de combustible y por lo tanto a la reducción de la eficiencia en la conducción.

Para llevar a cabo la optimización del consumo de combustible, algunos sistemas evalúan el estilo de conducción y sugieren maniobras de conducción eficiente al conductor [Andersson et al., 2009]. Los sistemas más complejos incluyen información de mapas digitales para optimizar el proceso [Li et al, 2009, Hellström, et al., 2006]. Kock et al [Kock et al., 2009] analizó el cumplimiento del control de crucero de los vehículos de transporte pesado con las estrategias de control predictivo para minimizar el consumo de combustible. En esta línea, ha sido desarrollado un sistema que, al conocer la ruta a seguir en términos de las carreteras y los límites de velocidad, puede informar al conductor en todo momento de la velocidad adecuada y el equipo adecuado para optimizar una función objetivo que considera el consumo y el tiempo de viaje, respetando las limitaciones legales y de seguridad.

2. Propósito

Teniendo en cuenta todos estos factores para lograr una conducción eficiente y sostenible, es necesario desarrollar un modelo de conducción eco-eficiente que contenga los factores relacionados con la actitud y el estilo de conducción. Además, este modelo tiene que ser computacionalmente realizable con el fin de ser utilizado como base para el desarrollo de cualquier tipo de ayuda a la conducción ecológica. Este modelo tiene que ser capaz de calcular la eficiencia de la conducta de los conductores en tiempo real, calificando esta eficiencia y explicando las causas de su comportamiento ecológico correcto o incorrecto ante su forma de conducir, estimar el ahorro de combustible posible, o el mapa de eficiencia de la ruta. Además, este modelo se ha orientado hacia los conductores de distribución de mercancías, un grupo que está particularmente interesado en la optimización del consumo de energía, a pesar de que actualmente carecen de los medios tecnológicos necesarios para apoyar esta necesidad.

Con el fin de desarrollar este modelo de conducción ecológica, se han utilizado sistemas inteligentes, sobre todo, la lógica borrosa, una técnica que permite modelar el conocimiento procedimental humano cuando se llevan a cabo determinadas tareas [Zadeh, 1965], en este caso, la conducción. Un enfoque similar ha sido utilizado con éxito en el de reconocimiento de patrones para la identificación de ciclos de conducción en vehículos eléctricos [Yann, 2004] e híbridos [Tian et al., 2009] o la conducción automática de vehículos [Naranjo et al. 2007]. Por tanto, este modelo de conducción eficiente que se presenta tiene que ser capaz de evaluar la eficiencia de un conductor basándose en una base de conocimiento de los comportamientos de conducción eficiente y la información suministrada por un vehículo.

3. Métodos

3.1. La lógica borrosa

Como se mencionó anteriormente, el modelado planteado se ha llevado a cabo utilizando técnicas de lógica borrosa, debido a su capacidad para modelar el conocimiento procedimental humano [Mendel, 1995]. En este caso el procedimiento que se pretende emular es la conducción eficiente y el comportamiento

de un conductor cuando realiza esa tarea desde el punto de vista de su actitud sostenible o no sostenible. Por supuesto, este es un modelado de un sistema complejo, que involucra una serie de variables relacionadas con la conducción pero cuyo resultado final es el resultado de la estimación de la eficiencia en la conducción de un ser humano.

Es por ello que puesto que el razonamiento humano utiliza predicados no bipartitos, es decir, predicados vagos, ambiguos e imprecisos, surge la necesidad de introducir una lógica que pueda recoger este tipo de razonamiento. La lógica borrosa, abarca por tanto este tipo de predicados imprecisos en su razonamiento, al igual que lo hacen las personas [Morales, 2002, Guzman et al., 2006].

3.2. Implementación del modelo

La implementación del modelo, basándose en el tipo de lógica definida anteriormente, se ha elaborado mediante el soporte de la herramienta MATLAB para las simulaciones y un motor de inferencia borroso implementado a tal efecto en el lenguaje de programación Python, para las pruebas de campo. Se ha trabajado utilizando como método un controlador Sugeno, dado que al tratarse de un resultado en el que se abordan solo dos posibilidades (Eficiente o No eficiente) Sugeno presenta grandes ventajas debido a la combinación entre lo borroso y lo numérico. Así, se tiene el intervalo de casos favorables (los cuales abarcan valores numéricos entre el 0 y el 1) y los casos desfavorables (entre -1 y el 0). Mediante esta técnica, las reglas responden al formato:

$$\text{If } x \in A \wedge y \in B \text{ then } z = f(x; y)$$

donde A y B son conjuntos borrosos que caracterizan al antecedente y efectúan cierta operativa entre ellas. Por otro lado:

$$z = f(x; y)$$

es una función singleton que caracteriza al consecuente, es decir, aquella función que devuelve un valor concreto, esto es, un punto específico del conjunto.

La manera de comenzar a constituir el modelo, se basa en añadir las variables de entrada y las de salida que definen la dependencia y resultado del prototipo, y creando sus respectivas variables lingüísticas, las cuales tienen como posibles valores palabras que son representadas mediante conjuntos borrosos y describen el estado de cierto objeto o fenómeno. Además, se determinan también sus intervalos con valores numéricos y funciones de pertenencia, que son aquellas que devuelven un valor numérico entre 0 y 1, indicando el grado de pertenencia de un elemento con respecto a un conjunto.

3.3. Definición del modelo borroso para la estimación de la eficiencia energética en la conducción

Consideramos conducción eficiente como aquella que logra en menor consumo de combustible en función de la situación del vehículo y del entorno. Eso no significa que se tenga por objetivo que el consumo sea siempre bajo, sino que se busca que el comportamiento del conductor garantice una conducción sostenible sea cual sean las circunstancias de la circulación, el

entorno o el propio vehículo. Así, un consumo elevado puede conllevar una conducción eficiente si se está subiendo un puerto de montaña y, de la misma manera, un consumo bajo puede conllevar una conducción no eficiente al utilizar, por ejemplo, el freno motor. Para llevar a cabo este modelado se ha seleccionado la batería de variables de entrada que mejor representa tanto la actuación del conductor como el entorno de circulación y el propio vehículo, teniendo siempre en cuenta el equipamiento y los sensores disponibles para la obtención de la información.

La estimación de la eficiencia de la conducción empleada por el sistema se realiza de forma empírica, en función de la experiencia humana con conductores expertos y los comportamientos del conductor ejecutados en las pruebas de campo a tal efecto.

Así, en las citadas pruebas, se han llevado a cabo varias horas de experimentación con vehículos reales, en carreteras reales y circuito cerrado, donde el conductor correspondiente ha tratado de, a partir de su experiencia y su formación en conducción eficiente, comportarse de manera eficiente y de manera no eficiente como respuesta ante las mismas situaciones de conducción. Ante esta batería de pruebas, el sistema desarrollado es capaz de generar una salida de nominada **Eficiencia**, que identifica claramente estas actitudes y las pondera en una escala de 1 a -1, donde 1 representa que el conductor realizando una conducción totalmente eficiente y -1 representa que la conducción es totalmente no eficiente. Por tanto, el criterio para el modelado de la eficiencia en la conducción se ha calibrado en base a los comportamientos reales de los conductores humanos que, en base a su experiencia, realizan la tarea de la conducción.

Una vez introducida la filosofía del sistema desarrollado, procederemos a la definición de los diferentes elementos que componen el modelo mejorado para la conducción eficiente y sostenible basado en lógica borrosa

Por un lado, se han definido todas aquellas variables de las que puede depender el tipo de conducción que se realiza, desde el punto de vista de la eficiencia energética. Por tanto, se determinó que las variables más relevantes, debido a su gran relación con respecto a la representación de la eficiencia en la conducción, son: el consumo del vehículo, la aceleración que se produce en cada instante, las revoluciones por minuto y la pendiente de la carretera sobre la que se está conduciendo.

En una primera versión se consideró introducir en el sistema la velocidad de circulación y la marcha engranada en cada momento. Sin embargo, en la versión final del modelo, se ha detectado que existe una relación directa entre la velocidad del vehículo, las revoluciones del motor y la relación de cambio-grupo-ruedas, con lo que una de ellas resulta redundante. Se ha optado, por tanto, por eliminar la marcha engranada del conjunto de variables de entrada, al ser compleja de modelar con lógica borrosa. Asimismo, en una segunda revisión se ha decidido eliminar la velocidad que la velocidad no aporta información significativa desde el punto de vista de la eficiencia.

Una de las características con las que trabaja la lógica borrosa, es que a las variables se les asigna distintas etiquetas lingüísticas con distintos universos de discurso, los cuales se superponen en sus límites, ya que es allí donde se podría considerar, según el caso, que dicho valor pertenezca a uno de los intervalos o al otro.

Todo el modelado se ha realizado mediante funciones trapezoidales o triangulares debido a que este tipo de funciones se definen mediante cuatro valores: dos límites inferiores y el límite de soporte inferior y el superior. En el caso de las triangulares, el valor de los límites de soporte es el mismo. A la hora de dar

valores a las variables y a sus intervalos, usando funciones de este tipo el trabajo se hace de manera más sencilla y la eficacia no disminuye.

Puesto que dependiendo del tipo de vehículo con el que se desee trabajar, es obvio que sus valores serán distintos (no es lo mismo evaluar las condiciones de un autobús urbano, que un vehículo privado diesel o que otro privado gasolina). Se han definido los siguientes valores tomando como ejemplo un vehículo de gama similar a los empleados en los sistemas de reparto de mensajería convencionales.

De este modo, se van a describir las distintas variables con la elección de sus valores. Las variables de entrada del modelo borroso son cuatro: aceleración, consumo, revoluciones por minuto (RPM) y pendiente de la carretera, y su definición aparece en la tabla 1. Sólo va a haber una variable de salida del modelo borroso, **Eficiencia**, que representa la estimación de la eficiencia en la conducción normalizada en el intervalo [-1,1]. Esto significa que la conducción no será en absoluto eficiente si la salida del modelo es -1 y la eficiencia se incrementa según la salida incrementa su valor hasta 1, que significa que el conductor está realizando una conducción totalmente eficiente.

En la etapa de refinado del sistema se han considerado las **revoluciones por minuto** como una de las variables fundamentales del sistema, definida en el rango de 0 a 4500 revoluciones y cuyas funciones de pertenencia están ajustadas al motor de un camión diesel de pequeño tamaño.

Se ha dividido el rango en dos particiones borrosas, considerando que las revoluciones son talmente baja entre las 0 y las 2000 y cuyo grado de pertenencia va disminuyendo entre 2000 y 2500, teniendo en cuenta, que según lo estudiado, el cambio de marcha para realizar una conducción ecológica, se hará entre unas 1500 y 2500 revoluciones. Así, todos aquellos valores que sobrepasen ese límite, se considerarán altos.

Tabla 1. Descripción de las variables lingüísticas de entrada del sistema de estimación de la eficiencia del conductor

| Variable | Etiqueta Lingüística | Función de Pertenencia |
|-------------|----------------------|------------------------|
| RPM | Bajas | |
| | Altas | |
| Aceleración | Negativa | |
| | Nula | |
| | Positiva | |
| Pendiente | Negativa | |
| | Llana | |
| | Positiva | |
| Consumo | Bajo | |
| | Alto | |

El **consumo** es la otra variable fundamental para el modelado de la eficiencia, definiendo su rango entre 0 l/100Km y 40 l/100km. Conviene recordar que dichos valores se refieren al

consumo instantáneo de una furgoneta con un consumo medio de 12.5 l/100km.

Así, la variable lingüística consumo se ha dividido en dos particiones borrosas: consumo bajo, cuyo grado de pertenencia es máximo entre 0 y 5 l/100km y va disminuyendo entre los 5 y los 20 l/100km y por último, consumo alto, cuyo grado de pertenencia crece entre los 5 y los 20 l/100km y es máximo entre los 20 y los 40 l/100km.

La variable **aceleración**, se considera que ronda entre los valores -50 m/s^2 y 50 m/s^2 , decreciendo entre los -40 m/s^2 y 0 m/s^2 y 40 m/s^2 y 0 m/s^2 respectivamente para las etiquetas lingüísticas negativa y positiva. Una aceleración mayor o menor instantánea, es muy improbable. Así, se distingue entre aceleración negativa, es decir, cuando se decelera o se frena, la aceleración nula, que se producirá cuando el vehículo lleve una velocidad constante o nula, y la aceleración positiva, que abarca aquellos momentos en que el vehículo va aumentando su velocidad.

La inclinación o pendiente de una carretera describe su pendiente, inclinación o grado. Se calcula utilizando dos coordenadas GPS consecutivas en, donde los ejes X e Y son el Este y el Norte de coordenadas UTM y el eje Z es la altura. Los valores lingüísticos que toma la variable **pendiente de la carretera**, son tres, comprendidos entre el rango de -40° y 40° . El valor negativo de la pendiente significa que es una pendiente hacia abajo, así tomamos como valores negativos desde -40° hasta 0° , como pendiente llana de -35° a 35° y como pendiente positiva de 0° a 40° .

3.4. Reglas

Inicialmente se definió un primer conjunto de reglas borrosas que trataban de representar los comportamientos de un conductor humano cuando se enfrenta a la tarea de la conducción y su consecuencia desde el punto de vista de la eficiencia energética.

No obstante, en las pruebas finales del proyecto TECMUSA se ha refinado este conjunto de reglas, debido a que había algunas redundantes y otras que no aportaban conocimiento adicional al sistema. Por ello, en este artículo se presenta un nuevo conjunto de reglas, reducido, pero que mejoran la funcionalidad del sistema anterior, quedando cerrado como prototipo final.

La elección de las reglas que rigen las decisiones del modelo, ha ido evolucionando desde el comienzo del modelado hasta el resultado final, dado que se trata de uno de los factores claves para el correcto funcionamiento del mismo. En un principio, se establecieron reglas con un carácter claramente simple, es decir, con un solo predicado. Posteriormente, y tras efectuar las pruebas simuladas necesarias se empezaron a crear, estructuras con más predicados, uniendo distintas variables en una misma regla, obteniéndose una base de reglas de 22 elementos. Finalmente, en el último proceso de refinado contra una batería de experimentos de varias horas, se detectaron algunas inconsistencias y redundancias, tanto en las variables de entrada como en el conjunto de reglas, lo que obligó a realizar una criba de ambas, reduciendo su tamaño a fin de que los resultados se ajustasen a la realidad así como introducir el máximo conocimiento del conductor humano eficiente a partir de la información de entrada disponible.

Por tanto, se han definido los casos no eficientes como aquellos en los que se efectúa un consumo de combustible elevado en situaciones en las que el entorno de conducción

permitiría reducirlo mediante la modificación de la manera de conducir. Sin embargo, existen ciertos momentos en la conducción, que aun consumiendo una alta cantidad de combustible, no existe una alternativa para consumir menos. Este es el caso, por ejemplo, de la puesta en marcha del vehículo o la subida de una cuesta elevada. No queda otra alternativa, por lo que se considera como un caso de eficiencia.

Según esta filosofía, las reglas que se han establecido en el modelo creado son las siguientes:

Tabla 2. Reglas borrosas del prototipo

| Regla | Antecedente | Consecuente |
|-------|-----------------------------------|--------------|
| 1 | Consumo Bajo | Eficiente |
| 2 | Consumo Alto | No eficiente |
| 3 | Pendiente Negativa | Eficiente |
| 4 | Pendiente Positiva | No eficiente |
| 5 | RPM Bajas | Eficiente |
| 6 | RPM Altas Aceleración Positiva | No Eficiente |
| 7 | RPM Altas Aceleración Negativa | Eficiente |

4. Resultados y discusión

Para la verificación del modelo creado, se han realizado dos tipos de pruebas. Las primeras se han llevado a cabo ejecutando una batería de datos simulados, con el objetivo de retroalimentar los resultados y poder refinar reglas, y las segundas extrayendo los datos necesarios de un vehículo instrumentado específicamente para el estudio de proyectos de ingeniería. En las simulaciones, los parámetros utilizados para el ajuste grueso han sido seleccionados ad-hoc para asegurar que las situaciones representadas son eficientes, no eficientes, un poco eficientes, etc, por un usuario experto.

Tabla 3. Selección de resultados de las pruebas simuladas

| CASO | RPM | Aceleración (m/s ²) | Pendiente (°) | Consumo (l/100 Km) | Resultado esperado (Eficiente Sí/No) | Resultado obtenido |
|------|------|---------------------------------|---------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1 | 1800 | 1.5 | 0 | 13 | Sí | 0.4667 |
| 2 | 2100 | 0.75 | 0 | 8 | Sí | 0.7595 |
| 3 | 2000 | 0.5 | 0 | 6 | Sí | 0.9333 |
| 4 | 1600 | 0.1 | 0 | 3 | Sí | 1 |
| 5 | 2500 | 3 | -10 | 20 | No | -0.5801 |
| 6 | 3000 | 0 | 0 | 3 | Sí | 1 |
| 7 | 3000 | 1.2 | 8 | 8 | Sí | 0.2713 |
| 8 | 1000 | 1 | 3 | 10 | Sí | 0.5982 |
| 9 | 1000 | 0 | 0 | 5 | Sí | 1 |
| 10 | 1800 | -0.3 | 3 | 10 | Sí | 0.5982 |
| 11 | 2500 | 0.3 | 7 | 8 | Sí | 0.3251 |
| 12 | 1800 | 0.5 | 0.1 | 13 | Sí | 0.4646 |
| 13 | 1800 | 0.5 | 0.1 | 9 | Sí | 0.7309 |
| 14 | 1200 | -0.3 | 3 | 10 | Sí | 0.5982 |
| 15 | 1200 | 0 | 3 | 21 | No | -0.0411 |
| 16 | 1200 | 0 | 5 | 21 | No | -0.0667 |
| 17 | 3000 | 0 | 0 | 21 | No | -1 |
| 18 | 4000 | 0.5 | 0 | 21 | No | -1 |
| 19 | 3000 | 5 | 0 | 15 | No | -0.407 |
| 20 | 2500 | 3.6 | 0 | 18 | No | -0.755 |

4.1. Pruebas simuladas

Durante la creación de la batería de datos para la prueba del prototipo, se recopilaban una serie de casos simulados, los cuales se han considerado relevantes y suficientes para la verificación de las reglas propuestas.

La elección de estos valores se basa en que se consideran lo suficientemente completos como para abarcar tanto aquellas

situaciones complicadas de evaluar como, por ejemplo, ir circulando por una cuesta arriba a bajas revoluciones, o ir circulando en primera en condiciones que no son de salida, así como situaciones más sencillas y claras, donde la evaluación de la eficiencia no supone mucha complejidad; un claro ejemplo es ir circulando a bajas revoluciones, a baja velocidad y con bajo consumo. Se han incluido, además, algunas situaciones que, en la realidad es difícil que se produzcan a fin de localizar los límites del sistema.

Así pues, se aportan una selección de los casos, separados por filas así como el valor de cada variable de entrada junto con el resultado que se esperaba obtener (sí / no), basándose en la experiencia de los diseñadores en conducción eficiente, y el resultado obtenido tras la evaluación del modelo.

El propósito de crear un modelo, como ya se mencionó, es evaluar en tiempo real la eficiencia energética del conductor mientras conduce un vehículo.

Así pues, tal y como muestra la tabla 3 a modo de ejemplo, tras la ejecución del modelo final refinado con los valores anteriores, se alcanza un alto grado de efectividad desde el punto de vista de la concordancia con los resultados esperados, sin la presencia de falsos positivos ni falsos negativos.

4.2. Pruebas reales

Para la realización de las pruebas reales se ha propuesto el uso de un vehículo de características similares a los empleados en los servicios de mensajería urbana. Sin embargo antes de llevar a cabo dichas pruebas, se produjeron algunos ensayos previos, con un vehículo Peugeot 307 de gama media a fin de realizar un calibrado inicial del sistema.

Una vez ajustado el modelo, las pruebas definitivas se han llevado a cabo utilizando una furgoneta Iveco Daily c15, 2800 cc, 150 CV.

La obtención de los valores de los parámetros necesarios a tiempo real, se recogen a partir de la interpretación de información extraída de ciertos sensores situados en el vehículo. Estos datos son transmitidos a través de una red de comunicación (CAN: *Controller Area Network*) en tiempo real utilizando la mensajería FMS (Fleet Management System), hacia una unidad central de procesamiento capaz de recopilar con una frecuencia de 100 Hz las variables velocidad, RPM y consumo. Mediante la integración de una tarjeta de red compatible con la red CAN en la computadora encargada de recolectar los datos, es posible obtener esta la información de interés que finalmente será utilizada para alimentar el modelo. Por otro lado, la variable pendiente es calculada mediante un dispositivo GPS integrado en el vehículo que suministra información de posicionamiento al ordenador de abordo a una frecuencia de 10 Hz y con una precisión de 1 cm. Finalmente la obtención de la variable aceleración, se consigue mediante el cálculo de la misma a partir de los valores instantáneos de la velocidad y del tiempo. La figura 1 muestra la arquitectura del sistema.

Con esta instrumentación, se ha procedido a realizar diversas sesiones de conducción de la Iveco, llevando a cabo comportamientos eficientes e ineficientes por parte de los conductores, utilizados como patrón para comprobar la fiabilidad del sistema borroso desarrollado. En la figura 2 se puede apreciar una de las rutas realizadas durante estas sesiones, cuyos resultados se presentan en la figura 3, mostrando una ruta de 10 minutos entre el Campus Sur de la Universidad Politécnica de

Madrid hasta la autopista M50, a través de la autopista A3 Madrid - Valencia.

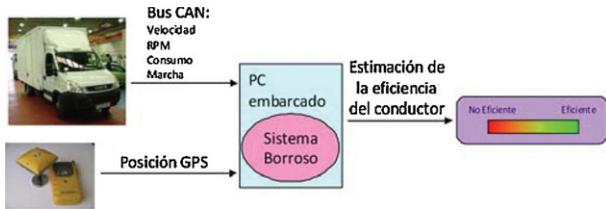


Figura 1. Arquitectura del sistema.

En la figura 3 se representa una sesión experimental al volante de la furgoneta Iveco, donde el conductor lleva a cabo diversos comportamientos eficientes y no eficientes a fin de demostrar la validez del modelo desarrollado. Así, se representan, de abajo a arriba, las variables de entrada y arriba del todo, la salida del sistema borroso.

Es de tener en cuenta, que este ensayo se ha realizado en una carretera real con tráfico real, con lo que determinados comportamientos extremos, que pueden ser considerados peligrosos, se han evitado, llevando a cabo una conducción segura como premisa fundamental, a la vez que se intentan emular los comportamientos poco o muy eficientes.

Tal y como se puede comprobar observando los resultados obtenidos en la figura 3, el modelo diferencia entre distintos grados de eficiencia e ineficiencia. Un ejemplo claro de ello, se muestra entre los segundos 275 y 400, donde el conductor intenta realizar una conducción lo menos eficiente posible, manteniendo un consumo alto y elevadas revoluciones, variando con frecuencia la velocidad y, en consecuencia, la aceleración y ante diferentes situaciones de pendiente de la carretera.

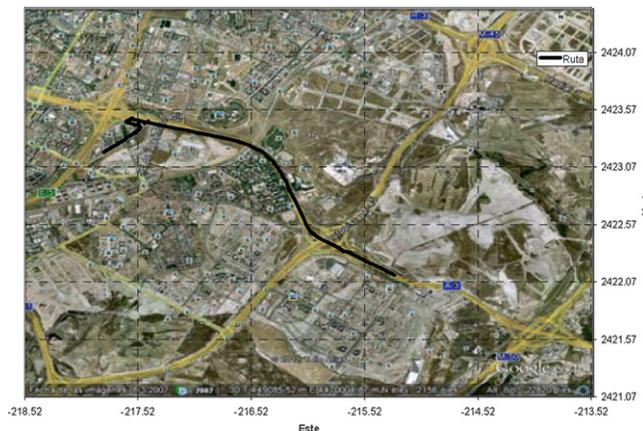


Figura 2. Representación de la ruta realizada en el ensayo.

Se puede apreciar en la figura que el sistema borroso identifica correctamente estas situaciones, interpretando la eficiencia de la conducción de una forma coherente en función de las variables de entrada. Asimismo, entre los segundos 500 y 600, el conductor intenta realizar una conducción lo más eficiente posible, intentando mantener las revoluciones y el consumo bajos a pesar de la diferente orografía de la carretera, en algunos casos, con pendientes elevadas. En este caso, el sistema también identifica correctamente estas situaciones, indicando un nivel de eficiencia

elevado en la conducción. En la figura 4 se muestran los detalles del sistema borroso en la citada ruta.

Es de destacar que la estimación de la eficiencia depende de los valores de cada variable de entrada, que no depende de un factor específico aunque, obviamente, presenta una gran relación con el consumo de combustible. Esto demuestra que el sistema es altamente no lineal y que la selección de un sistema inteligente para el modelo es una decisión de diseño adecuada. De esta manera, el sistema identifica claramente esos comportamientos, indicando la eficiencia o ineficiencia energética con la que el conductor está ejecutando su tarea.

Finalmente, en la tabla 4 mostramos una comparativa de las distintas rutas realizadas en los ensayos y la tasa de acierto del modelo comparada con las apreciaciones de expertos, distribuido para conducción en autopista, zona urbana y carretera convencional.

Tabla 4. Comparación entre las rutas realizadas

| Tipo de vía | % Acierto |
|--------------|-----------|
| Autopista | 99.1 |
| Zona urbana | 97.5 |
| Convencional | 94.23 |

5. Conclusiones y líneas futuras

Tras la finalización del trabajo planteado, se puede destacar que los objetivos establecidos inicialmente han sido cumplidos satisfactoriamente, ya que se ha conseguido crear un prototipo capaz de detectar si la conducción llevada a cabo con una furgoneta es eficiente o no, y si la eficiencia en cierto instante temporal es mayor o menor que en el instante anterior o posterior, es decir, a instantes de tiempo progresivos, el modelo determina cómo varían los resultados obtenidos de manera progresiva.

Todo ello ha sido posible, mediante la implementación de un modelo matemático basado en lógica borrosa, que permite analizar el comportamiento de los conductores desde el punto de vista de la eficiencia en la conducción. Dicho modelo, hace uso de determinadas reglas que evitan la contradicción y repetición de las mismas, mediante la recogida de información del estudio realizado previa definición del modelo.

En cuanto a las pruebas simuladas y reales realizadas con la furgoneta IVECO (un vehículo con características similares a los utilizados por los transportes de mercancías en las ciudades) se puede concluir que se han obtenido resultados favorables y acordes a los esperados.

Por un lado, desde el punto de vista del trabajo futuro, uno de los objetivos más importantes que se pretende alcanzar a partir del modelo creado, consiste en refinar los resultados obtenidos mediante la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, como un entrenamiento con redes de neuronas de las reglas propuestas hasta el momento, así como la inclusión de algoritmos genéticos que permitan lograr un aumento en la eficacia del modelo y sus resultados, estudiando las posibles reglas sobrantes y generando un mayor rendimiento en la aplicación.

Por otro lado, para que el modelo creado pueda llegar a integrarse en vehículos, es necesario el desarrollo de una interfaz con la que el conductor pueda interactuar, de manera que ésta vaya comunicándole, mediante un sistema de información visual muy intuitivo, el tipo de conducción que está realizando, desde el punto de vista de la eficiencia energética.

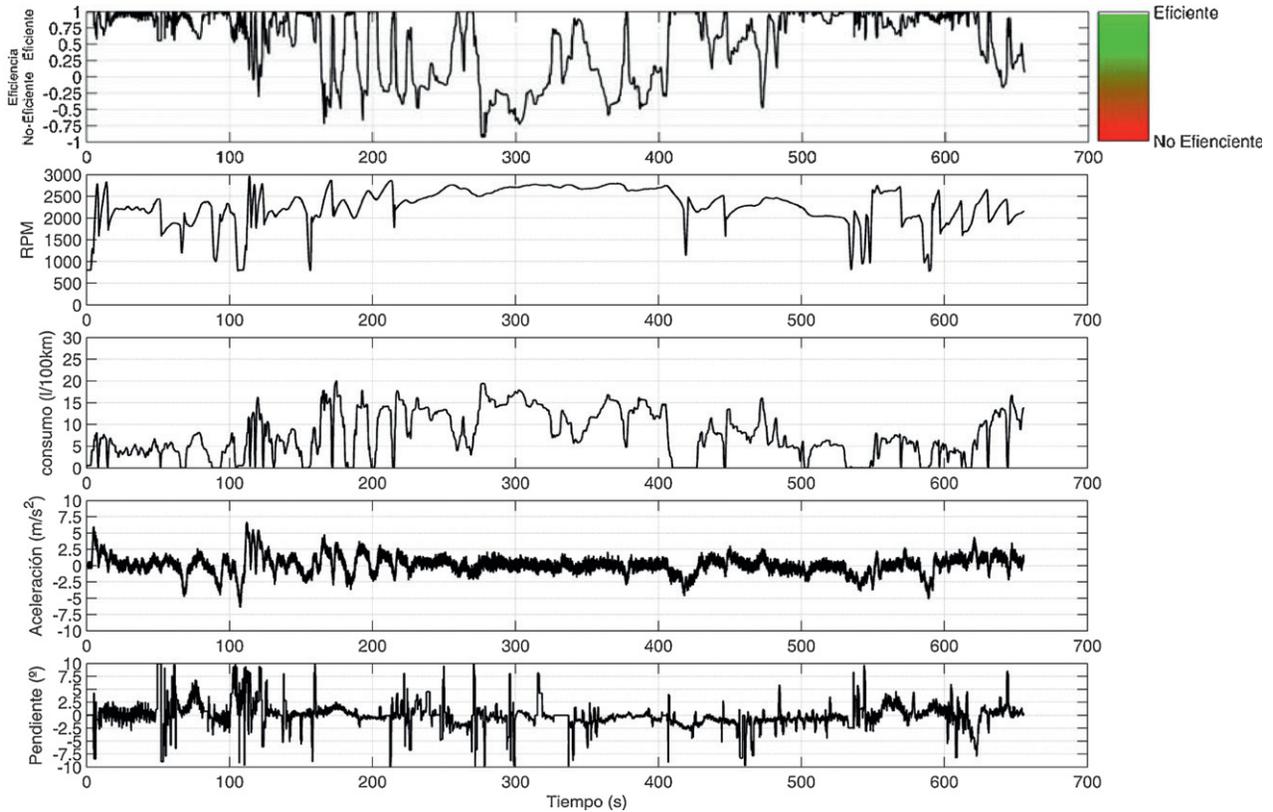


Figura 3. Ensayo de 10 minutos de diversos comportamientos en la conducción eficiente junto a la salida del modelo borroso.

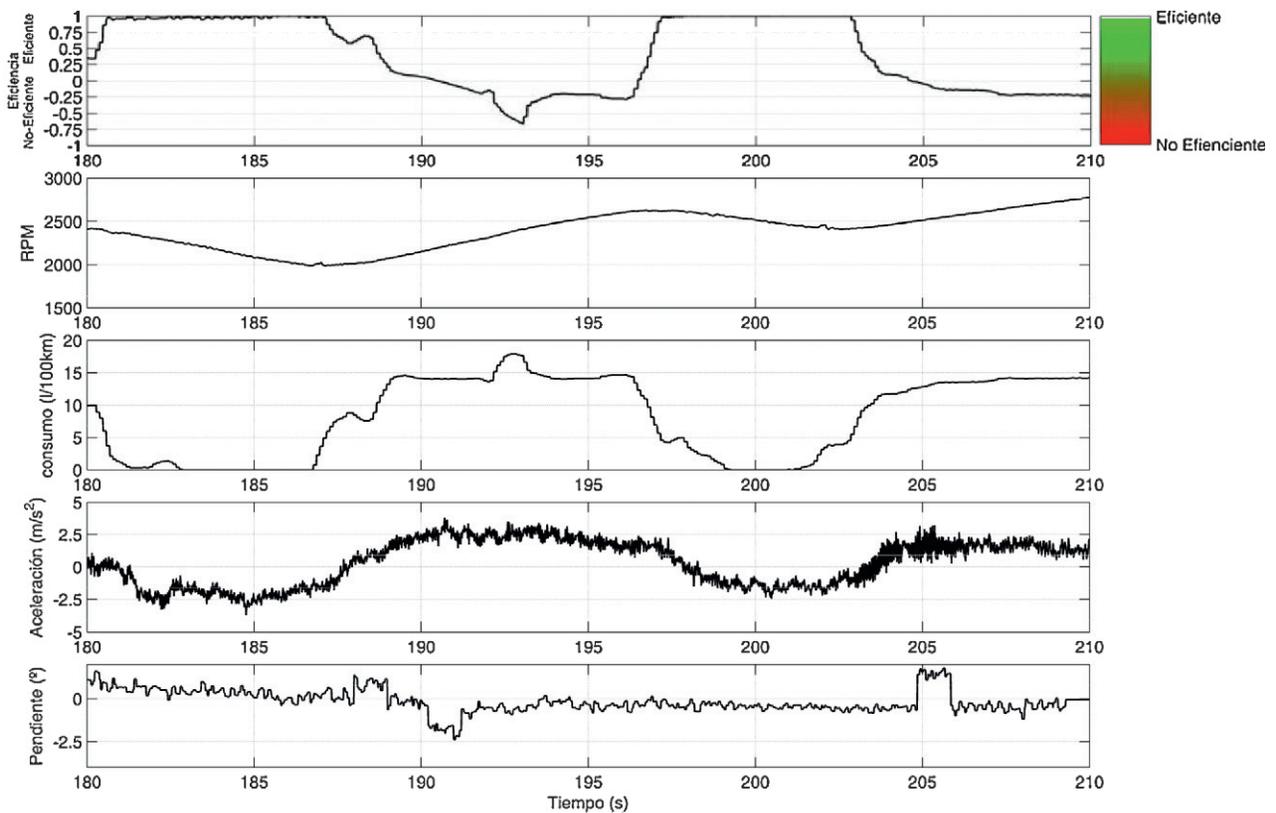


Figura 4. Comportamiento del sistema borroso de conducción eficiente siguiendo una ruta. Este caso muestra una prueba de conducción ineficiente.

English Summary

Using Fuzzy Logic to Model the Efficiency of Human Drivers.

Abstract

One of the main goals in the field of Intelligent Transportation systems is to promote the principles of sustainable driving by presenting good practices or systematic prototypes. In this area, one of the less studied elements is the sustainability of Urban Freight Distribution in order to carry out actions oriented to converting the distribution into a more optimal and efficient one. This way, this paper presents the improved final prototype based on a linguistic decision model developed using intelligent systems (fuzzy logic) that obtain an assessment of the efficiency or the lack of it in the driving task. This system has been designed, implemented, tested in simulation and tested and fine tuned in real vehicles in order to analyze its right performance and response.

Keywords:

Fuzzy logic, intelligent transportation systems, linguistic model.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de los proyectos PSE-370000-2009-0 (TECMUSA), TRA2009-07505 (MESH-ITS), TRA2010-15645 (iVANET), financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad, así como a la Red de Excelencia de la Comunidad de Madrid SEGVAUTO (Seguridad en Vehículos Automóviles con Especial Atención a Personas con Movilidad Reducida).

Referencias

- Andersson, J., Bredberg, L., 2009, Interactive Driver Training. 16th World Congress on ITS. Stockholm.
- Berry, I. M., 2010, The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles. MSc thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Casanova J., Fonseca N., Espinosa F., 2009, Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions. Proceedings 17th Transport and air pollution symposium and 3rd Environment and Transport Symposium. Toulouse, France. Actes INRETS n°122.
- Casanova Kindelan, J., 2006, Evolución tecnológica de los motores de automoción para reducir sus emisiones. Planes de Movilidad. Tecnologías de Reducción de Emisiones en el Transporte. pp. 87-100. Ministerio de Medio Ambiente.
- Cerbe, T. M., Kuhnert, A., Strube, S., 2009, Fuel Saving Potential Of Car Navigation Systems. 16th World Congress on ITS. Stockholm. 21-25.
- European Commission, 1999, DIRECTIVE 1999/94/EC Of The European Parliament And Of The Council of 13 December 1999 relating to the

- availability of consumer information on fuel economy and CO2 emissions in respect of the marketing of new passenger cars.
- European Commission, 2009, Action Plan on Urban Mobility, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- European Environment Agency, 2010, The European environment - state and outlook 2010: synthesis.
- Fonseca N., Casanova J., Espinosa F., 2010, Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car. Proceedings Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010, Zurich.
- Guzmán, D.; Castaño, V. M., 2006, La lógica difusa en ingeniería. Ciencia y Tecnología, 24, 87-107.
- Hellström, E., 2007, Look-ahead Control of Heavy Trucks utilizing Road Topography. Licentiate thesis. Linköpings Universitet, Sweden.
- Hellström, E., Fröberg, A., Nielsen, L., 2006, A real time fuel-optimal cruise controller for heavy trucks using road topography information. SAE Technical Paper 2006-01-0008. SAE 2006 World Congress & Exhibition, April 2006, Detroit, MI, USA.
- Hiraoka, T., Terakado, Y., Matsumoto, S., Yamabe, S., 2009, Quantitative Evaluation Of Eco-Driving On Fuel Consumption Based On Driving Simulator Experiments. 16th World Congress on ITS. Stockholm.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: IDAE, 2010, Guía práctica de la energía: consumo eficiente y responsable, para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: IDAE, 2005. La Conducción Eficiente, 2005.
- Naranjo, J. E., Sotelo, M. A., Gonzalez, C., García, R. and de Pedro, T., 2007, Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control, IEEE Intelligent Systems, vol. 22, no. 1.
- Kock, P., Welfers, H. J., Passenberg, B., Gnatzig, S., Stursberg, O., Ordys, A. W., 2009, Saving Energy through Predictive Control of Longitudinal Dynamics of Heavy Trucks, Proyecto conjunto, MAN – Kingston University – Technical University of Munich.
- Li, X., Tennant, K., 2009, Vehicle Energy Management Optimization Using Look-Ahead Three-Dimensional Digital Road Geometry. 16th World Congress on ITS. Stockholm.
- Makaras R., Sapragnas J., Kerys A., Pukalskas S., 2011, Dynamic model of a vehicle moving in the urban area, Transport, Volume 26 (1): 35-42.
- Mendel, J.M., 1995, Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial. IEEE Proceedings, 83, 345-377.
- Morales, G., 2002, Introducción a la lógica difusa. Centro de investigación y estudios avanzados del IPN. Mexico.
- Ossen S., Hoogendoorn, S.P., 2011, Heterogeneity in car-following behavior: Theory and empirics, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 19 (2): 169-386.
- Potter, S., 2009, Exploring Approaches Towards a Sustainable Transport System, International Journal of Sustainable Transportation, Volume 1 (2): 115-131.
- Quak, H., de Koster, R., 2009 Delivering Goods in Urban Areas: How to Deal with Urban Policy Restrictions and the Environment, Transportation Science, Vol. 43 (2): 211-227.
- Reichart, G., Friedmann, S., Dorrer, C., Rieker, H., Drechsel, E., Wermuth, G., 1998, Potentials of BMW Driver Assistance to Improve Fuel Economy. FISITA World Automotive Congress, Paris, 27 September-1 October.
- Taniguchi, M., 2008, Eco-driving and Fuel Economy of Passenger Cars. IEE. Japan Annual Meeting, No.4-S21-2, pp.5-8, Fukuoka, Japan.
- Tian Y., Zhang X., Zhang L., Zhang X., 2009, Intelligent Energy Management Based on Driving Cycle Identification Using Fuzzy Neural Network. Second International Symposium on Computational Intelligence and Design, 501-504.
- Yann Liaw, B., 2004, Fuzzy logic driving pattern recognition for driving cycle analysis. Journal of Asian Electric Vehicles, 2, 551-556.
- Zadeh, L. A. Fuzzy Sets, 1965, Information and Control, 8, 338-353. Apéndice A. Primer Apéndice.