

Sistema para la reducción de costes operativos en una flota de autobuses urbanos a través de la aplicación de técnicas de conducción eficiente

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR OPERATING COST REDUCTION. APPLICATION TO THE CASE OF A FLEET OF URBAN BUSES APPLYING EFFICIENT DRIVING TECHNIQUES

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7477> | Recibido: 21/11/2014 • Aceptado: 29/04/2015



Pablo Luque-Rodríguez¹, Abel Rionda-Rodríguez³,
Xabiel García-Pañeda¹, Daniel Álvarez-Mántaras¹,
Francisco Fernández-Linera¹, Alejandro García-Pañeda³,
Gabriel Díaz-Orueta², David Martínez-Álvarez³

¹ UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Escuela Politécnica de Ingeniería.
Campus de Gijón, s/n – 33203 Gijón

² UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA. Escuela
Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Juan del Rosal, 12 –
28040 Madrid.

³ ADN MOBILE SOLUTIONS. Parque Científico Tecnológico. Los
Prados, 166 – 33203 Gijón. Tfno: +34 985 182059

ABSTRACT

- One of the biggest operating costs in a road transport company is the fuel. Fuel consumption accounts for a significant percentage of spending and the change in its price tends to force immediate changes in rates to maintain profitability. This paper presents a method for reducing fuel consumption through the implementation of a system to support fuel-efficient driving. The system consists of a number of technical tools and seminars with experts who promote a learning process that is maintained over time. Technical tools are composed of an on-board system that generates indications in order to induce the driver to efficient driving and a web platform that allows to check routes and a series of indicators to analyse driving afterwards. Seminars and meetings with experts seek to give guidance and advice to strengthen the role of technical tools. The cost of implementing the system is very small making it easy finance through reduced consumption that can reach values higher than 10%. The system has been successfully tested in the Urban Transport Company of Gijón (EMTUSA) and achieved a reduction in consumption of 7 % in an urban environment while drivers have received training and performance reports. Then, an important reduction in the improvement has been shown when workers have not received feedback any more.
- Keywords: → Urban buses, CAN-BUS, FMS, Efficient driving, On-board system.

RESUMEN

Uno de los costes operativos más importantes en una compañía de transporte por carretera es el del combustible. El consumo de carburantes representa un importante porcentaje del gasto y la variación de su precio suele obligar a cambios inmediatos en las tarifas para mantener la rentabilidad. Este artículo presenta un método para la reducción de consumo de combustible a través de la puesta en marcha de un sistema de apoyo a la conducción eficiente. El sistema se compone de una serie de herramientas técnicas y seminarios con expertos que promueven un proceso de aprendizaje que se mantiene en el tiempo. Las herramientas técnicas están compuestas por un sistema embarcado que genera indicaciones que buscan incitar al chofer a una conducción eficiente y una plataforma Web que permite revisar las rutas y una serie de indicadores para analizar la conducción a posteriori. Los seminarios y las reuniones con expertos buscan dar orientaciones y consejos que refuercen el papel de las herramientas técnicas. El coste de implantación del sistema es muy reducido lo que hace muy fácil financiarlo a través de la reducción del consumo que puede llegar a valores superiores al 10%. El sistema ha sido probado con éxito en la Empresa de Transportes Urbanos de Gijón (EMTUSA) donde se ha conseguido una reducción del consumo del 7% en un entorno urbano durante el periodo en el que los conductores han recibido formación e informes de desempeño. Posteriormente se ha visto como al dejar de proporcionar realimentación a los trabajadores las mejoras se han reducido sustancialmente.

Palabras clave: Autobuses, CAN-BUS, FMS, Conducción eficiente, Sistema embarcado.

1. INTRODUCCIÓN

Se suele definir Conducción Eficiente [1] como la forma de conducir de manera inteligente ahorrando combustible. La Conducción Eficiente es un concepto que aprovecha los beneficios de las tecnologías incorporadas en los vehículos, al mismo tiempo que mejora la seguridad vial. Como componente importante de la movilidad sostenible, la Conducción Eficiente contribuye considerablemente a la protección del medio ambiente ya que contribuye a la reducción de las emisiones contaminantes (gaseosas y ruido). Estos beneficios generan otras ventajas inducidas tanto económicas (ahorro de combustible, reducción en los costes de mantenimiento, reducción de los costes asociados a los accidentes...), como sociales (in-

cremento de la seguridad vial, conducción más responsable, menor estrés durante la conducción, mayor comodidad para conductores y pasajeros...).

Existen diversas formas de adquirir y mejorar las capacidades de los conductores en relación con la conducción eficiente. Entre ellas, el empleo de simuladores de conducción o incluso aplicaciones de Internet. Sin embargo, la forma más efectiva suele implicar la realización de actividades de conducción real, ya sea en pista o en condiciones de tráfico abierto. En este sentido existen diversas iniciativas para el desarrollo de la eficiencia en la conducción. Por ejemplo, a nivel europeo existe una iniciativa denominada Ecodrive.org [1]. En el contexto nacional países como Austria [2], Suiza [3], Alemania [4], Holanda [5] o Escandinavia [6] han desarrollado también sus propias iniciativas. Sin embargo, es importante resaltar que la mayor parte de estas acciones y campañas son generales, destinadas a un público amplio y, por tanto, están orientadas a un conductor de vehículo turismo no profesional.

En lo que se refiere flotas de vehículos de uso profesional existen algunos productos, tanto integrados o no en los Sistemas de Ayuda a la Explotación (SAE's). Dentro de este campo es interesante citar algunos sistemas como GreenRoad [7], NexTraQ [8], Teletrac [9], Volvo-Dynafleet [10], Trinity [11], Fleetmatics [12], MixTelematics [13] o XRS [14].

La incorporación de los teléfonos inteligentes (*smart phones*) abre un nuevo campo para el desarrollo de aplicaciones de amplio espectro y, en particular, se va ampliando la oferta de aplicaciones (*apps*) que permiten realizar la asistencia para la realización de una conducción eficiente, como *FuelGood* [15], *FuelEconomyCoach* [16] o *SmartDrive* [17] entre las muchas aplicaciones que aparecen en los distintos repositorios existentes (AppStore, GooglePlay...).

En el ámbito más académico, se han realizado algunos estudios con resultados interesantes entre los que es importante destacar los llevados a cabo en el operador de transporte público sueco [18]. En él, un sistema capaz de monitorizar y proporcionar *feedback* se implantó en diversos autobuses articulados para evaluar la eficiencia en su conducción. 54 conductores participaron en un estudio, cuyo periodo máximo de duración (diferente por conductor) fue de 21 días. El sistema se acompañó para parte de los conductores con formación específica. Los resultados arrojaron una mejora en la eficiencia de alrededor del 7%, no encontrándose diferencias entre los conductores que recibieron la formación y los que no la recibieron. Otro estudio interesante [19] es el desarrollado en la ciudad de Calgary donde se combinó la formación con la monitorizaron de 15 vehículos durante el mes siguiente. En él, se consiguieron unas reducciones de entre el 4 y el 10% de consumo, lo que se tradujo en una bajada de las emisiones de 1,7Kg de CO₂ por vehículo y día. Sin embargo, el estudio más importante hasta la fecha es el que se realizó en la ciudad finlandesa de Tampere [20] donde se monitorizaron 12 autobuses urbanos en este caso a lo largo de 19 meses. En él, se estudió la evolución del consumo a larga distancia llegando a la conclusión que para mantener la reducción de consumo más allá de los primeros meses es necesario incentivar a los conductores. En ese sentido el autor resalta la necesidad de separar los resultados teniendo en cuenta horarios, tipos de rutas, etc. a la hora de comparar esos resultados que sirvan de base a los sistemas de reconocimiento y recompensa. En el lado negativo se

cuenta que el estudio no pudo extenderse a más vehículos por la dificultad de identificar a los conductores de los autobuses.

En este artículo se presenta un sistema capaz de monitorizar un vehículo con dos propósitos. El primero asistir al conductor mediante la emisión de recomendaciones y alarmas relacionadas con la eficiencia, y el segundo transmitir la información recogida para su estudio posterior por parte de un experto que utilice dichos datos para el desarrollo de un proceso formativo específico. Esta combinación de acciones es una novedad sobre otros sistemas que, o bien se centran en la recomendación a bordo, o bien en la recogida de datos para la generación de informes. Otra importante novedad es que el sistema ha sido diseñado para ser instalado y, tras un proceso de calibración, ser capaz de funcionar automáticamente de forma indefinida en el vehículo, siendo capaz de recoger los datos del vehículo, procesarlos y combinarlos con los turnos de los conductores. Además, otro hito importante es la duración del estudio que ha alcanzado los dos años y medio, y es con diferencia, el más largo de los publicados hasta el momento.

Los resultados del estudio que se ha realizado sobre la Empresa de *Transportes Urbanos de Gijón* desde finales del año 2012 indican que es posible conseguir una reducción del consumo que permanezca en el tiempo siempre que se mantenga el interés y la concienciación en los conductores. A lo largo del proyecto se ha visto que durante los periodos en los que los conductores recibían atención por parte de formadores e informes de progreso su eficiencia en la conducción mejoraba de forma considerable alcanzando valores del 7%. La eliminación de estos dos elementos produce una clara pérdida de eficacia del sistema.

2. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un sistema destinado a la conducción eficiente, aplicado a una flota de autobuses urbanos, con el objetivo principal de reducir el consumo de combustible (gasóleo de automoción). Los objetivos científico-tecnológicos específicos perseguidos han sido:

- Diseñar e implementar un sistema capaz de recuperar información del vehículo para evaluar la eficiencia en la conducción de vehículos de transporte urbano de pasajeros. Además el sistema dispondrá de un interfaz en cabina para asistir a los conductores a bordo mediante la generación de alarmas y recomendaciones.
- Seleccionar los parámetros o variables, así como sus valores característicos (umbrales), que permiten identificar la operación de los vehículos y realizar un análisis de sensibilidad para definir de forma objetiva las estrategias de conducción eficiente.
- Poner en marcha el sistema en una flota de vehículos para evaluar la eficiencia en la conducción a larga distancia utilizando un método que combine, asistencia a bordo, formación presencial y revisión periódica de la evolución mediante informes de desempeño.

El proyecto tuvo una duración de dos años y medio y se estructuró en las siguientes fases:

- **Desarrollo de sistema embarcado (*hardware+software*) y calibración:** desde abril a junio de 2012. En esta fase

se diseña e implementa tanto el sistema embarcado en el vehículo como el sistema central que se encarga de recibir y procesar la información para la generación de informes y análisis por parte de los formadores. También se desarrolla en esta fase el estudio detallado (caracterización dinámica) de los vehículos en las condiciones de circulación real y se extrae información sobre las variables a monitorizar y su influencia en el consumo. Con los resultados se caracterizan (calibración/personalización) los parámetros con mayor influencia en el consumo y los valores que identifican las condiciones de operación (verde/ámbar/rojo) en función de su influencia en el consumo de combustible, que serán configurados en el sistema embarcado.

- **Instalación y caja negra:** durante los 3 últimos meses de 2012 se instalaron dispositivos embarcados (trabajando en modo *datalogger*) para el registro de información en los autobuses. El objetivo de esta fase fue el de definir la línea base que permitiera conocer el punto de partida respecto a la eficiencia y comparar la evolución una vez realizadas las formaciones y activada la asistencia a bordo.
- **Modo asistente:** a principios de 2013 tuvo lugar el comienzo de la fase de asistencia. Dicha fase se estructuró en tres periodos. En el primero de ellos (enero 2013 – junio 2013), se realizaron diversas acciones formativas impartidas por personal cualificado en conducción eficiente, así como la habilitación del asistente a la conducción. Las acciones formativas se organizaron de la siguiente forma:
 - Formación inicial: se caracterizó por ser teórica y práctica. En el plano teórico se describieron las diferentes acciones que se pueden realizar para mejorar la eficiencia en la conducción. En el plano práctico se realizaron trayectos con y sin aplicar las recomendaciones del formador. Asimismo, se analizó con los conductores el funcionamiento del asistente a bordo y se vio en funcionamiento durante un trayecto.
 - Workshops de refuerzo: periódicamente durante 2013, se programaron sesiones de formación de refuerzo, orientadas fundamentalmente a superar los puntos débiles detectados a partir de los datos recogidos por el sistema.

dos por el sistema. Se hizo especial énfasis en aquellos conductores con poca mejora sobre su línea base.

Además a lo largo de este periodo se procedió con el envío de informes de desempeño de forma mensual a los trabajadores para que fueran conscientes de su evolución.

En el segundo periodo (julio 2013 – febrero 2014) dentro de esta fase la asistencia el *feedback* a los conductores se limitó a los informes y las recomendaciones a bordo, eliminando la formación presencial que se había llevado a cabo durante el año 2013.

En el tercer y último periodo (marzo 2014 – febrero de 2015) el *feedback* a los conductores se limitó a la asistencia a bordo.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema embarcado de apoyo a la conducción se basa en la captación de datos de la flota de autobuses a gestionar, la indicación de sugerencias de tutorización en tiempo real (*on-line*) al operador del vehículo y la transmisión de información a un sistema central para el tratamiento *off-line* de la información disponible.

El sistema se compone de diversos módulos que se encargan de la recogida de la información, la presentación al usuario/conductor de recomendaciones y alarmas, la transmisión a un sistema central y el tratamiento posterior para poder visualizar una serie de informes. La Figura 1 muestra los elementos principales del sistema.

El **módulo de adquisición** es un dispositivo conectado al *BusCAN* del vehículo con objeto de leer la información que por el mismo transmite la Unidad de Control de Motor. Mediante la decodificación del protocolo *FMS* (protocolo SAE-J1939) se extraerá una trama de datos que será enviada al procesador para su tratamiento. A dicha información se le añadirá las coordenadas procedentes del sistema de localización GPS de forma que cada traza de información recuperada del vehículo esté acompañada de su ubicación. El sistema de adquisición producirá una traza cada 300 milisegundos. Para racionalizar el número de muestras el procesador calculará la media de los valores recuperados cada 1,5 segundos y los transmitirá a través del módulo 3 G al sistema central o los almacenará a la espera de poder transmitirlos. Además los datos calculados se utilizarán para la asistencia del conductor en tiempo real.

Con objeto de determinar cómo asistir al conductor a bordo se realizó un proceso de análisis experimental que permitiera la caracterización de los vehículos de estudio y las líneas de aplicación. El desarrollo detallado puede verse en el ANEXO I. Los resultados determinaron un grupo de cuatro variables como las más representativas para la asistencia al operador del vehículo. Estas variables son la aceleración longitudinal

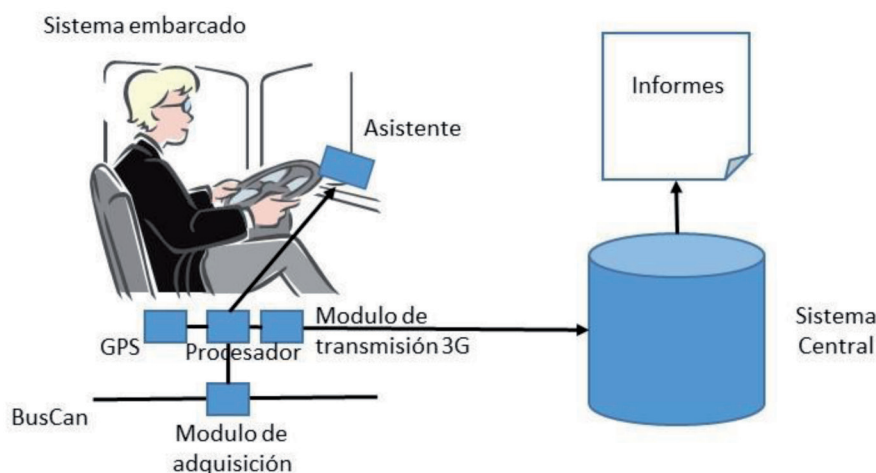


Figura 1: Estructura modular del sistema

(positiva en caso de tracción y negativa en caso de frenada), la velocidad de circulación y el tiempo en ralentí. Cada una de ellas lleva asociados unos valores umbral relacionados con el consumo en función de parámetros de operación de cada vehículo. El proceso de análisis y post-procesado de la información permitió obtener datos para realizar la calibración del sistema embarcado de cada vehículo por cada una de las líneas por las que puede transitar. Este proceso de calibración consiste, esencialmente, en la particularización de los valores umbral, que definen los estados (verde, ámbar o rojo) en los que se encuentran las variables tomadas como características.

Es importante destacar que los vehículos analizados están equipados con cambio automático y control automático del *retarder* o sistema de freno continuo sobre la transmisión (eléctrico o hidráulico). La selección de la marcha a engranar la realiza de forma automática el vehículo en función de la estrategia o estrategias de cambio definidas por el fabricante. Lo habitual es la utilización de dos estrategias de cambio, una de economía de combustible y otra de aceleración máxima. La elección de una u otra es función de la demanda de par del conductor, posición del pedal de acelerador, velocidad, etc.

En el caso de los vehículos de transporte urbano de personas la variación de carga es continua, las paradas y arranques son constantes y, en muchos casos, en pendientes importantes. Por tanto, debido al tipo de vehículos y a las condiciones particulares de este tipo de transporte, las metodologías tradicionales de ahorro de combustible, aplicadas a turismos o vehículos de cambio manual, no son aplicables. No se puede establecer una estrategia basada en la posición del acelerador o velocidad de accionamiento puesto que, en función de las condiciones de arranque (por ejemplo en carga y con rampa), la demanda puede ser alta. Si se limita la aceleración sería muy baja y eso iría en contra de los tiempos de circulación entre paradas. Es por ello que, teniendo en cuenta todas las variables que condicionan este tipo de transporte y, a partir del análisis experimental,

se decide la utilización de la aceleración como variable objetiva que defina la estrategia de aviso al conductor.

Teniendo en cuenta los resultados del estudio experimental, el programa de asistencia a bordo se diseñó para informar al conductor a través de las 4 variables determinadas: la aceleración, la velocidad, la frenada y el ralentí. En la Figura 2 se muestra el interfaz del asistente. Estas alarmas se calcularán utilizando los datos recogidos por el procesador mostrando 3 estados para cada una de ellas, verde, ámbar y rojo.

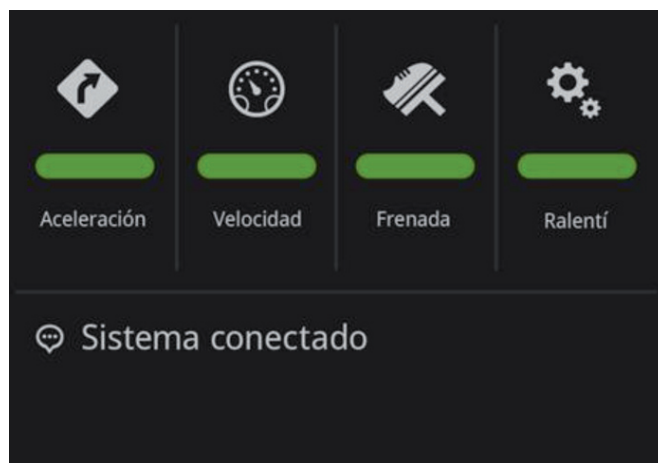


Figura 2: Interfaz del asistente a bordo

El **sistema central** es el encargado de recibir la información de los dispositivos embarcados y procesarla con objeto de generar diferentes tipos de informes tanto Web como descargables en formato PDF. Estos, permiten tanto a conductores como a los responsables de la flota analizar la eficiencia alcanzada a lo largo de los trayectos realizados por vehículos y conductores. Los informes incluirán información resumen

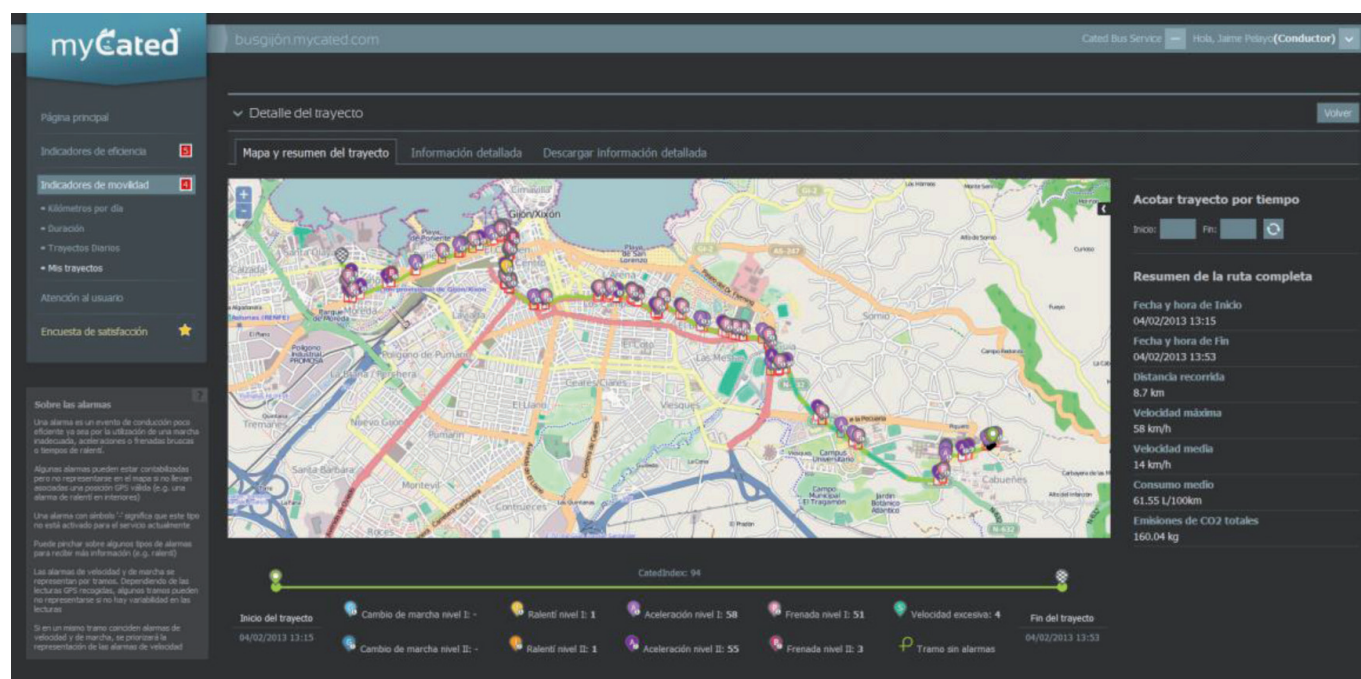


Figura 3: Informe de movilidad correspondiente a un trayecto de una línea objeto de estudio

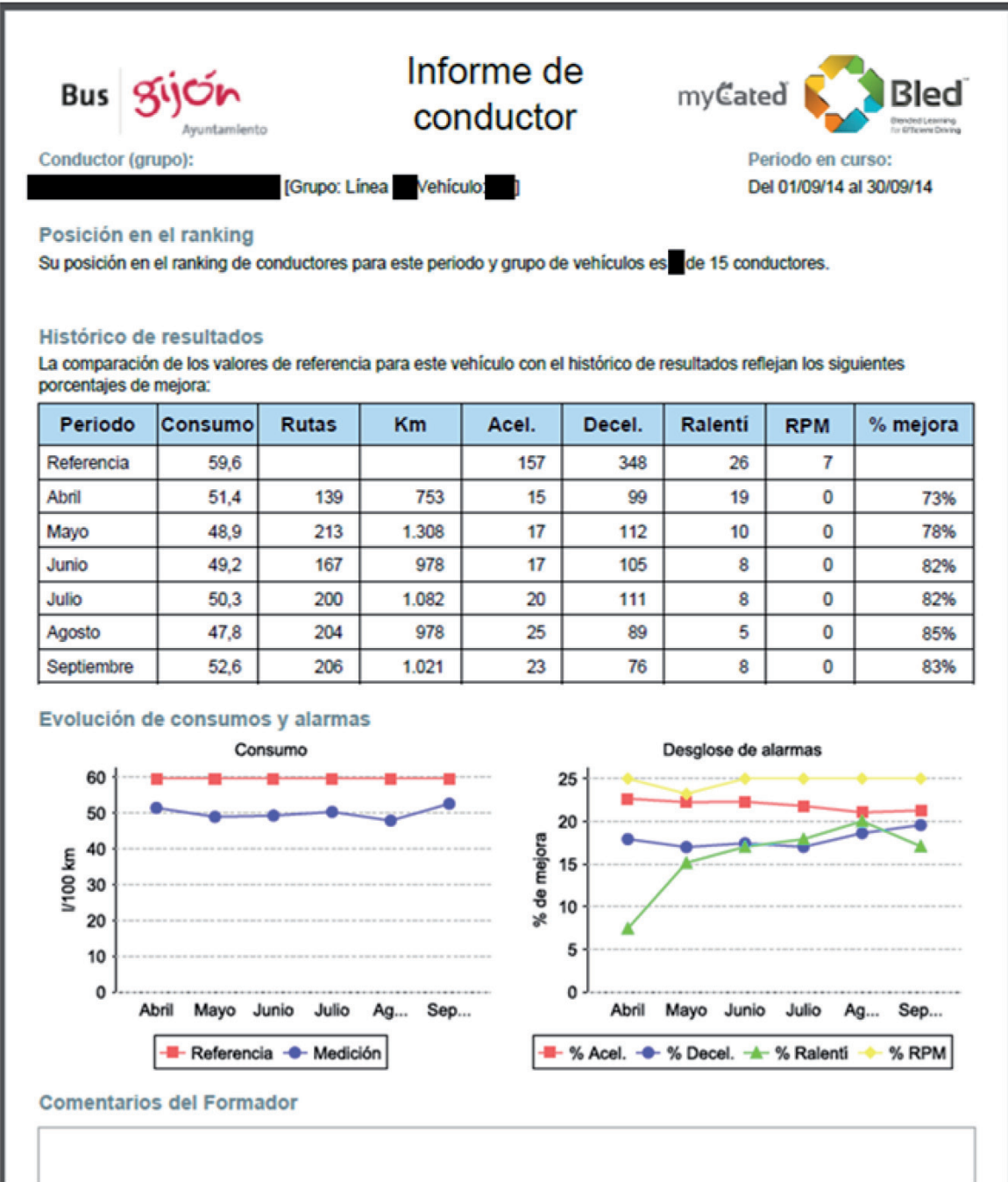


Figura 4: Formato informe conductor

Ruta	Distancia(O-D, D-O)	Duración Media	Velocidad Media	Tipo
Línea 1	10,3-10,3 Km	38,6 min	15,98 Km/h	Urbano
Línea 18	10,4-9,2 Km	35,67 min	16,48 Km/h	Urbano
Línea 12	10,7-12 Km	34,67 min	12,59 Km/h	Urbano
Línea 15	10,9-12,4 Km	31,26 min	18,51 Km/h	Urbano

Tabla 1: Detalles de las rutas de los autobuses

de los diferentes trayectos y fechas y también permitirán estudiar un trayecto al detalle mediante su representación sobre un mapa. En la Figura 3 se muestra un trayecto de ejemplo donde se representan las diferentes alarmas que el asistente ha ido

mostrando al conductor.

En la Figura 4 se muestra uno de los informes que es posible descargar vía PDF para entregar a los conductores con objeto de facilitar la interacción del sistema con el trabajador.

4. CASO DE ESTUDIO: EMPRESA DE TRANSPORTES URBANOS DE GIJÓN

El sistema desarrollado se ha puesto en marcha en 20 autobuses de la Empresa de Transportes Urbanos de Gijón (EM-TUSA). Dicha compañía cuenta con 15 líneas urbanas y periurbanas en las que transporta más de 50.000 viajeros al año. Los vehículos seleccionados son autobuses especializados para el transporte urbano (5 MAN NL 273 F/NL, 5 SCANIA articulados N310UA6X2/2, 5 MAN Articulados NG 314 F/4 y 5 SCANIA N270UB4X2) de cambio automático y siguen la normativas europeas de emisiones EURO IV (SCANIA) y EURO V (MAN). En lo que se refiere a los conductores, en el proyecto han participado 76 de cuatro de las líneas de la compañía. La tabla 1 resume las principales características de las rutas que son la base del estudio.

A lo largo de los más de dos años y medio de desarrollo del proyecto se ha obtenido un importante volumen de datos que permiten obtener interesantes conclusiones sobre la evolución de la eficiencia. Sin embargo, es importante resaltar que el estudio se ha desarrollado sobre una flota de autobuses en funcionamiento real lo que ha impedido controlar muchas condiciones exógenas al estudio. Por ejemplo: el estado del tráfico o del clima han podido tener influencia en los resultados sin que se pueda determinar de forma precisa en qué medida. En todo caso, el interés del estudio es la propia utilización del sistema en un contexto totalmente real y profesional, lo que aporta resultados que, convenientemente tratados, pueden ser directamente usados para la mejora de la eficiencia de la flota más allá de referencias numéricas precisas típicas de los experimentos controlados.

Las Figuras 5a y 5b muestran la evolución del consumo medio mensual de cada grupo de vehículos desde el año 2012

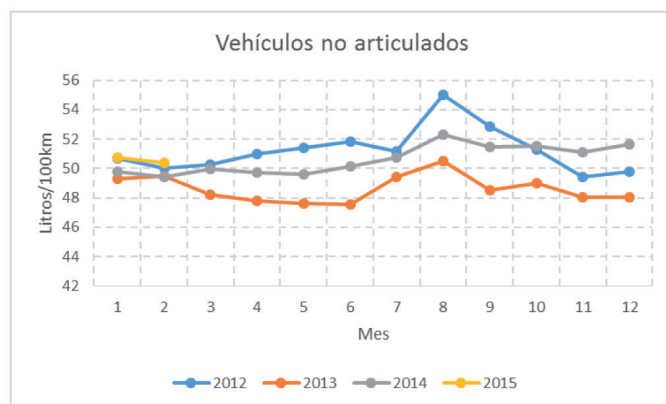
(antes del comienzo del proyecto). Las Figuras 5c y 5d muestran el detalle del consumo medio mensual para dos autobuses particulares, uno de cada tipo de los utilizados en el proyecto.

El análisis de los consumos presentados en las figuras refleja algunos hechos que es importante destacar:

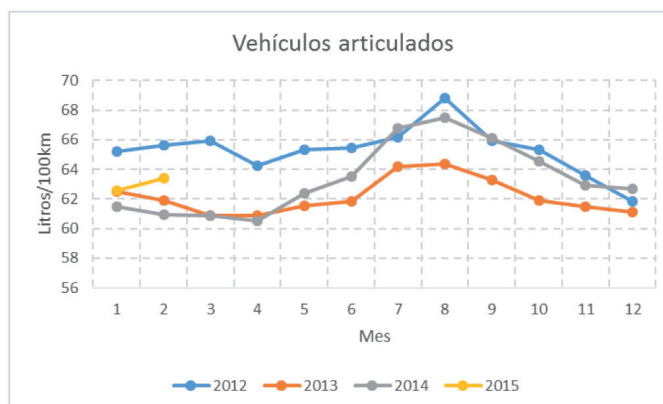
- El simple hecho de que los conductores sepan de la existencia del proyecto hace bajar el consumo por lo menos a corto plazo. De ahí que durante el periodo de caja negra, entre octubre de 2012 y enero de 2013, los consumos descendan.
- En los periodos de mayor calor (generalmente junio, julio y agosto) el uso del aire acondicionado hace subir el consumo.
- En los periodos de frío más intenso (generalmente enero y febrero) el uso de la calefacción hace subir el consumo.
- La eliminación de los informes de los conductores que se realiza a partir de febrero de 2014 genera un repunte del consumo.

5. CONCLUSIONES

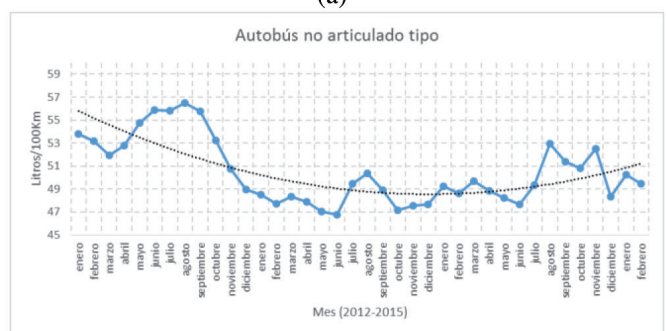
Este artículo presenta el proceso de implantación de un sistema para la mejora de la eficiencia en la conducción sobre una flota real de vehículos de transporte urbano. Durante más de dos años y medio se han recogido datos sobre diferentes parámetros de eficiencia y consumo. Los resultados indican que la puesta en marcha de un sistema de este tipo y su combinación con técnicas formativas, permite que las compañías de transporte mejoren su eficiencia energética siempre que se consiga mantener el compromiso de los conductores. Se ha



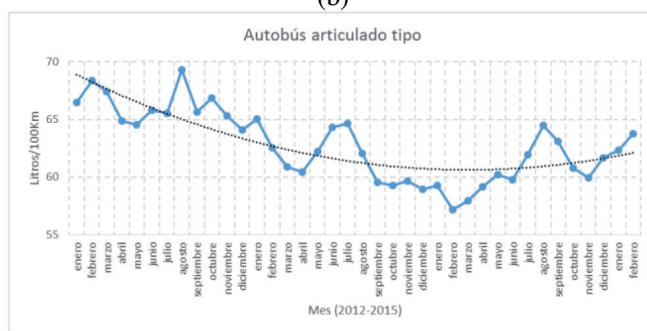
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5: Evolución mensual del consumo medio: (a) autobuses no articulados, (b) autobuses articulados, (c) autobús no articulado tipo, (d) autobús articulado tipo

observado cómo estas acciones hacen posible conseguir ahorros que rondan el 7% del consumo. Sin embargo, la eliminación de las acciones formativas y los informes de progreso, hacen que el interés en los conductores decaiga en términos medios y se vuelva a las antiguas formas de conducir mucho menos eficientes. Solo algunos conductores retienen las nuevas habilidades y consiguen mantener un buen rendimiento.

En lo que se refiere a los trabajos futuros, son muchos los puntos de interés que quedan abiertos después de este proyecto. A la vista de las conclusiones, el más importante de ellos puede ser como conseguir que la motivación se mantenga en todos los casos en el largo plazo. La definición de planes de incentivación o la definición de procesos de mejora continua de bajo costo son temas que deberían investigarse para conseguir efectos duraderos más allá de los conseguidos a media distancia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la compañía de autobuses de Gijón (EMTUSA, S.A) por el apoyo para la realización y publicación de resultados de este proyecto.

ANEXO I - DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA CONDUCCIÓN EFICIENTE EN AUTOBUSES URBANOS

Un aspecto importante para que el sistema desarrollado sea efectivo es la adaptación a las condiciones reales de funcionamiento, y la de cada vehículo en particular, especialmente importante cuando la flota a la que está destinado el producto no es homogénea. Esta no homogeneidad puede deberse a la variación de los vehículos en relación a sus características técnicas como tipo de motopropulsor, características de su cadena cinemática, estado de mantenimiento y conservación...

Es por ello que para “personalizar” la aplicación deberán definirse tanto los parámetros a monitorizar relacionados con las condiciones operativas (velocidad, aceleraciones, actuación sobre los mandos, tiempos de ralentí...) como los valores que permitan identificar la “eficiencia de la conducción”.

La conducción eficiente se basa en un uso adecuado del sistema motopropulsor del vehículo. Para ello un aspecto fundamental es identificar aquellas situaciones en las que, por ejemplo, el consumo de combustible se incrementa. En este tipo de vehículos la conducción a un elevado rango de revoluciones (rpm), así como la rápida sucesión de maniobras de aceleración (incremento de la velocidad de circulación) y frenada (disminución de la velocidad, llegando hasta la detención total o no del vehículo) produce un incremento del consumo de combustible.

En general, las directrices aceptadas como la base de la conducción eficiente se basan en reglas generales (anticiparse al flujo del tráfico, mantener la velocidad constante a un régimen (rpm) bajo, cambiar de marcha pronto,...). Aun cuando esas afirmaciones son aceptables en un caso general, para cada vehículo deben particularizarse y definir unos valores identificativos, que indiquen, de forma objetiva si la conducción realizada es eficiente o no. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante recordar que el objetivo fundamental del diseño

del sistema es optimizar el consumo de combustible en las condiciones operativas reales de la flota. Algunos manuales o páginas web indican algunas ideas tales como conducir en la marcha más larga posible, pisar el pedal del acelerador más de $\frac{3}{4}$ de su posición máxima, y no superar de forma general el 50% [21], o utilizar el freno motor para las deceleraciones, salvo que en el caso de frenadas de emergencia.

Con este tipo de consignas, un estudio reciente [22] indica que un conductor no profesional puede mejorar su consumo en un vehículo turismo hasta en un 17%. En la bibliografía existen algunas normas más detalladas, como las propuestas [23] en Japón por la *Association for Promotion of Eco-Drive*, para evaluar la conducción, que son:

- Arranques en los que se ha acelerado alcanzando velocidades superiores a 20 km/h en cinco segundos.
- Tiempo acumulado con cambio de velocidad superior a 20 km/h en cinco segundos
- Tiempo acumulado con el vehículo detenido y el motor arrancado
- Aceleraciones superiores a 2 g's tanto longitudinales como transversales (evaluación de la seguridad en circulación)

En el caso de una flota de vehículos tipo autobús urbano, operados por conductores profesionales, es necesaria la definición más precisa de los parámetros a controlar, para optimizar el consumo. Los niveles de consumo de combustible [24] suelen depender de una relación entre el consumo instantáneo y otras variables medidas de forma instantánea, tales como la potencia, esfuerzo tractor, aceleración, velocidad, inclinación de la carretera (rampa/pendiente)...

Aun cuando una modelización completa del consumo de combustible implicaría una gran cantidad de factores (tipo de motor, antigüedad, propiedades del combustible, perfil topográfico de la carretera, resistencias pasivas del vehículo, tecnología de combustión, diseño de las cabezas de los cilindros, fricciones internas, temperatura, nivel de humedad...) lo más habitual es trabajar con modelos simplificados, que suponen un compromiso entre precisión y facilidad de aplicación. De forma adicional cualquier modelo exige una calibración de aquellos parámetros propios de cada vehículo que permiten caracterizar adecuadamente el comportamiento analizado.

En la bibliografía se han desarrollado numerosos modelos de consumo de combustible que satisfacen estos requisitos. Muchas modelizaciones asumen que el consumo de combustible es proporcional a la potencia consumida, que puede ser calculada por medio de las fuerzas actuantes sobre el vehículo [25, 26, 27]. Existen otro tipo de modelos que utilizan otras relaciones del tipo regresiones polinomiales de los niveles de aceleración u otras variables, como el par motor. El problema es que la mayoría de las modelizaciones existentes se han desarrollado para vehículos tipo turismo, con características mecánicas y termodinámicas muy diferentes a los vehículos de la flota objeto de trabajo.

Para la realización de este trabajo se ha revisado la bibliografía y el estado del arte disponible, constatando la poca información existente en lo relativo a flotas de autobuses urbanos. En este campo es de destacar el trabajo realizado por Duarte [28] en relación con una experiencia relacionada con conductores de autobuses en Lisboa (Portugal). En este caso

se indica que los vehículos se instrumentan, captando información de la velocidad del vehículo, aceleración, régimen del motor, apertura de las puertas o la posición neutra (punto muerto) de la transmisión. Con eso se indica al conductor las situaciones en las que se supera un determinado umbral, fijado tanto por criterios de consumo como de seguridad (aceleraciones excesivas).

Para realizar la implementación del sistema y su calibración se ha realizado un amplio programa experimental donde se ha recogido información tanto proveniente de los sensores y captadores instalados en los vehículos como otros externos. A los sensores del propio autobús se ha accedido mediante Sistema de Gestión de Flotas integrado de serie. El Sistema de Gestión de Flotas (o *FMS*, por sus iniciales en inglés, *Fleet Management System*) es una interfaz estándar para los datos del vehículo de los vehículos industriales. Los datos son codificados según SAE J1939. La tasa de repetición de los datos se realiza entre 20 ms (por ejemplo, la velocidad del motor) y 10 segundos (por ejemplo, número de identificación del vehículo). Teniendo en consideración que la flota de autobuses a controlar es relativamente reciente, los datos disponibles aportan una gran cantidad de información.

En esta fase inicial de caracterización de cada vehículo se han recopilado gran cantidad de datos del vehículo correspondientes a la actuación sobre mandos (acelerador, frenos...), o propios de la cinemática o dinámica del vehículo (carga del motor, par motor, marcha seleccionada, aceleraciones), así como del consumo, tanto instantáneo como acumulado y promedio. Estas señales han sido complementadas con la información proveniente de otros sensores adicionales montados en los vehículos ensayados:

- Acelerómetros uniaxiales y triaxiales
- GPS diferencial de alta frecuencia, con corrección RTK para precisión centimétrica
- Cámara de video para monitorizar las acciones del conductor

Toda la captación de datos se ha realizado en un registrador marca Dewetron, modelo DEWE3021, como se muestra en las Figuras A1 y A2.

Para la caracterización mecánica y termodinámica de cada vehículo, se ha propuesto una metodología de ensayo que incluye la realización de los siguientes ensayos:

- Evaluación de consumo por arranque (en frío y en caliente)
- Evaluación del consumo vehículo detenido y la influencia del uso de equipos auxiliares (calefacción, aire acondicionado,...), con motor al ralentí.
- Evaluación del consumo en maniobras de aceleración a diferentes rangos de solicitud
- Evaluación del consumo en maniobras de frenada a diferentes rangos de solicitud
- Evaluación del consumo en líneas, circulación en tráfico abierto. Ambos sentidos de circulación

Para la calibración del sistema se tendrá en cuenta el funcionamiento del sistema completo de propulsión. En función del propulsor (motor) de cada vehículo, deberá definirse unos umbrales de funcionamiento que permitan optimizar el funcionamiento, en función de los objetivos planteados en el sistema a desarrollar (minimizar consumo de combustible, emisiones, tiempos de recorrido). Inicialmente deberán analizarse las curvas características de cada propulsor y definirse los diferentes niveles. En función de los ensayos realizados, se ha caracterizado el consumo y se ha realizado un análisis de sensibilidad. Se ha establecido la sensibilidad de la función consumo frente a tres situaciones básicas de conducción:

- Tracción (incremento de velocidad de circulación): implica tanto las salidas con el vehículo detenido, como el incremento de velocidad en cualquier punto de la línea, implicando o no un cambio de relación (marcha) de la cadena cinemática.
- Deceleración (disminución de la velocidad): caracteriza la reducción de velocidad, llegando o no hasta la detención total del vehículo.
- Vehículo detenido, con el motor arrancado, en régimen de ralentí, pudiendo utilizar o no elementos auxiliares como sistema de calefacción o acondicionamiento del aire del habitáculo de pasajeros.



Figura A1: Sensores instalados y equipos de adquisición de datos en las fases iniciales de caracterización



Figura A2: Captura de pantalla del sistema de adquisición de datos en los ensayos de calibración

Tras la realización del programa experimental indicado anteriormente, se ha constatado que, en el grupo de vehículos analizados, el consumo instantáneo (C) de combustible se puede caracterizar en función de un grupo de variables medibles, con la instrumentación y la información disponible. En el caso de “aceleración”, el consumo depende inicialmente de la demanda de par motor (M_m) solicitada.

A la hora de implementar en la aplicación embarcada resulta más operativo trabajar con la variable cinemática externa, que identifica la respuesta dinámica del vehículo y sus sollicitaciones. Se puede extraer fácilmente la relación entre el par motor (M_m) y la aceleración longitudinal (a_x) para cada una de las relaciones de la cadena cinemática. Esto permite definir unos rangos de los valores de aceleración longitudinal en re-

lación con los mencionados niveles de trabajo del propulsor, para el caso de tracción, en función de la marcha seleccionada y la velocidad de avance, como se presenta en la figura A3.

En el caso de deceleración, tras la realización del análisis de los datos del programa experimental y combinando criterios de consumo y seguridad, se han establecido unos criterios basados en la caracterización de la aceleración longitudinal del vehículo (a_x).

Para la evaluación del funcionamiento del motor en detenciones, se ha considerado el tiempo como la principal variable a controlar, ya que el resto de parámetros son difícilmente modificables por el operador del vehículo (conductor) manteniendo los estándares operativos y de confort marcados por el gestor de la flota (Por ejemplo: Es evidente que la no

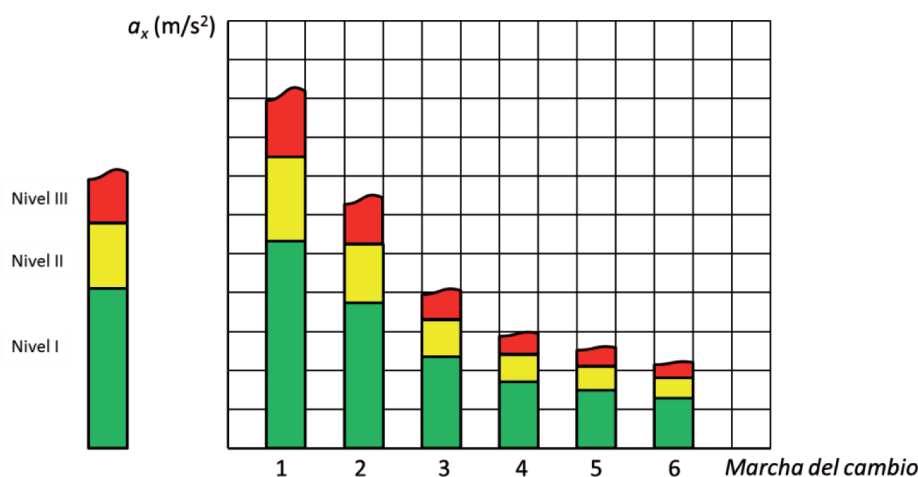


Figura A3: Ejemplo de umbrales de aceleración para un vehículo de 6 marchas

utilización del aire acondicionado reduce el consumo de combustible pero rebaja el nivel de confort de los viajeros).

Con las premisas indicadas anteriormente se ha caracterizado el consumo, en cada uno de los escenarios operativos definidos, como función de las siguientes variables

$$C = \begin{cases} f_1(M_m, N) \sim f'_1(M_m, N) & \text{Tracción} \\ f_2(a_x) & \text{Deceleración} \\ f_3(t) & \text{Ralentí} \end{cases} \quad (1)$$

Tras el análisis de los datos provenientes de los ensayos realizados en las unidades instrumentadas se proponen los s valores de aceleración que se muestran en la Tabla A1, que identifican las franjas predeterminadas de conducción.

Igualmente, la Tabla A2 muestra los valores umbral de aceleración (unidades de g) en frenado, teniendo en cuenta, que con el sistema de referencia tomado, la aceleración longi-

tudinal se considera negativa en el sentido contrario al avance.

El tiempo máximo de ralentí (t_{mr}), se caracteriza en segundos, e identifica el tiempo a partir del cual interesa que el vehículo detenga su funcionamiento. Estos valores son particularizados para cada uno de los vehículos de la flota de vehículos en la que se implantará el sistema desarrollado, mediante una información gráfica cromática, en función de las tablas anteriores.

	Aceleración (g)
Nivel 1	$a_{f,I} < a_x \leq 0$
Nivel 2	$a_{f,II} < a_x \leq a_{f,I}$
Nivel 3	$a_x \leq a_{f,II}$

Tabla A2: Valores umbral de aceleración (unidades de g) en frenado

	Marchas del cambio					
	1	2	3	4	5	6
Nivel I	$0 \leq a_x < a_{1,I}$	$0 \leq a_x < a_{2,I}$	$0 \leq a_x < a_{3,I}$	$0 \leq a_x < a_{4,I}$	$0 \leq a_x < a_{5,I}$	$0 \leq a_x < a_{6,I}$
Nivel II	$a_{1,I} \leq a_x < a_{1,II}$	$a_{2,I} \leq a_x < a_{2,II}$	$a_{3,I} \leq a_x < a_{3,II}$	$a_{4,I} \leq a_x < a_{4,II}$	$a_{5,I} \leq a_x < a_{5,II}$	$a_{6,I} \leq a_x < a_{6,II}$
Nivel III	$a_{1,II} \leq a_x$	$a_{1,II} \leq a_x$	$a_{3,II} \leq a_x$	$a_{4,II} \leq a_x$	$a_{5,II} \leq a_x$	$a_{6,II} \leq a_x$

Tabla A1: Valores umbral de aceleración (unidades de g) en tracción

BIBLIOGRAFÍA

[1] <http://www.ecodrive.org/> [noviembre 2014]

[2] www.spritspar.at [noviembre 2014]

[3] www.eco-drive.ch [noviembre 2014]

[4] www.neues-fahren.de [noviembre 2014]

[5] www.hetnieuwerijden.nl [noviembre 2014]

[6] www.ecodriving.com [noviembre 2014]

[7] <http://greenroad.com/uk/> [noviembre 2014]

[8] <http://www.nextraq.com/> [noviembre 2014]

[9] <http://www.teletrac.com/fleet-management/fuel-efficiency> [noviembre 2014]

[10] <http://www.volvotrucks.com/trucks/uk-market/en-gb/aboutus/every-drop-counts/Pages/dynafleet.aspx> [noviembre 2014]

[11] <http://www.trinitymobility.com/trinity-telematics.html> [noviembre 2014]

[12] <http://www.fleetmatics.com/how-it-helps/reduce-fuel-costs-with-fleet-tracking/1148> [noviembre 2014]

[13] <http://www.mixtelematics.es/soluciones/gestion-de-flotas> [noviembre 2014]

[14] <http://xrscorp.com/fleet-performance/> [noviembre 2014]

[15] <http://www.fleetnews.co.uk/news/2013/4/5/fuelgood-app-uses-smartphone-gps-to-monitor-fuel-efficiency/46682/> [noviembre 2014]

[16] <http://fueleconomycoach.com/> [noviembre 2014]

[17] <http://www.smartdrive.net/smartdrivefuel.aspx> [noviembre 2014]

[18] H. K. Strömberg, I.C. MariAnne Karlsson, "Comparative effects of eco-driving initiatives aimed at urban bus drivers – Results from a field trial". Transportation Research Part D, vol. 22, pp. 28-33, Julio, 2013.

[19] M. Rutty et al." Eco-driver training within the City of Calgary's municipal fleet: Monitoring the impact". Transportation Research Part D, 24, pp. 44-51, Octubre, 2013.

[20] H. Liimatainen. "Utilization of Fuel Consumption Data in an

Ecodriving Incentive System for Heavy-Duty Vehicle Drivers". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 12, is. 4, pp. 1087-1095, Noviembre, 2011.

[21] Van der Voort, M., Dougherty, M.S., Van Maarseveen, M. (2001) 'A prototype fuel-efficiency support tool', *Transportation Research Part C*. Vol.9 p.279-296. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00038-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00038-3)

[22] McKinsey & Company (2009) 'Roads Towards a Low-Carbon Future: Reducing CO2 Emissions from Passenger Vehicles in the Global Road Transportation System'. McKinsey & Company, New York.

[23] Ando, R., Nishihori Y. (2012) 'A study on factors affecting the effective eco-driving', 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation EWGT 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.722>

[24] Rakha, H.A., Ahn, K., Moran, K., Saerens, B., Van den Bulck, E. (2011) 'Virginia Tech comprehensive power-based fuel consumption model: model development and testing'. *Transport. Res. Transport. Environ.* Vol.16 p.492-503. DOI: 10.1016/j.trd.2011.05.008

[25] Wong, J.Y. (2008) 'Theory of Ground Vehicles'. John Wiley & Sons, Inc, Chichester. 592p. ISBN: 978-0-470-17038-0

[26] Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., Van Aerde, M. (2002) 'Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels', *Journal of Transportation Engineering-Asce*. Vol.128 p.182-190. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182)

[27] Edgar, J. (2008) 'Brake Specific Fuel Consumption', *Autospeed*, issue 475. Available at: http://autospeed.com/cms/A_110216/article.html

[28] Duarte,G.O., Gonçalves, G.A., Farias T.L. (2013) 'Vehicle monitoring for driver training in bus companies – Application in two case studies in Portugal', *Transportation Research Part D*. Vol.18 p.103-109. DOI: 10.1016/j.trd.2012.10.001.