

## Control de Velocidad basado en Lógica Borrosa para Entornos Urbanos Congestionados

V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez, T. de Pedro y C. González

*Instituto de Automática Industrial (CSIC)  
Carretera de Campo Real km 0,200, Arganda del Rey, 28500, Madrid, España,  
e-mail: {vmilanes, onieva, jperez, tere, gonzalez}@iai.csic.es*

**Resumen:** Los sistemas de control de crucero adaptativo permiten, adecuando la velocidad, realizar el seguimiento del vehículo precedente en autopistas mientras este vehículo no se detenga. Sin embargo, en áreas urbanas donde la congestión del tráfico obliga a continuas detenciones, este sistema pierde funcionalidad ya que, una vez detenido el vehículo, el conductor debe reactivar el sistema. En este artículo, se presenta un sistema de control de velocidad mediante lógica borrosa para situaciones continuadas de parada y arranque, en las que la velocidad del vehículo es inferior a diez kilómetros por hora. El sistema se ha implantado y probado en un vehículo comercial con excelentes resultados. Copyright © 2009 CEA.

**Palabras Clave:** vehículos autónomos, comunicaciones vehículo-vehículo, control de velocidad, control borroso, sistemas de posicionamiento global.

### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo marcado por la Unión Europea de reducir a la mitad el número de siniestros para 2010 (Libro Blanco, 2001) es un proyecto ambicioso en el que se ha embarcado la Comisión de Transportes. La fijación de este objetivo ha influido en las empresas dedicadas al sector de la automoción que han entrado con gran fuerza en el desarrollo de sistemas de ayuda a la conducción (ADAS, del inglés Advanced Driver Assistance Systems) (Brookhuis et al., 2001; Blythe and Curtis, 2004). Estos sistemas, referidos también como eSafety, constituyen una ayuda al conductor en forma de alerta o aviso para prevenir accidentes. En los últimos años, además, se les ha dotado asistencia activa, esto es, los sistemas ADAS tienen la posibilidad de intervenir para evitar un posible accidente o, al menos, reducir sus consecuencias.

Un sistema pionero de intervención activa fue el control de crucero (CC, del inglés Cruise Control) (Müller and Nucker, 1992) que permite al conductor fijar una velocidad de marcha y mantenerla sin su intervención actuando únicamente sobre el acelerador. El sistema se desactiva si el conductor pisa el freno y puede recuperar automáticamente la velocidad preseleccionada. Una evolución de este sistema es el denominado control de crucero adaptativo (ACC, del inglés Adaptive Cruise Control) (Pauwelussen and Minderhoud, 2008) en el cual el vehículo detecta la distancia al coche que circula delante y mantiene una distancia de seguridad hasta que el coche desaparezca, momento en el que acelera hasta retomar la velocidad prefijada.

Recientemente algunas empresas han desarrollado sistemas que permiten realizar esta función. Por ejemplo TRW Automotive, en colaboración con el grupo VW, ha anunciado este año un dispositivo basado en el primer radar de largo alcance de circuito integrado monolítico de microondas (MMIC) que ofrece información a una distancia de más de 150 metros y en todo tipo de condiciones meteorológicas y estados de la calzada. Volvo, ha presentado en abril las versiones renovadas de sus modelos V70 y XC70 que incluyen un sistema de control de crucero adaptativo con autofrenado de emergencia. Igualmente, BMW

ha implementado un sistema que permite fijar un tiempo de seguridad en función de la distancia al vehículo precedente y la velocidad actual y ajusta su velocidad en un rango entre 30 y 180 kilómetros por hora.

Todos estos sistemas se han desarrollado para funcionar en autopistas donde las curvas son suaves, permitiendo así el correcto funcionamiento del sistema radar de los vehículos. Además, no permiten acelerar el coche una vez detenido completamente, opción más que deseable en el caso de atascos o zonas de tráfico muy congestionadas.

Para superar estos inconvenientes se han hecho investigaciones que desarrollan diferentes sistemas de control de crucero adaptativo. Algunos de ellos se basan en visión; los hay que hacen uso de una única cámara, con el fin de extraer propiedades del tráfico, detectar obstáculos o estimar el tiempo para que se produzca una colisión (Graefe, 1993; De Micheli et al., 1993). Stein utiliza la visión para implementar un sistema de control de crucero (Stein et al., 2006). Sotelo hace uso de dos cámaras para un control de crucero adaptativo (Sotelo et al., 2004). También hay sistemas de control de la velocidad basados en radar o láser (Woll, 1997; Ioannou et al., 1993). Finalmente algunos sistemas usan la fusión de ambos sensores para llevar a cabo el control (Hofmann et al., 2003). Pero todos estos sistemas tienen el gran inconveniente de la falta de información proveniente de los vehículos de su entorno.

En los últimos años, la comunicación vehículo-vehículo (V2V) se ha convertido en uno de los objetivos prioritarios para los constructores. Según éstos, la comunicación entre coches podría reducir considerablemente el número de víctimas en la carretera. Situaciones como una colisión por alcance, un siniestro en un cruce, un impacto contra un vehículo detenido en el arcén o incluso una salida de la vía por mal estado del pavimento serían evitables con el uso de estas comunicaciones. La implantación de estos dispositivos, que tendría un coste asequible, tiene como fecha aproximada el año 2012 y combinarían sistemas de comunicaciones inalámbricas (WiFi) y de posicionamiento global por satélite (GNSS, del inglés Global Navigation Satellite

Systems).

El uso de sistemas GNSS, en particular, GPS (del inglés Global Positioning System) para determinar la posición de los vehículos (Urmson et al., 2006) constituye una excelente opción debido a las siguientes ventajas: funcionan en tiempo real y la señal no se degrada a lo largo del tiempo. Sin embargo tienen el inconveniente de que pueden producir errores de posicionamiento absoluto que oscilan en torno a los 20 metros. Para solucionar este problema, contamos con la posibilidad de corregir la señal con un sistema diferencial denominado DGPS (del inglés Differential Global Positioning System). En efecto, si las señales del GPS llegan a estaciones de referencia en tierra cuya posición es conocida, es posible calcular y transmitir las correcciones que hay que aplicar a los datos que llegan a los receptores GPS de los usuarios. De este modo se reduce a menos de un metro el error en la posición dentro de la zona cubierta por las emisoras, que puede alcanzar un área de algunos centenares de kilómetros.

En este artículo se presenta un sistema de comunicaciones entre vehículos V2V que también sirven para recibir la corrección diferencial del posicionamiento del vehículo. Además, se explica el diseño de un sistema de control borroso de la velocidad, ACC, en condiciones de tráfico denso. Todos estos sistemas se han implantado y probado en coches comerciales de Citroën para demostrar su funcionamiento.

En la segunda sección se explica la instrumentación del vehículo necesaria para el control automático, esto es, los dispositivos encargados de actuar sobre los pedales de acelerador y freno. La tercera sección explica el controlador borroso, donde se muestran tanto las variables de control seleccionadas y las reglas generadas con ellas. La cuarta sección se incluye los resultados experimentales obtenidos y, finalmente, se analizan las conclusiones del trabajo realizado y las líneas futuras de investigación.

## 2. EQUIPAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS

Los experimentos se han realizado con dos coches comerciales Citroën C3. Uno, un modelo Pluriel descapotable bautizado con el nombre de Clavileño, ha sido modificado para accionar el volante y los pedales desde el controlador y, a través de una cartografía digital predefinida (Serrano et al., 2005), es capaz de realizar un recorrido de forma automática; el otro, llamado Platero, tiene el equipamiento de serie, ya que se conduce manualmente en los experimentos. Ambos han sido dotados con la instrumentación de comunicaciones necesaria. La figura 1 muestra los vehículos en las instalaciones del IAI.

### 2.1 Clavileño

Clavileño es un vehículo dual, es decir, que tiene la capacidad de mover los pedales de acelerador y freno de forma automática y de forma manual. Ambos sistemas conmutan a través de unos interruptores. En la figura 2 se presenta la arquitectura implantada en el vehículo para llevar a cabo el control longitudinal.

El control del sistema de aceleración se realizó cortando directamente las dos señales de tensión que genera el

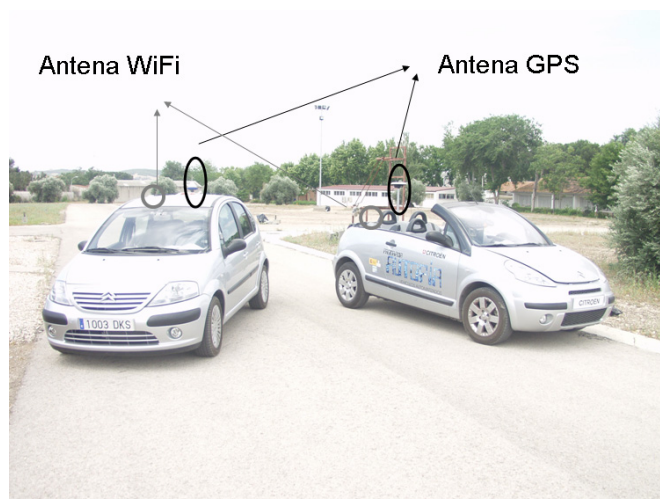


Figura 1. Imagen de los vehículos Citroën (Clavileño y Platero) en las instalaciones del IAI.

acelerador y conmutándolas por otras generadas por el ordenador embarcado en el vehículo. Cuando el conmutador cambia de posición para activar el sistema automático de control, recibe la señal de una tarjeta externa de conexiones (modelo ADAM-3937) a la que se han derivado las señales analógicas de control provenientes de la tarjeta PCI 1720<sup>1</sup> de salidas analógicas. Esta tarjeta se conecta a su vez al PC industrial embarcado de control (modelo AEC-6915<sup>2</sup> de AAEON) encargado de enviar las tensiones inferidas por el controlador borroso para regular la aceleración del vehículo.

Para el control del sistema de freno, se intervino directamente en la caja del ABS (del inglés Antilock Brake System) colocando el sistema de actuación que describimos a continuación. Consta de una válvula con una salida, conectada directamente al ABS para respetar el circuito original, y dos entradas: la primera conectada al circuito inicial de freno, que permite su accionamiento convencional, y la segunda conectada a un sistema electro-hidráulico diseñado para el accionamiento automático del freno desde el computador de control. El sistema electro-hidráulico está formado, a su vez, por otras tres válvulas. Una limitadora que impide superar la presión máxima, fijada experimentalmente en 100 bares, que se puede ejercer sobre el freno, una todo/nada que permite el paso de líquido de freno y una proporcional que regula su caudal. La válvula proporcional está controlada a través de un módulo CAN (del inglés Controller Area Network) con una salida analógica. Además, el dispositivo CAN incluye una salida a relé para controlar la apertura y cierre de la válvula todo/nada. Estas dos salidas son controladas a través del software de control instalado en el PC industrial embarcado en el vehículo. El desarrollo software se ha escrito en Borland C++.

Aunque los controladores del freno y del acelerador actúan coordinadamente y permiten adaptar la velocidad de un vehículo, para realizar maniobras cooperativas entre varios vehículos necesitamos comunicarlos. Para ello, equipamos todos los vehículos con una antena WiFi conectada a una tarjeta de red de área local inalámbrica, modelo Orinoco Silver, con una

<sup>1</sup> [http://www.advantech.com.tw/products/PCI-1720/mod\\_1-2MLH37.asp](http://www.advantech.com.tw/products/PCI-1720/mod_1-2MLH37.asp)

<sup>2</sup> [http://www.aaeon.com/PD\\_Products\\_Detail\\_399AA43D6D854470B6\\_7E3AB0434DD24B939C\\_B338C67F3000413C9B\\_TW\\_UTF-8.html](http://www.aaeon.com/PD_Products_Detail_399AA43D6D854470B6_7E3AB0434DD24B939C_B338C67F3000413C9B_TW_UTF-8.html)

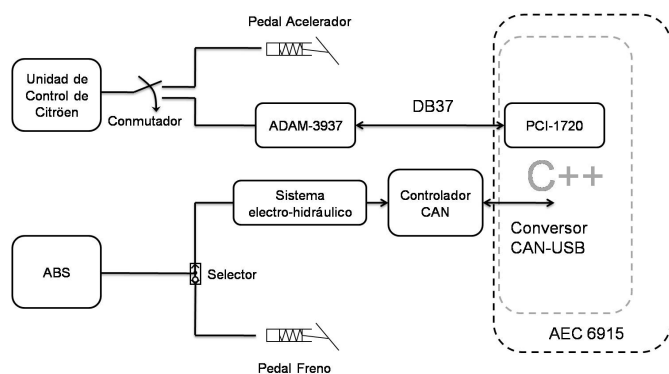


Figura 2. Arquitectura implantada en Clavileño para el control longitudinal.

velocidad de 11Mb/s que funciona bajo la norma IEEE 802.11b. En líneas generales, los protocolos 802.x se aplican a las redes de área local. La norma 802.11b define el uso de los dos niveles inferiores de una arquitectura tipo OSI, es decir, la capa física y la de enlace de datos. Las principales características de esta norma son: operación en la banda de 2,4 GHz y uso del protocolo CSMA/CA, que permite que múltiples estaciones accedan a un mismo punto evitando las posibles colisiones. Sin embargo, debido al espacio ocupado por la codificación del protocolo CSMA/CA, en la práctica, la velocidad máxima se reduce aproximadamente a 5,9 Mb/s sobre TCP y 7,1 Mb/s sobre UDP. En trabajos previos (Pérez et. al, 2008) se ha demostrado como los retardos y la pérdida de paquetes para la frecuencia de control de los vehículos automáticos del programa AUTOPIA, no afectan a la hora de permitir un control óptimo.

Cada vehículo dispone de un receptor GPS al que llegan, a través de la red inalámbrica, las correcciones necesarias para obtener la posición con precisión sub-métrica. De este receptor obtenemos la posición del vehículo en coordenadas UTM (del inglés Universal Transverse Mercator) y su velocidad, variables necesarias para llevar a cabo el control longitudinal. La frecuencia de operación del receptor GPS es de cinco hercios. Este receptor incluye además la posibilidad de utilizar corrección DGPS-RTK (del inglés Real Time Kinematic) a través de la cual conseguimos reducir el error en la medida por debajo de los dos centímetros (Wong et al., 2000; Bernardos, 2003).

Para evitar posibles problemas asociados al uso del GPS en entornos urbanos como la propagación multicamino o la pérdida de satélites, se desarrolló en un trabajo previo (Milanés et al, 2008) un sistema basado en la fusión sensorial del GPS con una unidad de medida inercial que nos permite seguir conociendo la posición del vehículo y, por tanto, determinar la distancia de separación entre ambos aplicando un coeficiente de seguridad debido al error acumulativo de este tipo de sistemas de guiado.

## 2.2 Platero

El otro vehículo utilizado en los experimentos es un Citroën C3 que tiene el equipamiento estándar de un vehículo salido de fábrica. Este vehículo lleva un receptor GPS, análogo al de Clavileño, y un ordenador portátil conectado a una tarjeta de red inalámbrica, idéntica a la de Clavileño, para recibir de la estación base las correcciones de la posición, y enviar a Clavileño su posición y su velocidad, de manera que éste pueda tenerlas en cuenta para realizar el control. Platero es el vehículo que se mueve en cabeza en las pruebas realizadas. Las variables enviadas a través del sistema V2V son obtenidas a través de un

receptor GPS embarcado en el coche que también tiene la posibilidad de obtener posicionamiento DGPS. La frecuencia de funcionamiento es, al igual que en Clavileño, de cinco hercios.

## 3. SISTEMA DE CONTROL

Existen multitud de enfoques para abordar el control de los accionadores del coche. Los métodos convencionales de control producen buenos resultados a costa de gran coste computacional y de diseño debido a que la obtención del modelo matemático del vehículo, un sistema puramente no lineal, se hace sumamente costosa (Sheikholeslam and Desoer, 1992; Rossetter and Gerdes, 2002). Por otra parte, podemos aproximarnos al comportamiento humano para el control de velocidad haciendo uso de técnicas de inteligencia artificial, tales como redes neuronales (Pomerleau, 1989), aunque la técnica que nos da una mejor aproximación al razonamiento humano y una estructura de control más intuitiva es la lógica borrosa (Sugeno, 1999; Zadeh, 1965). En el proyecto AUTOPIA se han elegido este tipo de controladores debido a la gran experiencia del grupo en lógica borrosa y a nuestro desarrollo del sistema ORBEX, (ORdenador Borroso EXperimental), que es un motor de inferencia con un lenguaje de entrada muy sencillo basado en el lenguaje natural. ORBEX (García and de Pedro, 1998; García and de Pedro, 2000) trabaja con controladores difusos del tipo TSK (Takagi-Sugeno-Kang), con consecuentes Singleton, lo que permite tomar decisiones de control en un corto período de tiempo y con muy buena precisión.

El objetivo de este trabajo es controlar la velocidad del vehículo automatizado en situaciones extremas de atasco. Los sistemas ACC desarrollados en la actualidad para vehículos con motor de gasolina presentan inconvenientes a la hora de efectuar maniobras a velocidades extremadamente bajas (del orden de 5 km/h). Haciendo una revisión bibliográfica (Lin et al., 2009; Moon et al., 2009; Kesting et al., 2008), vemos que los sistemas de control aplicados utilizan como principal variable de entrada el tiempo de separación entre ambos vehículos. Este tipo de controladores no permiten llevar a cabo un seguimiento suave del vehículo precedente a velocidades muy bajas. La razón de ello es que la variable de control que utilizan, la distancia temporal (en inglés "time gap") -cuyo cálculo se realiza dividiendo la distancia de separación entre vehículos por la velocidad- resulta ser una variable demasiado caótica, porque pequeñas variaciones de la velocidad ocasionan diferencias de tiempo muy grandes por lo que decidimos utilizar para estas velocidades la distancia en lugar del tiempo como variable de entrada.

Utilizaremos 3 entradas para definir el controlador:

- Distancia (D): Representa la distancia, en metros, entre el vehículo controlado y el vehículo precedente, obtenida a partir de las posiciones de los GPS de ambos vehículos.
- Velocidad del Vehículo Precedente ( $V_p$ ): Indica la velocidad del vehículo al que pretendemos adaptarnos, dada en km/h.
- Velocidad Relativa ( $V_r$ ): Es la diferencia entre la velocidad del vehículo precedente y la del vehículo controlado. Un valor negativo indica que el vehículo controlado circula a mayor velocidad que el precedente y un valor positivo lo contrario.

Una vez definidas las entradas del controlador, establecemos los valores lingüísticos que puede tomar cada una de ellas mediante tres funciones de pertenencia, representadas en la figura 3. A la hora de elegir el número de funciones de pertenencia, se ha intentado utilizar el mínimo de funciones posibles teniendo en cuenta el conocimiento empírico en conducción de los miembros del equipo. De esta forma, obtenemos un controlador efectivo e intuitivo que puede ser comprendido de manera sencilla por un ser humano.

Como hemos comentado, utilizamos dos variables de salida, una para la actuación sobre el pedal del freno ( $F_r$ ) y otra sobre el del acelerador ( $A_c$ ), que se definen mediante 3 singletons cada una, siendo  $a00$ ,  $a01$  y  $a02$  las actuaciones normalizadas entre cero y uno sobre el pedal del acelerador y  $f00$ ,  $f01$  y  $f02$  las actuaciones igualmente normalizadas entre cero y uno sobre el pedal del freno. Teniendo en cuenta que el sistema aquí diseñado trata de realizar un control a muy baja velocidad, las actuaciones aquí permitidas, a los efectos de este controlador, son muy bajas llegando como máximo al 20% del máximo valor permitido. Los restantes valores se usan en otros controladores que no son objeto de este trabajo. Así pues, las salidas son:

$a00$  y  $f00$ . Su valor es 0 y representa no actuar sobre el pedal de acelerador o freno, respectivamente.

$a01$  y  $f01$ . Su valor es 0.1 y representa presionar el pedal correspondiente un 10%.

$a02$  y  $f02$ . Su valor será 0.2 y representa presionar el pedal correspondiente un 20%.

No utilizamos valores superiores para las salidas al sistema, ya que se ha comprobado experimentalmente que a partir de estos se pueden generar aceleraciones y deceleraciones del vehículo muy bruscas que, por una parte resultarán incómodas para los ocupantes del vehículo y, por otra, pueden resultar un riesgo para mantener una distancia de seguridad adecuada entre vehículos, elevando el riesgo de colisión trasera con el vehículo precedente.

El núcleo del controlador borroso está formado por las reglas mostradas en las tablas 1, 2 y 3 que garantizan que no se mandan señales simultáneamente a ambos actuadores.

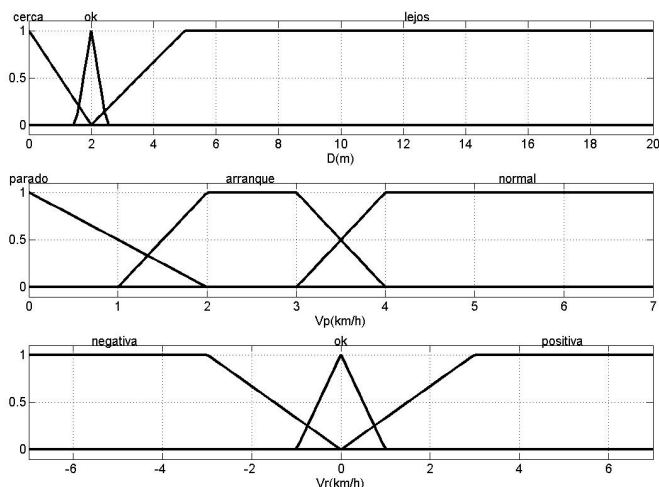


Figura 3. Funciones de pertenencia para las entradas al sistema: Distancia (a), velocidad del predecesor (b) y velocidad relativa (c).

Tabla 1. Base de reglas cuando  $V_r = \text{negativa}$

D / Vp	Parado	Arranque	Normal
Cerca	(Ac=a00) (Fr=f02)	(Ac=a00) (Fr=f01)	(Ac=a00) (Fr=f01)
Ok	(Ac=a00) (Fr=f01)	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)
Lejos	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)

Tabla 2. Base de reglas cuando  $V_r = \text{ok}$

D / Vp	Parado	Arranque	Normal
Cerca	(Ac=a00) (Fr=f01)	(Ac=a00) (Fr=f01)	(Ac=a00) (Fr=f01)
Ok	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)
Lejos	(Ac=a01) (Fr=f00)	(Ac=a01) (Fr=f00)	(Ac=a01) (Fr=f00)

Tabla 3. Base de reglas cuando  $V_r = \text{positiva}$

D / Vp	Parado	Arranque	Normal
Cerca	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a00) (Fr=f00)
Ok	(Ac=a00) (Fr=f00)	(Ac=a01) (Fr=f00)	(Ac=a01) (Fr=f00)
Lejos	(Ac=a01) (Fr=f00)	(Ac=a01) (Fr=f00)	(Ac=a02) (Fr=f00)

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las pruebas han sido llevadas a cabo en las instalaciones del Instituto de Automática Industrial, donde se dispone de una pista cerrada de pruebas dedicada a labores de investigación, llamada ZOCO (acrónimo de Zona de Conducción), por lo que no hay tráfico externo.

La zona del circuito que se ha utilizado para las pruebas comprende curvas pronunciadas como las que podemos encontrar en zonas urbanas. De esta forma, se prueba el funcionamiento del sistema de control ACC + parada y arranque en trayectorias curvas donde los sistemas basados en detección con radar pueden tener dificultades.

Para comprobar el funcionamiento del sistema desarrollado, se han llevado a cabo dos experimentos. El primero de ellos, consiste en un seguimiento en el que el coche precedente va a una velocidad inferior a los ocho kilómetros por hora durante un minuto, realizando tres paradas y arrancadas durante este periodo como consecuencia de las frenadas y arranques del coche precedente. Con este test se pretende mostrar la capacidad del sistema para responder a continuos arranques y paradas, emulando la conducción en atascos, comportamiento extremadamente difícil tratándose de un vehículo con motor de inyección a gasolina. En el segundo test se comprueba el comportamiento del sistema para realizar seguimientos a velocidades que oscilan en torno a los seis kilómetros por hora. El experimento refleja el seguimiento durante dos minutos del vehículo precedente que está circulando a muy baja velocidad.

Los dos experimentos llevados a cabo se compararán con los resultados logrados por un conductor humano que desactivará el

sistema automático realizando él la acción sobre los pedales del acelerador y el freno del coche automatizado y que usará, aprovechando la pantalla colocada en la luna delantera del vehículo, las mismas variables a las que tiene acceso el controlador: la distancia de separación entre los vehículos, la velocidad del vehículo precedente y la diferencia de velocidades entre ambos. De esta manera podremos evaluar el funcionamiento del controlador diseñado y si es capaz de emular o incluso mejorar el comportamiento de un conductor humano. Finalmente resaltar, que estas pruebas se han llevado a cabo en condiciones óptimas del conductor (Dragone, 2009), esto es, cuando no existe fatiga por parte del conductor y durante escasos minutos de circulación. Es de suponer, que estas pruebas realizadas después de horas de conducción arrojarían unos resultados sensiblemente peores.

Se ha establecido una distancia mínima de separación entre los vehículos de 52 cm que es el máximo error que podemos obtener del GPS embarcado en Clavileño (2 cm) más el del GPS embarcado en Platero (50 cm). Sin embargo, como ya ha sido determinado en trabajos previos (Milanés et al., 2009), una acción sobre el freno superior al 10% ( $Fr=f01$ ) detiene el vehículo de un modo prácticamente instantáneo a estas velocidades. Como puede observarse en la tabla 1, para el caso más crítico de una distancia cercana ( $D=cerca$ ), una velocidad de Platero nula ( $Vp=Parado$ ) y Clavileño con velocidad no nula ( $Vr=negativa$ ), la acción sobre el freno es de un 20% ( $Fr=f02$ ), lo que asegura la detención del vehículo antes de producirse la colisión.

La figura 4 muestra la diferencia de velocidades entre los dos vehículos utilizados. Para el experimento, Platero mantuvo una velocidad inferior a ocho kilómetros por hora en todo momento, para comprobar si el sistema era capaz de responder de forma eficaz a velocidades muy bajas. La velocidad de Clavileño aumenta rápidamente hasta superar la de Platero, esto se debe al tipo de motor del vehículo con el que no es posible suavizar el arranque. El mismo comportamiento nos encontramos al detener el vehículo donde la proximidad entre ambos vehículos obliga a una detención en un tiempo reducido.

En la figura 5 vemos la distancia entre ambos vehículos durante este experimento. La distancia de separación máxima entre ambos vehículos es inferior a seis metros en todo momento. En cuanto a la distancia de separación mínima se puede observar un punto crítico en el que la distancia entre los vehículos es de 20 centímetros entre los segundos 30 y 35. Si analizamos la acción del freno (figura 6) en ese intervalo de tiempo, vemos una frenada sucesiva con un pico final del 8% de acción sobre el pedal de freno que permite detener el vehículo antes de la colisión.

La actuación sobre los pedales de acelerador y freno, esto es, la salida del controlador borroso diseñado, se muestra en la figura 6. En ella, se puede ver cómo en los momentos de arranque de Clavileño se producen los picos en la salida del controlador. Una vez pasado el instante inicial, no se produce ninguna actuación ya que la propia inercia del coche permite mantener la distancia de manera correcta.

Para comparar estos resultados con el comportamiento obtenido de un conductor humano, se ha realizado el mismo experimento pero con el coche perseguidor, Clavileño, conducido por una persona. En las figuras 7 y 8 se muestran la velocidad de ambos

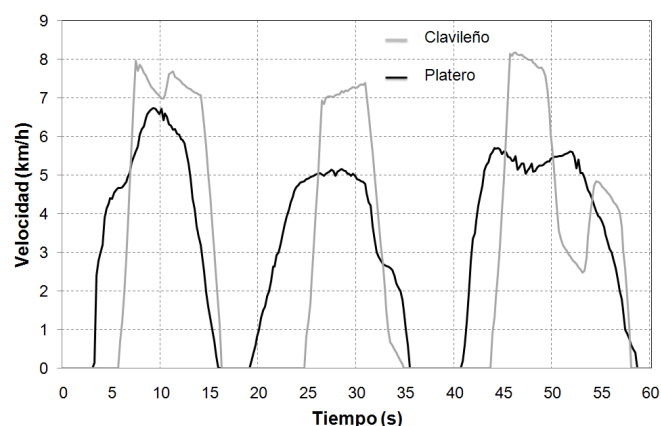


Figura 4. Velocidad de los vehículos Clavileño (con sistema automático) y Platero durante tres maniobras consecutivas de arranque y parada a baja velocidad.

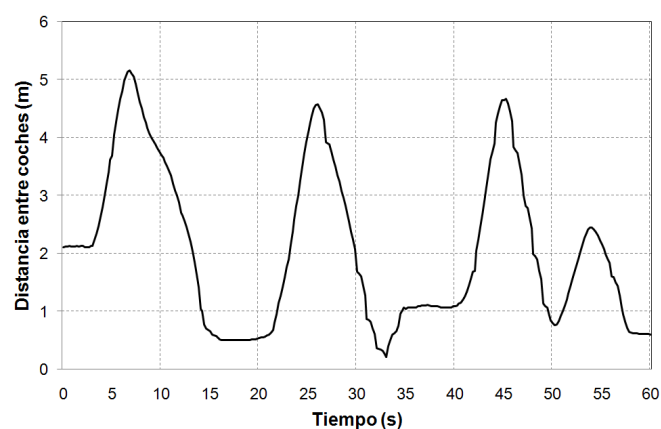


Figura 5. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático con arranque y parada.

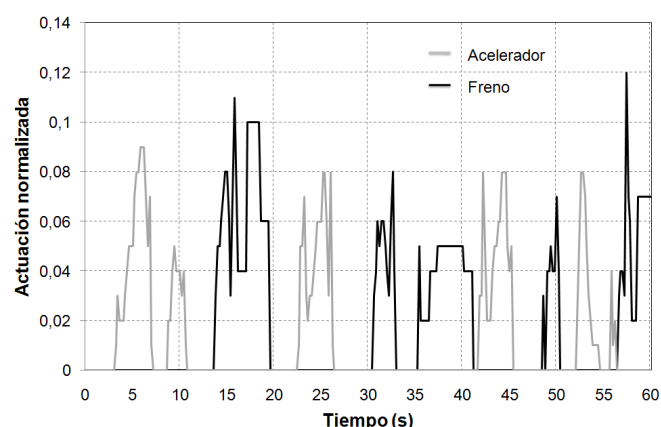


Figura 6. Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el primer experimento.

vehículos y la distancia de separación a lo largo del mismo. Se puede apreciar como el conductor humano presenta una mayor dificultad a la hora de controlar sucesivos arranques y paradas y como la precisión en la acción sobre el pedal del acelerador provoca picos de velocidad superiores a las del controlador automático, realizando así un gasto innecesario de combustible y obligando a realizar una frenada menos suave.



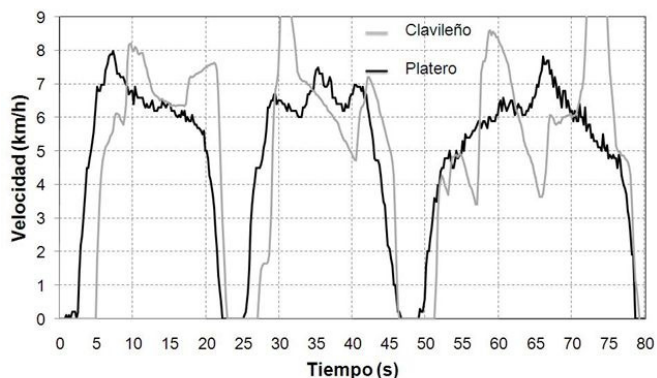


Figura 7. Velocidad de los vehículos Clavileño (con conductor humano) y Platero durante tres maniobras consecutivas de arranque y parada a baja velocidad.

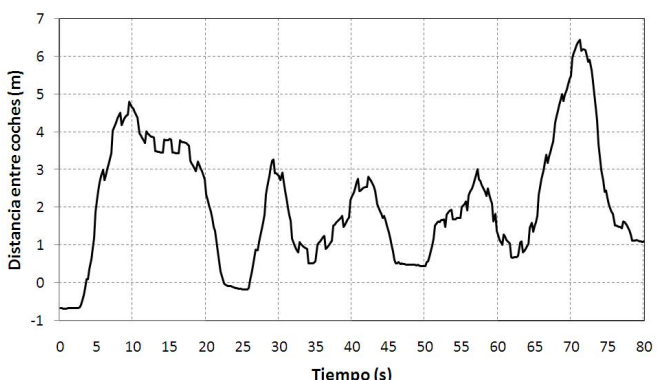


Figura 8. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento con conductor humano en arranque y parada.

En la figura 8, podemos ver como la distancia inicial de separación entre los vehículos es inferior a cero metros, esto es debido a que el sistema fue iniciado con los vehículos tocándose. Se aprecia en esta gráfica como alrededor del segundo 25 el vehículo perseguidor supera la distancia mínima de seguridad entre ambos coches, provocando un riesgo de colisión inminente. Además, la separación entre vehículos es superior a la que podemos apreciar en la figura 5 donde Clavileño fue conducido de forma automática.

En el segundo experimento, de nuevo con Clavileño en modo automático, se mantuvo la velocidad del coche conducido manualmente, Platero, en valores cercanos a los seis kilómetros por hora con continuos cambios de velocidad, el objetivo buscado era emular el comportamiento del vehículo automático en caso de conducción en caravana donde se puede circular durante varios minutos a velocidades extremadamente bajas. De esta forma podemos observar los efectos producidos sobre el sistema de control diseñado y comprobar su capacidad de reacción.

En la figura 9, se comparan las dos velocidades. Vemos cómo la velocidad de Platero cambia constantemente, mientras Clavileño trata de seguir este comportamiento. El controlador provoca que las variaciones de velocidad en Clavileño sean mayores, pero presenta como ventaja que estas oscilaciones son más estables que los continuos cambios producidos en Platero, debido al constante accionamiento de los pedales.

También podemos observar (Figura 10) la distancia de separación mantenida entre los dos coches a lo largo de todo el experimento. Se comprueba que las variaciones son mínimas y prácticamente inferiores a dos metros, lo que nos permite asegurar que el sistema reduce la distancia entre vehículos y mantiene este valor acotado en un rango de variación inferior a cuatro metros.

La salida del controlador borroso para esta prueba se muestra en la figura 11. Los continuos cambios de velocidad provocan actuaciones muy rápidas sobre los pedales de acelerador y freno consecutivamente que el sistema automático es capaz de seguir.

Al igual que se hizo para el primer experimento. Hemos realizado esta prueba con un conductor humano en Clavileño tratando de seguir las referencias dadas por las variables de entrada al controlador borroso. En la figura 12 se aprecian los continuos cambios en la velocidad de Clavileño tratando de mantener la distancia entre ambos vehículos. Esto provoca, al igual que ocurría en el otro experimento, velocidades mayores superando incluso los 12 km/h. Teniendo en cuenta que la velocidad de Platero no supera en ningún momento los 8 km/h, se demuestra que el comportamiento del conductor humano es más errático que el del sistema automático diseñado.

Estas sucesivas aceleraciones y frenadas provocan que el mantenimiento de la distancia presente oscilaciones mayores que en el caso del sistema automático como podemos apreciar en la figura 13.

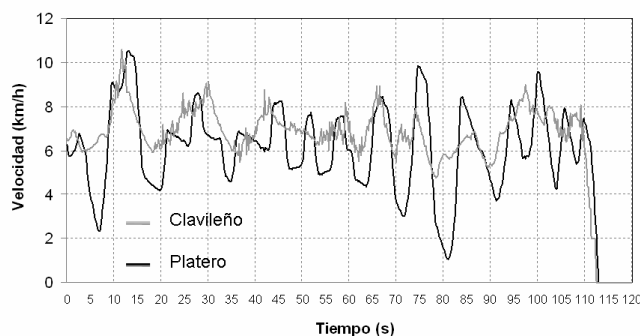


Figura 9. Velocidades de Clavileño (con sistema automático) y Platero durante una maniobra de seguimiento a baja velocidad.

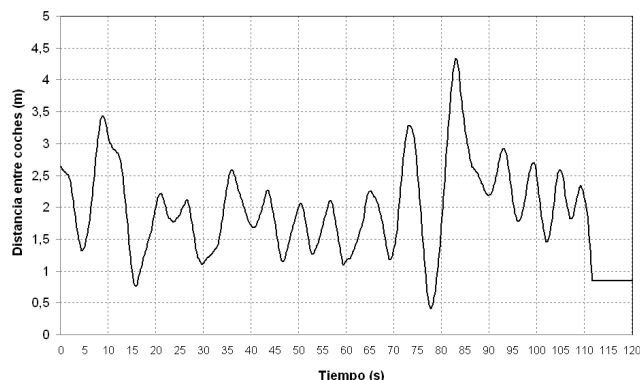


Figura 10. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático.

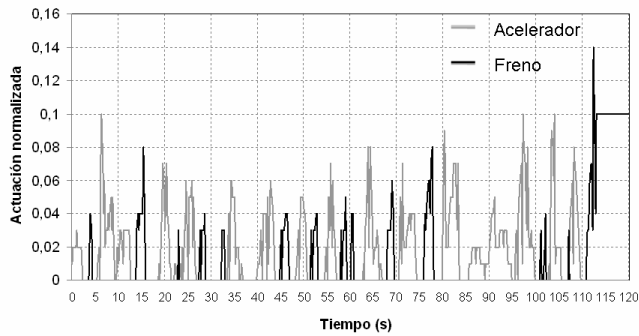


Figura 11. Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el segundo experimento.

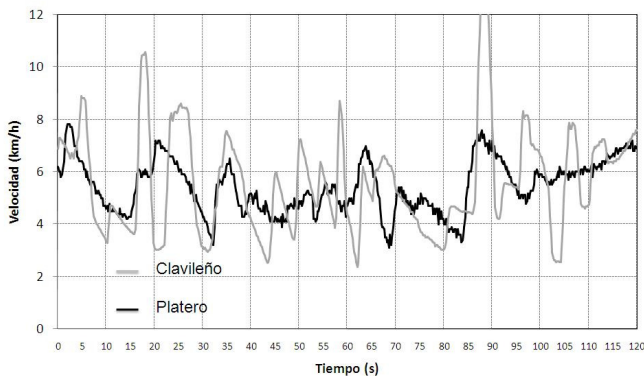


Figura 12. Velocidades de Clavileño (con conductor humano) y Platero durante una maniobra de seguimiento a baja velocidad.

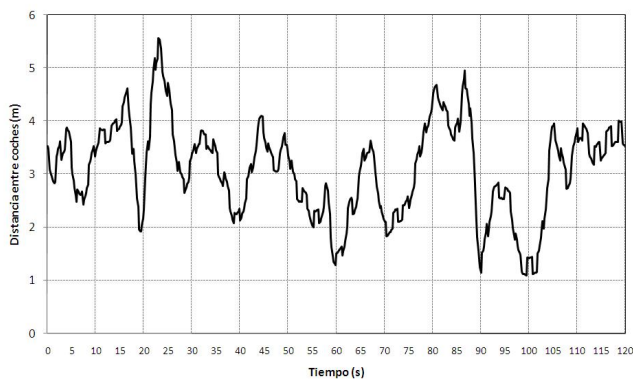


Figura 13. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento con conductor humano.

## 5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

El objetivo impulsado desde de la Dirección de Transportes de la Comisión Europea de reducir de manera drástica los accidentes, ha provocado que en los últimos años se desarrollen diferentes técnicas de ayuda al conductor, ya sea a través de sistemas visuales o auditivos. Sin embargo, estos sistemas pueden no ser suficientes a la hora de prevenir un accidente.

Situaciones tediosas en la conducción, como puede ser el tráfico en atascos obligan al conductor a continuas paradas y arranques durante largos períodos de tiempo que pueden provocar el

cansancio o la pérdida de atención en la conducción. Un sistema basado en el control de los pedales de acelerador y freno constituye una excelente solución para relevar al conductor de este tipo de trabajo y mejorar las condiciones del tráfico.

En este artículo se ha demostrado que equipar vehículos con un sistema formado por un dispositivo de comunicación inalámbrico, apoyado por receptores GPS que suministren la posición y velocidad de los vehículos en todo momento es una buena solución para solventar este problema. Además, se ha probado que el uso de un controlador borroso que gestione las entradas provenientes de estos sensores y trate la actuación sobre los pedales del acelerador y freno puede realizar de forma eficiente esta función.

En el futuro, se tratará de involucrar a un mayor número de vehículos automatizados en las pruebas. De esta manera el vehículo automatizado no seguirá a un vehículo guiado por un conductor sino a otro automatizado de forma que las acciones sobre el pedal y el freno sean aún mas suaves que en los experimentos aquí presentados. Además, esperamos que estas nuevas pruebas ayuden al aumento en la fluidez del tráfico y, por tanto, a reducir de manera significativa el llamado “efecto acordeón”.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos: TRANSITO (Coordinación Local entre Vehículos e Infraestructuras), TRA 2008-06602-C03-01; ENVITE (Comunicación entre Vehículos e Infraestructuras de Transporte por Carretera incluyendo GNSS en Zonas Críticas), MFOM T7/2006; y MARTA (Movilidad y Automoción con Redes de Transporte Avanzadas), (CDTI, CENIT 2007).

## REFERENCIAS

- Bernardos, A. (2003), “Tecnologías de Localización,” en Centro de Difusión de Tecnologías ETSIT-UPM, Diciembre.
- Blythe, P.T and Curtis, A. (2004), “Advanced Driver Assistance Systems: Gimmick or Reality,” en 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services, Nagoya, Japan.
- Brookhuis, K. A., de Waard, D. and Janssen, W. H. (2001), “Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems—an overview”, en European Journal of Transport and Infrastructure Research, **vol. 1**, no. 3, pp. 245-253, Noviembre.
- Dragone, D. (2009), “I am getting tired: Effort and fatigue in intertemporal decision-making” en Journal of Economic Psychology, **vol. 3**, issue 4, pp. 552-562, Agosto.
- De Micheli, E. and Verri, A. (1993), “Vehicle guidance from one dimensional optical flow,” IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Tokio, Japan.
- García, R. and de Pedro, T. (1998), “Modeling a fuzzy coprocessor and its programming language”, Mathware and Soft Computing, **vol. 5**, n.º. 2-3, pp 167-174.
- García, R. and de Pedro, T. (2000), “First Application of the ORBEX Coprocessor: Control of Unmanned Vehicles”, 1999 EUSFLAT-ESTYLF Joint Conference. Mathware and Soft Computing, n. 7, **vol. 2-3**, pp. 265-273.
- Graefe, V. (1993), “Vision for Intelligent Road Vehicles,” IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Tokio, Japan, 135-141.
- Hofmann, U., Rieder, A. and Dickmanns, E.D. (2003), “Radar and vision data fusion for hybrid adaptive cruise control on

- highways”, *Machine Vision and Applications*. **vol. 14**, n. 1, pp. 42 – 49, Abril.
- Ioannou, P. and Chien, C. (1993), “Autonomous intelligent cruise control,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **vol. 42**, pp. 657-672.
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M. and Helbing, D. (2008), "Adaptive cruise control design for active congestion avoidance" en *Transportation Research: Part C*, **vol. 16**, pp. 668-683.
- Libro Blanco (2001). *La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad*. European Transport Commission Bruselas, Septiembre 2001.
- Lin, T.W., Hwang, S.L. and Green, P.A. (2009), “Effects of time-gap settings of adaptive cruise control (ACC) on driving performance and subjective acceptance in a bus driving simulator” en *Safety Science*, **vol. 47**, no. 5, pp. 620-625.
- Milanés, V., González, C., Naranjo, J.E., Onieva, E. and de Pedro, T. (2009), “Eletro-hydraulic Braking System for Autonomous Vehicles” en *International Journal of Automotive Technology*, aceptado el 25 de Mayo (in press).
- Milanés, V., Naranjo, J.E., González, C., Alonso, J., García, R. and de Pedro, T. (2008), “Sistema de Posicionamiento para Vehículos Autónomos,” en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **vol. 5**, n. 4, pp. 36-41, Octubre.
- Moon, S., Moon, I. and Kyongsu Y. (2009), "Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance", en *Control Engineering Practice*, **vol. 17**, pp. 442-455.
- Müller, R. and Nucker, G. (1992), “Intelligent Cruise Control with Fuzzy Logic” en *Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 173-178, Junio.
- Wong, C., Riley, J.L., Martin, D., Huff, L.C., Hall, L., Gill, S. and Foote, R. (2000), “NOS RTK Final Report”, NOAA Center for Operational Oceanographic Products and Services, Agosto.
- Pauwelussen, J. and Minderhoud, M. (2008), “The effects of deactivation and (re)activation of ACC on driver behaviour analyzed in real traffic,” en *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 257-262, Junio.
- Pérez, J., Onieva, E., de Pedro, T., García, R., Alonso, J., Milanés, V., and González, C. (2008), “Comunicación entre Vehículos Autónomos en Tiempo Real, para Maniobras de Alto Riesgo”, en *XXIX Jornadas de Automática*, Tarragona, Septiembre.
- Pomerleau, D. A. (1989), “ALVINN: an autonomus land vehicle in a neuronal network”, en *Advances in neuronal information processing systems 1*, pp. 305-313.
- Rossetter, E. J. and Gerdes, J. C. (2002), “Performance guarantees for hazard based lateral vehicle control,” en *Proc. 2002 IMECE Conf.*
- Serrano, J.I., Alonso, J., del Castillo, M.D. and Naranjo, J.E. (2005), “Evolutionary optimization of autonomous vehicle tracks” en *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, **vol. 2**, pp. 1332-1339, Septiembre.
- Sheikholeslam, S. and Desoer, C. A. (1992), “Design of Decentralized Adaptive Controllers for a Class of Interconnected Nonlinear Dynamical Systems: Part I,” Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, CA, PATH Technical Memorandum 92-1, Febrero.
- Sotelo, M.A. and Naranjo, J.E. (2004), “Vision-based Adaptive Cruise Control for Intelligent Road Vehicles,” *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 64-69, Septiembre.
- Stein, G. P., Mano, O. and Shashua A., (2003), “Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and Range Rate Accuracy” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*, Junio 2003, Columbus, OH.
- Sugeno, M. (1999), “On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents”, en *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, **vol. 7**, no. 2, pp. 201-224, Abril.
- Urmson C. et al. (2006), “A robust Approach to High-Speed Navigation for Unrehearsed Desert Terrain”, en *Journal of Field Robotics*. **vol. 23**, n. 8, pp. 467-508.
- Woll, J. (1997), “Radar Based Adaptive Cruise Control for Truck Applications,” SAE Paper 973 184.
- Zadeh, L. A. (1965), “Fuzzy sets”, en *Information and Control*, **vol. 8**, pp. 338–353.