

Adelantamiento con vehículos autónomos en carreteras de doble sentido

Joshué Pérez *Vicente Milanés *Javier Alonso *Enrique Onieva *Teresa de Pedro *

* Instituto de Automática Industrial, CSIC, Carretera de Campo Real, km. 0.200, 28500 La Poveda, Arganda del Rey, Madrid, España (e-mail: {jperez, vmilanes, jalonso, onieva, tere}@iai.csic.es)

Resumen: Las investigaciones llevadas a cabo para el control de vehículos autónomos en maniobras cooperativas están en la vanguardia de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Ejemplos de esta cooperación se plasman en intersecciones, control de crucero adaptativo (ACC), adelantamientos, entre otros. Los adelantamientos requieren especial atención en un entorno variable, y sobre todo si se aproxima un vehículo en sentido contrario. En el presente artículo se plantea un algoritmo de decisión, un sistema de comunicaciones entre tres vehículos y un controlador borroso para la conducción de un vehículo en una maniobra de adelantamiento. Se han considerado diferentes casos de uso, en los que conviene abortar o terminar la maniobra de adelantamiento en una carretera de doble sentido. Los resultados obtenidos demuestran que, basándonos en el conocimiento humano, se pueden ajustar controladores borrosos para la conducción autónoma de vehículos en maniobras de alto riesgo. Palabras Clave: comunicación entre vehículos, adelantamientos, controlador borroso, vehículos autónomos, GPS.

1. INTRODUCCIÓN

La automatización de vehículos comerciales, con el paso del tiempo, se está convirtiendo en una realidad cada vez más patente. Diferentes fabricantes y grupos de investigación alrededor del mundo vuelcan sus esfuerzos en desarrollar sistemas que permitan mejorar la conducción bien en zonas urbanas, o bien en autovías (Barrick, 1962).

Los vehículos autónomos forman parte de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), en los cuales se aplican diferentes técnicas de control y comunicaciones, con el objetivo de mejorar la seguridad en la conducción. Las investigaciones en maniobras cooperativas entre vehículos autónomos es una de las áreas más arriesgadas en el campo de los ITS, y el adelantamiento entre vehículos reales adquiere especial interés (Jula *et al.*, 2000). Si consideramos el caso de una carretera de doble sentido, la dificultad se incrementa considerablemente.

Según la DGT los conductores han dejado de correr en las autopistas y autovías, para hacerlo en las carreteras secundarias. Mientras la siniestralidad ha descendido un 27 % en las redes principales, ha crecido un 100 % en las secundarias (DGT, 2008). Estos datos son alarmantes, ya que las cifras nos revelan que desde 2006 a 2008 más de 8500 personas perdieron la vida en accidentes de tráfico en España. Más del 60 % de estos accidentes ocurren por la poca visibilidad y la mala estimación de la distancia a las curvas por parte de los conductores (DGT, 2008).

Aunque España, en las últimas dos décadas, ha empezado a construir y mejorar la infraestructura en las autopistas, el 91 % de las vías nacionales son carreteras de doble sentido. De un total de 166.339 kilómetros de toda la red de carreteras, solo el 8,3 % cuenta con dos o más carriles en un mismo sentido ¹. Por

este motivo, es importante centrar las investigaciones en utilizar la infraestructura actualmente instalada.

El adelantamiento es una maniobra de alto riesgo, ya que las decisiones que se toman en su ejecución no dependen únicamente del estado propio del vehículo, sino también de las condiciones del entorno, e.g.: la distancia a curvas e intersecciones, los fines de tramos, la posición y velocidad de los demás vehículos, son algunas de las variables que deben considerarse. La ubicación y velocidad de los vehículos involucrados en un adelantamiento puede variar repentinamente. Y los factores naturales como la lluvia, niebla o poca visibilidad pueden influir en la ejecución correcta del mismo. Además, la dinámica del vehículo, sobretodo en el contacto entre el neumático y el suelo (Smith and Starkey, 1995), es otro de los factores que condicionan la ejecución.

La acción básica para realizar un adelantamiento es el cambio de carril. En (Jula *et al.*, 2000) se definen las diferentes situaciones para realizar un cambio de carril seguro. En (Rajamani *et al.*, 2000) se presentan algunos de los avances del programa PATH, considerando el control longitudinal y lateral de una flota de vehículos en caravana por autovías. En (Hessburg and Tomizuka, 1994) presentan controladores borrosos para el volante aplicado al cambio de carril usando la aceleración lateral, el error de la aceleración y la distancia a la línea de referencia. En Japón, el laboratorio de Investigación en vehículos de Nissan Motor ha desarrollado un sistema llamado LKS (*Lane-Keeping Support*), el cual permite controlar, utilizando como entrada el par del volante, un servo motor acoplado a la dirección (Shimakage *et al.*, 2002), para seguir la referencia.

Por otra parte, se necesitan sistemas de comunicaciones confiables para realizar las maniobras cooperativas. En este sentido, la universidad de Tsukuba ha desarrollado un algoritmo para la transmisión de datos entre vehículos, probándolos en maniobras como el cambio de carril (Sakaguchi *et al.*, 2000; Uno *et al.*, 1999).

¹ Fuente: Ministerio de Fomento, gobierno de España. (www.fomento.es)

Otros autores han simulado adelantamientos con diferentes estrategias, como aprendizaje reforzado con múltiple objetivo (Ngai and Yung, 2007). Además, dentro de nuestro grupo, un simulador desarrollado por (Alonso *et al.*, 2007) ha permitido verificar diferentes estrategias de toma de decisiones en la maniobra de adelantamiento con tres vehículos.

En el *DARPA Urban Challenge*, la competición más importante en la conducción de vehículos autónomos (Kammel *et al.*, 2007), el equipo por la Universidad de Stanford logró el segundo lugar en la última edición, realizando con éxito adelantamientos a 48 km/h. Para ello el vehículo estaba equipado con cinco laser frontales, un GPS (sistema de posicionamiento global), cinco radares, sistemas inerciales y dos ordenadores colocados en paralelo (Motemerlo, 2008).

La filosofía del grupo AUTOPIA es realizar maniobras de control de vehículos autónomos afectando lo menos posible el entorno de trabajo, y esto también incluye a los vehículos. Usando controladores borrosos embarcados, un GPS diferencial y comunicación inalámbrica entre vehículos, se han desarrollado diferentes algoritmos, utilizando uno o dos vehículos (Milanés *et al.*, 2009).

En este trabajo se explican los procedimientos para hacer adelantamientos con tres vehículos en carreteras de dos carriles y doble sentido con tráfico de frente. Los experimentos involucran hasta tres vehículos comunicados entre sí, el que realiza el adelantamiento es autónomo y los otros se conducen manualmente. El primer experimento consiste en un adelantamiento simple entre dos vehículos y los dos siguientes involucran a un tercer vehículo que circula en sentido contrario. El controlador del vehículo autónomo valora en cada momento del adelantamiento, si éste puede proseguir o hay que abortarlo.

En la sección 2 se explica la instrumentación de los vehículos utilizados y las pistas de pruebas. En la sección 3 se describe la maniobra de adelantamiento, sus diferentes fases, variables consideradas y los casos de uso utilizados en los experimentos de la sección 5. El controlador borroso utilizado se describe en la sección 4. Por último, en la sección 6 se explican las conclusiones que se obtienen del trabajo realizado y se plantean las mejoras para trabajos futuros.

2. VEHÍCULOS Y ENTORNO DE PRUEBAS.

En este trabajo, se han utilizado tres vehículos: uno en modo autónomo y dos guiados por conductores humanos. Es conveniente notar que utilizar vehículos en modo manual confiere generalidad y dificulta el experimento, ya que puede cambiar repentinamente la consigna de velocidad de éstos, haciendo que las condiciones externas sean impredecibles. A continuación se detallan las características de cada uno de los vehículos y las pistas utilizadas.

2.1 Vehículo autónomo.

Este vehículo es una furgoneta eléctrica, modelo Berlingo de Citroën, con baterías de níquel-cadmio separadas en cuatro bloques y distribuidas a lo largo del chasis del vehículo. Dispone de un sistema de dirección hidráulica y un sistema de frenos convencional. La acción sobre el acelerador funciona como un potenciómetro que genera un voltaje de referencia para el pedal del acelerador, entre 1 y 4 voltios. Una tarjeta digital-analógica envía la referencia de velocidad que emula la presión

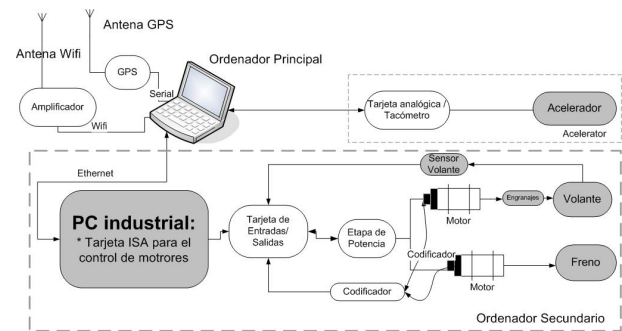


Figura 1. Arquitectura de control implementada.

del conductor al pisar el pedal. La velocidad real del vehículo se obtiene de un tren de pulsos proveniente del tacómetro.

Un GPS diferencial es utilizado como sensor principal. Éste puede enviar tramas de posición a frecuencias de 10 Hz, logrando una precisión de hasta 2 centímetros. La acción sobre el volante se hace utilizando un motor DC, de 90 vatios, acoplado a través de engranajes a la barra de dirección del vehículo.

El controlador del vehículo autónomo actúa sobre el freno, acelerador y volante. El control longitudinal supone la acción coordinada sobre el acelerador y el freno, mientras que el control lateral involucra solo al volante.

La arquitectura de control implementada separa al nivel hardware del nivel software. Para ello se utilizaron dos ordenadores conectados en red (Pérez *et al.*, 2009). El primero está encargado de la percepción de los datos, control de alto nivel y la acción sobre el acelerador. Mientras que el segundo se encarga de controlar, a bajo nivel, los motores utilizados para el control del freno y el volante, según muestra la figura 1.

El segundo ordenador es un PC industrial, que utiliza tarjetas para el control de motores². Se comunican con la etapa de potencia y el resto de periféricos a través de otra tarjeta de entradas y salidas digitales y analógicas (Pérez *et al.*, 2009).

2.2 Vehículos no autónomos

Estos dos coches tienen un motor a gasolina convencional. Para esta maniobra ambos son utilizados en el modo monitor. Este modo permite monitorizar las variables del sistema, proporcionando a los vehículos de su entorno la posición, velocidad y demás variables de interés para completar maniobras conjuntas. En la figura 2 se muestran ambos vehículos.

Todo lo que se necesita para que el vehículo funcione en modo monitor es un PC portátil y un GPS. La velocidad de los coches puede ser leída desde el tacómetro, pero con la intención de evitar mayor instrumentación en los vehículos, se han configurado los GPSs para que envíen tramas de datos con la posición y la velocidad.

2.3 Entorno de pruebas y comunicaciones.

El Instituto de Automática Industrial (IAI) del CSIC dispone de unas pistas de pruebas que emulan un entorno urbano. Para los experimentos de adelantamiento con tres vehículos se utilizó el tramo recto más largo del circuito. Éste tiene una longitud de 200 metros, lo cual limita la velocidad de los vehículos, hasta

² basadas en el chip LM628 de National Semiconductor



Figura 2. Vehículos no autónomos en las instalaciones del IAI.



Figura 3. Pistas de pruebas en el IAI. Longitud máxima de 220 metros.

un máximo de 30 km/h. En la figura 3 se muestra el segmento del circuito utilizado.

Para establecer la comunicación entre vehículos se utilizaron tarjetas inalámbricas conectadas a una red local Wi-Fi. Éstas funcionan bajo la norma IEEE 802.11b. La velocidad de transmisión es de 11Mbps, pero debido al espacio ocupado por la codificación del protocolo CSMA/CA, en la práctica, la velocidad máxima de transmisión con este estándar es de aproximadamente 5.9 Mbps sobre TCP y 7.1 Mbps sobre UDP. En nuestra aplicación utilizamos el protocolo TCP el cual brinda mayor seguridad en el tratamiento de la información.

En la maniobra de adelantamiento con tres vehículos se implementó el esquema de comunicación que se muestra en la figura 4. También se muestra la comunicación con la estación base para recibir la corrección diferencial. La comunicación implementada es punto a punto, mientras que la corrección diferencial es enviada desde la estación base a cada vehículo, en una configuración servidor-cliente. En (Pérez, 2008) se explica con detalle el sistema de comunicación implementado.

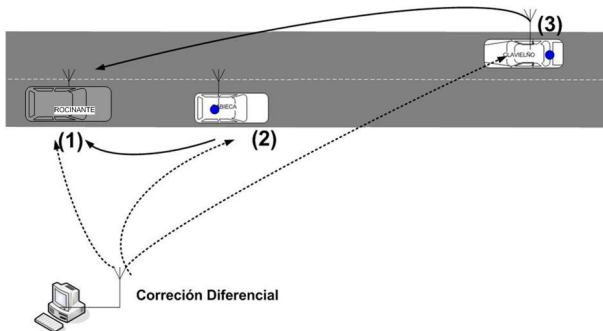


Figura 4. Comunicación entre vehículos y corrección diferencial.

3. MANIOBRA DE ADELANTAMIENTO.

El adelantamiento entre vehículos consiste en la acción de rebasar un vehículo que se encuentre en la trayectoria del otro. El adelantamiento más sencillo se realiza en carreteras de un solo sentido, y en estas se realizan dos cambios de carril. La maniobra empieza con un cambio al carril izquierdo del vehículo adelantador (VH1) y termina con una vuelta al carril derecho, una vez se haya superado el vehículo adelantado (VH2).

Para comenzar una maniobra de adelantamiento deben cumplirse dos tipos de condiciones; unas relativas a la interacción con los otros vehículos y otras relativas a las condiciones del entorno. Las primeras son:

- La velocidad del vehículo VH1 debe ser mayor que la del vehículo VH2.
- El vehículo VH2 debe encontrarse en el mismo carril que el vehículo VH1.

Y las condiciones del entorno para realizar un adelantamiento son:

- Los vehículos involucrados deben estar en un segmento recto.
- La distancia a la próxima curva debe ser suficiente para completar la maniobra.
- El carril izquierdo debe estar libre, o si se aproxima algún vehículo debe haber tiempo suficiente para completar el adelantamiento.

Las tres fases del adelantamiento y la distancia que recorre el vehículo VH1 en la fases 1 y 3 son A y A' respectivamente (figura 5) . En Naranjo *et al.* (2005) se estima la distancia A y no se considera A', pues se supone que en esta fase el adelantamiento puede completarse. Sin embargo, la dinámica del vehículo es diferente en cada fase, por lo que en este trabajo se estima la A' y explicamos su utilidad para, en caso necesario, abortar el adelantamiento.

3.1 Maniobra de adelantamiento con tres vehículos.

La maniobra de adelantamiento descrita en el punto anterior solo puede realizarse en condiciones ideales, es decir, sin otros vehículos involucrados. En una situación normal de adelantamiento, el conductor (en este caso el controlador que guía el vehículo) no puede conocer a priori el comportamiento de los vehículos vecinos. Así, si una vez iniciado el adelantamiento, el vehículo VH2 aumenta su velocidad repentinamente o si viene otro vehículo en sentido opuesto (VH3), las probabilidades de que ocurra un accidente son mayores.

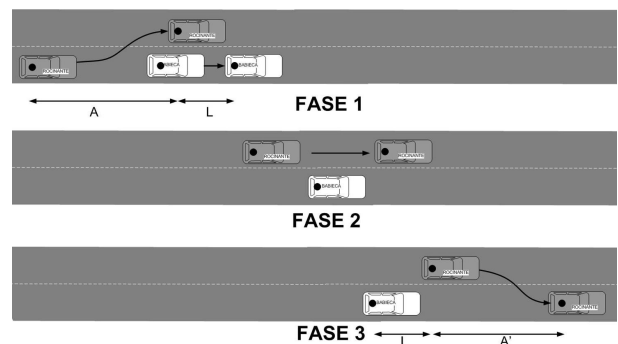


Figura 5. Fases del Adelantamiento.

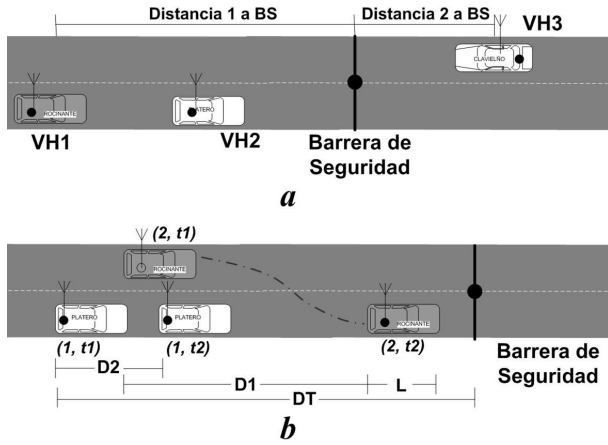


Figura 6. Posición inicial y final de vehículos en fase 3 del adelantamiento

Por esta razón, el algoritmo de decisión, basado en lógica borrosa que se presenta en este artículo, resuelve estas situaciones críticas en las que un conductor humano duda entre acelerar y terminar la maniobra o frenar y el retornar a su posición inicial. Para ello es necesario conocer en todo momento la posición y la velocidad de todos los vehículos involucrados.

La posición de los tres vehículos al iniciar el adelantamiento se muestra en la parte superior de la figura 6. La posición y la velocidad de los vehículos VH2 y VH3 son los que determinan los diferentes casos de uso para realizar la maniobra de adelantamiento.

Por motivos de seguridad, la toma de decisiones en el adelantamiento debe garantizar que el vehículo VH1 tenga tiempo suficiente para volver al carril derecho en cualquier momento y fase de la maniobra en el que se detecte un vehículo acercándose en sentido opuesto. Para ello definimos una referencia dinámica que llamamos barrera de seguridad (BS), una línea ficticia perpendicular a la directriz de la carretera y situada delante del vehículo VH2 a una distancia que varía con la velocidad relativa de VH1 respecto a VH2. (figura 6). La idea es estimar si el vehículo VH1 llegará a la barrera de seguridad antes que VH3 y por tanto tiene tiempo para volver al carril derecho, es decir, si hay espacio libre suficiente para completar el adelantamiento.

Supongamos que la fase 3 del adelantamiento se inicia en el instante t_1 (figura 6. Parte inferior) - cuando el vehículo VH1 está centrado³ en el carril izquierdo y ha rebasado al vehículo VH2- y acaba en el instante t_2 - cuando el vehículo VH1 está centrado en el carril derecho. En este intervalo, $T = t_2 - t_1$, hemos estimado que el vehículo VH1 recorre una distancia D_1 - en función de la velocidad a la que vuelve al carril derecho, cuando el vehículo VH2 está detenido-. La posición de la barrera de seguridad estará también condicionada por la distancia D_2 que recorre el vehículo VH2 en el mismo intervalo de tiempo. Por lo tanto la posición de la barrera de seguridad viene dada por la ecuación 1. Donde L es la longitud del vehículo VH1.

$$DT = D_1 + D_2 + L \quad (1)$$

Para estimar con precisión el valor de D_1 , se realizaron varios experimentos de vuelta al carril derecho -fase 3- a velocidades

³ Un vehículo está centrado en un carril cuando su orientación forma un ángulo menor de 5 grados con la directriz del carril

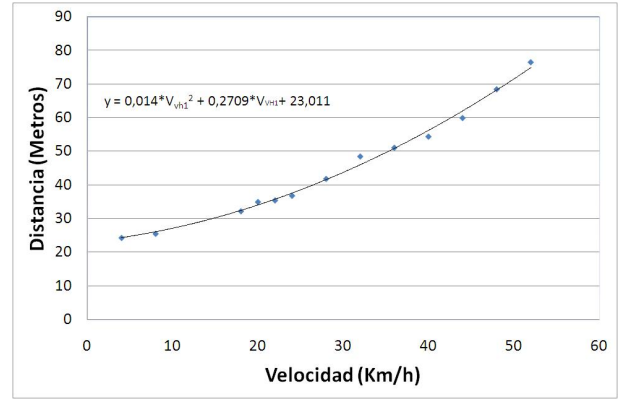


Figura 7. Distancia para el cambio de carril en función de la velocidad de VH1

comprendidas entre 4 km/h y 52 km/h, con el vehículo VH2 detenido. En la figura 7 se representan los valores obtenidos. Mediante un ajuste con mínimos cuadrados se llega a la ecuación:

$$D_1 = 0,014V_{VH1}^2 + 0,2709V_{VH1} + 23,011 \quad (2)$$

Además, suponiendo que la velocidad media de VH2 en la fase 3 es v_2 , tenemos que $D_2 = v_2 * T$ y $T = D_1/v_1$, luego la ecuación 1 la podemos reemplazar por:

$$DT = D_1 * (1 + (V_{VH2}/V_{VH1})) + L \quad (3)$$

Consideremos ahora que un tercer vehículo circula en sentido contrario. Definimos las velocidades relativas V_{rel1} y V_{rel2} como:

$$V_{rel1} = V_{VH1} - V_{VH2} \quad (4)$$

$$V_{rel2} = V_{VH1} + V_{VH3} \quad (5)$$

Estos valores son positivos durante el adelantamiento, excepto cuando se den las condiciones para abortarlo. En este caso, V_{rel1} puede ser negativo.

Con las posiciones de los vehículos y las velocidades relativas se calculan los valores de las variables que determinan la acción más segura, esto es terminar el adelantamiento ó abortar la maniobra volviendo a la situación inicial. Sean DB_1 y DB_3 las distancias entre los vehículos VH1 y VH3 a la barrera de seguridad, llamamos tiempo de seguridad (T_S) y tiempo de recorte (T_R) a los intervalos que tarda cada vehículo en recorrer dichas distancias. Estos tiempos vienen dados por las expresiones:

$$T_{seguridad} = \frac{(DB_1)}{V_{rel1}} \quad (6)$$

$$T_{recorte} = \frac{(DB_3)}{V_{rel2}} \quad (7)$$

Donde $T_{seguridad}$ es el tiempo que necesita el vehículo VH1 para llegar a la barrera de seguridad y completar la maniobra de adelantamiento, y $T_{recorte}$ es el tiempo que requiere el vehículo que viene en sentido contrario (VH3) para llegar a la barrera de seguridad.

Antes de detallar el controlador borroso para permitir adelantar o no, debe subdividirse la fase 2 de la figura 5 para el adelantamiento con tres vehículos.

En un adelantamiento con dos vehículos la fase 2 empieza cuando el vehículo adelantador (VH1) entra en el carril izquierdo y

termina cuando sale de él. Pero en si hay un vehículo circulando en sentido contrario deben considerarse dos casos: cuando VH1 haya superado a VH2 y cuando aún no lo haya hecho. Por esto se definen las siguientes subfases:

- *Fase 2.1:* desde que VH1 está adelantando y se encuentra en el carril izquierdo, y aún la parte trasera del vehículo VH1 no ha superado la parte trasera del vehículo VH2.
- *Fase 2.2:* una vez que la parte trasera del vehículo VH1 haya superado al vehículo adelantado VH2.

Deben definirse las acciones a tomar una vez que el sistema haya decidido intervenir en la maniobra adelantamiento, antes de que el vehículo VH3 ponga en peligro la maniobra. En el siguiente apartado se explica el controlador borroso que emula el comportamiento humano en este tipo de situaciones, el cual actúa sobre los pedales del vehículo, acelerando o frenando, según sea lo más conveniente. Además se explica el algoritmo de decisión en función de la fase en que se encuentre la maniobra.

4. CONTROLADOR BORROSO PARA EL ADELANTAMIENTO

Con la experiencia previa de los conductores humanos en la maniobra de adelantamiento, se pueden definir los parámetros de control, las funciones de pertenencia y las reglas del controlador borroso. Uno de los primeros en emular la conducción humana utilizando controladores borrosos fue Sugeno (Sugeno and Nishida, 1985).

Con la lógica borrosa no es necesario conocer la dinámica completa de cada vehículo, ya que se emulan las acciones de los conductores, e.g.: girar un poco el volante a la derecha o pisar mucho el acelerador. La salida del controlador envía la posición a la cual debe llegar el volante y las diferentes referencias que deben seguir los pedales. 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, 1997) 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.

En nuestro algoritmo de control existen cuatro modos de conducción definidos: Conducción normal, control de cruceo adaptativo (ACC), adelantamiento y abortar adelantamiento, el cual se presenta en este trabajo. El primer modo contempla una conducción autónoma siguiendo una trayectoria predefinida. Éste se subdivide en modo de conducción en rectas y modo de conducción en curvas.

Cuando se detecta un vehículo en el camino a una velocidad menor, se activa el modo de conducción ACC. Una vez que se den las condiciones para el adelantamiento, se inicia el primer cambio de carril y, por último, si las condiciones del entorno varían se evalúa la posibilidad de abortar o terminar el adelantamiento. Cada modo de conducción tiene diferentes variables para el control del volante, freno y acelerador.

El control longitudinal, en vehículos sin cambio de marcha, se resume en la acción alternada entre el pedal del freno y el

acelerador. Esta acción debe hacerse de forma coordinada, ya que ambas acciones son contrarias.

Para realizar este control se define una velocidad de consigna, y el lazo de control se cierra con la velocidad real del vehículo, leída desde el tacómetro. El controlador borroso que gobierna el control longitudinal utiliza dos variables de entrada: el error de velocidad y la aceleración.

Se utilizan funciones de pertenencia de forma triangular y trapezoidal para las entradas, y salidas singleton, los detalles se explican en (Onieva *et al.*, 2009). El ciclo de control utiliza la frecuencia a la que el GPS envía los datos, esto es 10 Hz. Con estos datos se definen las variables de entrada del control lateral: el error angular y el error lateral. En los tramos rectos el ángulo de variación del volante está limitado para mantener el seguimiento de la trayectoria. Los detalles de las funciones de pertenencia utilizados se explican en (Naranjo *et al.*, 2005).

4.1 Controlador para el cambio de carril

Las principales diferencias entre los modos de conducción del controlador (modo recta y curva), es que cada uno utiliza diferentes funciones de pertenencia y reglas borrosas, en función de las condiciones de cada situación. En el cambio de carril el control longitudinal utiliza las mismas variables que las usadas en el modo de conducción normal y de adelantamiento. La diferencia está en el control lateral. En (Naranjo *et al.*, 2005) se muestran las funciones de pertenencia del control lateral.

Este controlador modifica la posición del volante, la velocidad angular esta fija en el máximo valor. Las funciones de pertenencia se han definido un poco estrechas, para así evitar cambios bruscos en la consigna de posición. Las reglas utilizadas se mencionan a continuación:

SI *Error Lateral Izquierda* ENTONCES *Posición Volante Derecha*

SI *Error Lateral Derecha* ENTONCES *Posición Volante Izquierda*

SI *Error Angular Izquierda* ENTONCES *Posición Volante Derecha*

SI *Error Angular Derecha* ENTONCES *Posición Volante Izquierda*

4.2 Controlador borroso para abortar el adelantamiento

El controlador borroso para abortar la maniobra de adelantamiento es el encargado de decidir, según el comportamiento del resto de vehículos, qué acciones tomar un vez que la maniobra de adelantamiento este en peligro debido a que viene un vehículo en sentido contrario. Este controlador sustituye al control longitudinal utilizado en los otros modos de conducción, ya que en maniobras de alto riesgo no es suficiente con cambiar la consigna de velocidad, es necesario actuar directamente sobre los actuadores con un controlador más rápido y eficiente. Para

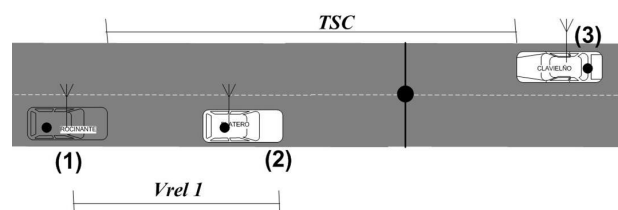


Figura 8. Variables de entrada al Controlador Borroso para Abortar el Adelantamiento

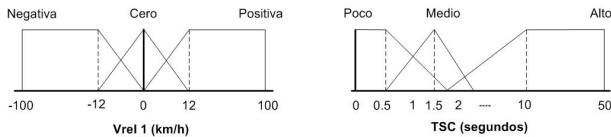


Figura 9. Funciones de pertenencia del controlador CBAA

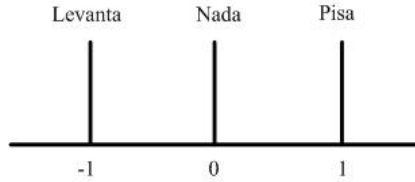


Figura 10. Salidas singleton del controlador CBAA

controlar el volante en el modo abortar el adelantamiento, se utilizan las mismas reglas del cambio de carril descritas en el punto anterior.

El controlador borroso para abortar adelantamiento (CBAA) utiliza dos nuevas variables de entrada: velocidad relativa 1 (V_{rel1}) y el tiempo de separación ante colisión (TSC). La primera es la velocidad relativa entre el vehículo VH1 y el VH2, y la segunda variable estima el tiempo que queda para que colisione el vehículo que viene en sentido contrario VH3 y el VH1.

En la figura 8 se muestra la relación entre los vehículos y las variables. Éstas serán las encargadas de emular el comportamiento humano en este tipo de maniobras. Por ejemplo, si el TSC disminuye el vehículo vuelve rápidamente al carril derecho, frenando si está en alguna fase temprana como fase 1 o fase 2.1, y dependiendo de las condiciones. O, por el contrario, acelerando si está en fase 2_2 o fase 3. En los experimentos se probarán ambos casos. En la ecuación 8 se muestra el cálculo de TSC, donde D_{13} es la distancia en metros entre los vehículos VH1 y VH3. El valor TSC es siempre positivo y está medido en segundos.

$$TSC = \frac{(D_{13})}{(V_{VH1} + V_{VH3})/3,6} \quad (8)$$

La figura 9 muestra las funciones de pertenencia de la velocidad relativa y el tiempo de seguridad ante colisión, obtenidas experimentalmente, en función de los tiempos y velocidades estimadas en maniobras de adelantamiento manual. El controlador usa dos variables de entrada y dos de salida, una para el acelerador y otra para el freno. Las etiquetas singleton (-1, 0 y 1) de las salidas del controlador son levanta, nada y pisa, para ambos actuadores (figura 10).

El controlador da prioridad al acelerador con respecto al freno, para evitar que los dos pedales se activen al mismo tiempo. Esto es, en un mismo ciclo de control no se envían señales a los dos actuadores a la vez. A continuación se listan las dieciocho reglas combinadas en sintaxis ORBEX. Todas ellas son bastante intuitivas y están basadas en la experiencia humana.

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES acelerador **Levanta**

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES acelerador **Levanta**

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES acelerador **Levanta**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES acelerador **Levanta**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES acelerador **Nada**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES acelerador **Nada**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES acelerador **Levanta**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES acelerador **Nada**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES acelerador **Pisa**

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES freno **Pisa**

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES freno **Pisa**

SI TSC *Poco* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES freno **Nada**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES freno **Nada**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES freno **Levanta**

SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES freno **Levanta**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES freno **Nada**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES freno **Levanta**

SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES freno **Levanta**

4.3 Arquitectura de control

Para poder lograr una buena conducción es preciso determinar en que momento utilizar cada modo de conducción. Esta decisión debe ser secuencial y estructurada. La figura 11 muestra un diagrama de la arquitectura de control implementada en nuestro vehículo autónomo.

El primer modo de control es el modo *Conducción Normal*. Éste se activa cuando el vehículo sigue una trayectoria predefinida sin ningún vehículo de frente. En este modo de conducción el vehículo siempre circula en el carril derecho.

Nuestro vehículo puede detectar a otros vehículos dentro del alcance de la red aérea, si el vehículo detectado va por delante y a menos velocidad, se selecciona el segundo modo de conducción, el ACC.

Si se cumplen las condiciones para adelantar, el vehículo comienza la maniobra. Los tiempos $T_{seguridad}$ y $T_{recorte}$, descritos anteriormente determinan si el vehículo puede completar la maniobra adelantamiento normalmente. Si se aproxima algún vehículo en sentido contrario o el vehículo adelantado aumenta su velocidad repentinamente, el vehículo entra en el último mo-

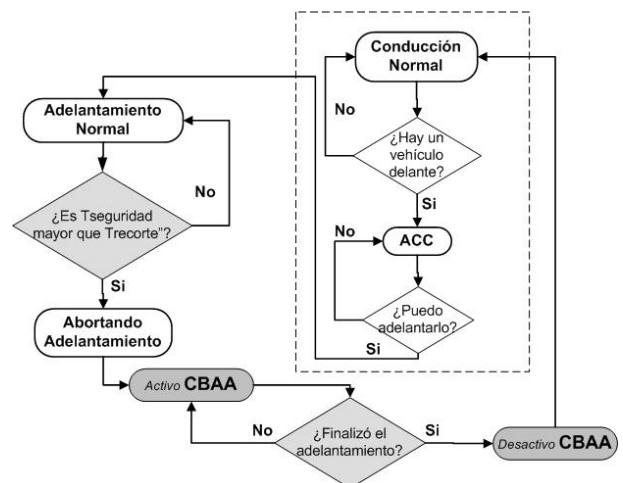


Figura 11. Diagrama de control con todos los modos de conducción. Algoritmo para la maniobra de abortar adelantamiento

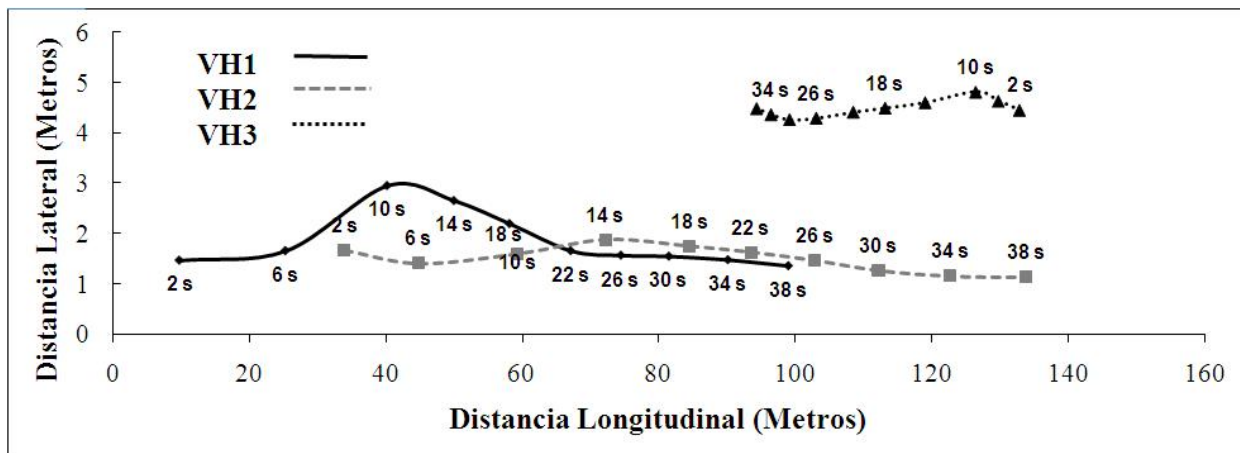


Figura 12. Abortando adelantamiento en fase 1

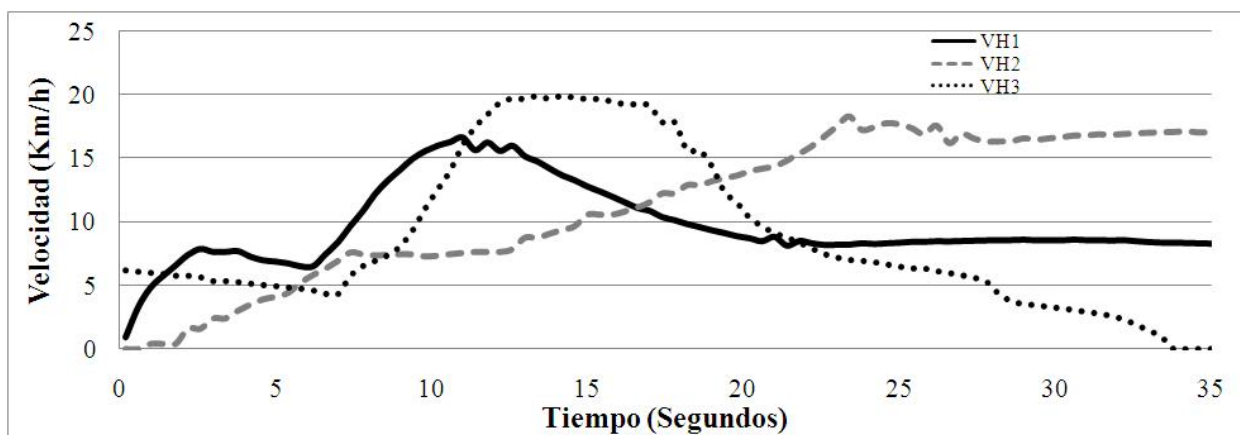


Figura 13. Velocidades de los tres vehículos en la fase 1

do de conducción, el de abortar el adelantamiento y se activa el controlador CBAA. Éste controlador solo actúa sobre el control longitudinal.

El control lateral es el mismo que para el cambio de carril, pero, en función de la fase en la que se encuentre el vehículo al activar este modo, se procederá a mantener el carril izquierdo o a cambiar nuevamente al carril derecho.

Esencialmente el controlador CBAA reduce o aumenta la velocidad del vehículo que adelanta, en función de las condiciones del entorno, para que pueda volver de forma segura al carril derecho y evitar la colisión con el vehículo que viene en sentido contrario. El controlador propuesto resuelve de forma segura la situación de adelantamiento cuando viene un vehículo en sentido contrario. Éste se inactiva una vez que el vehículo vuelve al carril derecho.

5. EXPERIMENTOS

La arquitectura de control descrita en el punto anterior fue probada con tres vehículos reales, instrumentados con un GPS y un sistema de comunicaciones inalámbricas. Se realizaron 3 experimentos:

1. Con 2 vehículos realizando un adelantamiento normal.
2. Con tres vehículos, disminuyendo la velocidad del vehículo VH1 (Abortar el adelantamiento).

3. Con tres vehículos, aumentando la velocidad del vehículo VH1 (Completando a mayor velocidad el adelantamiento).

En la figura 14 se muestran las velocidades realizando ACC y adelantamiento entre 2 vehículos. La grafica negra muestra la velocidad del vehículo VH1 y la grafica gris la del vehículo VH2, además se aprecian las fases de la maniobra en cada instante de tiempo. Entre los 15 y 30 segundos el vehículo VH1 va en modo ACC hasta que las condiciones aconsejan empezar el adelantamiento y aumenta su velocidad hasta llegar a los 16

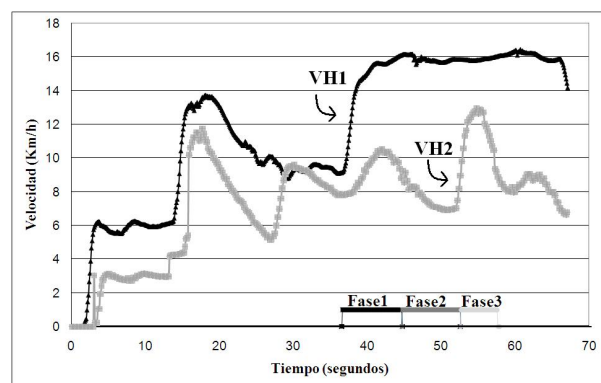


Figura 14. Velocidades y fases del adelantamiento entre dos vehículos

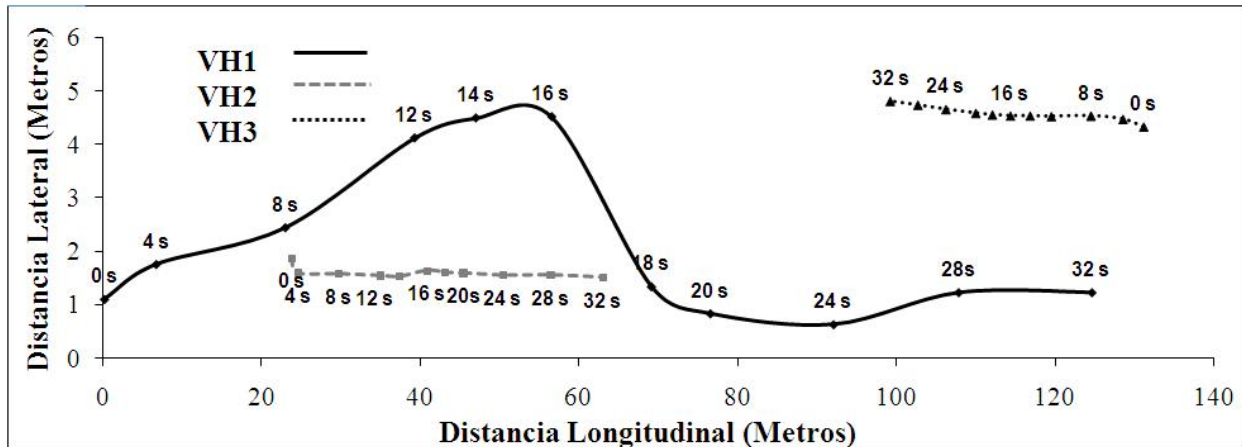


Figura 15. Abortando adelantamiento en fase 2_2

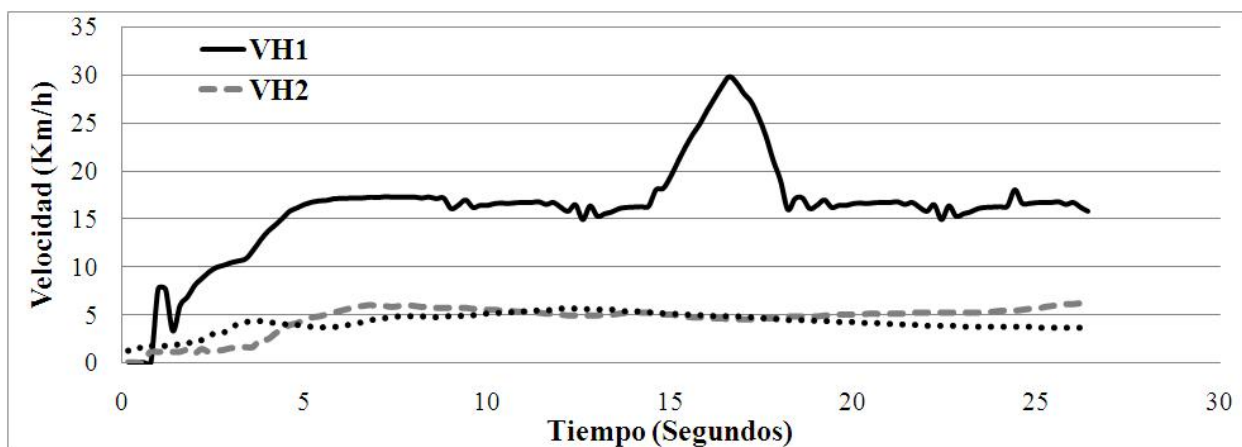


Figura 16. Velocidades de los tres vehículos en la fase 2_2

km/h. Las bandas que indican las tres fases por las que pasa el vehículo se deshabilitan una vez que ha culminado la maniobra.

Para los experimentos con 3 vehículos, primero se muestran la posición de los vehículos involucrados en cada instante de tiempo, con saltos de 4 segundos (figuras 12 y 15). Luego se muestra un gráfico con la evolución de la velocidad de cada vehículo en función del tiempo (figuras 13 y 16).

Los siguientes experimentos usan tres vehículos posicionados estratégicamente para provocar, en nuestras pistas de prueba, las diferentes fases de la maniobra de abortar el adelantamiento. En la figura 8 se mostró la posición inicial de los vehículos para los siguientes casos de uso: abortar en fase 1 y abortar en fase 2.2. La idea es probar el comportamiento del controlador CBAA, tanto para reducir la velocidad y volver al carril derecho, así como para terminar de superar al vehículo VH2, aumentando la velocidad hasta terminar la maniobra de adelantamiento, si el entorno lo permite.

5.1 Abortar el adelantamiento en Fase 1 (Disminuye velocidad)

La figura 12 muestra los experimentos realizados para abortar la maniobra de adelantamiento en la fase 1. En cada punto se muestra el instante de tiempo de la maniobra y la ubicación de cada vehículo. A los 12 segundos del comienzo de la maniobra, se observa cómo el vehículo VH1 empieza a cambiar al carril izquierdo, sin embargo, al activarse la rutina de abortar, reduce progresivamente su velocidad, volviendo de forma segura

al carril derecho. La maniobra se aborta ya que el vehículo VH3 aumenta considerablemente su velocidad, haciendo que el tiempo de seguridad aumente en comparación con el tiempo de recorte.

En la figura 13 se muestran las velocidades de los tres vehículos, en función del tiempo. El vehículo VH1 empieza la maniobra llegando a 16 km/h, y luego reduce su velocidad hasta un valor inferior a la de VH2. A los 8 segundos del comienzo de la maniobra el vehículo VH3 aumenta considerablemente su velocidad, el vehículo VH2 también la hace a partir del instante 15, obligando al vehículo VH1 a que aborte la maniobra y vuelva al carril derecho.

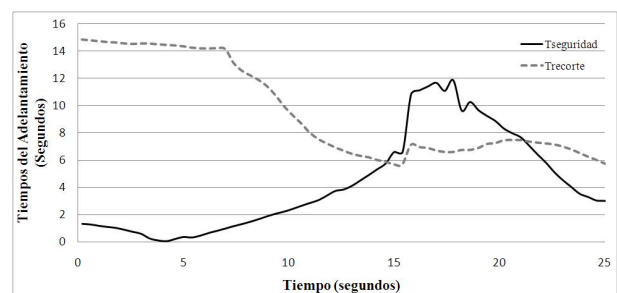


Figura 17. Tiempos Tseguridad y Trecorte en la fase 1

La evolución de los tiempos $T_{seguridad}$ y $T_{recorte}$ se muestra en la figura 17. Se observa que al principio de la maniobra el tiempo de recorte es mayor que el de seguridad, pero a medida que el vehículo VH3 se aproxima, el tiempo de seguridad aumenta hasta que supera al de recorte, activando el controlador para abortar el adelantamiento, alrededor de los 11 segundos. Dado que el vehículo VH1 reduce su velocidad, el tiempo $T_{seguridad}$ deja de crecer. Aunque, después de la primera activación, no se vuelve a considerar el valor de estos tiempos, hasta que el vehículo haya regresado al carril derecho y vuelva a reevaluar la maniobra de adelantamiento.

5.2 Abortar el adelantamiento en Fase 2.2 (Aumenta Velocidad)

En el experimento anterior, el vehículo VH1 redujo su velocidad para volver de forma segura al carril derecho, detrás del vehículo VH2. En la figura 15 se muestra como, en fase 2_2, el vehículo VH1 termina la maniobra de adelantamiento, aumentando su velocidad, debido a que se aproximaba el vehículo VH3 en sentido contrario, pero esta vez a poca velocidad. En este caso el algoritmo de control permite mantener en el carril izquierdo al vehículo VH1, hasta que rebasa por completo al vehículo VH2 y vuelva al carril derecho. En este experimento el vehículo VH3 se colocó a mayor distancia, unos 135 metros de separación, para permitir al vehículo VH1 empezar el adelantamiento.

La figura 16 muestra la velocidad de cada vehículo en la maniobra. A partir del segundo 14 el vehículo VH1 acelera hasta llegar a los 30 km/h. Una vez en el carril derecho, reduce su velocidad hasta los 16 km/h, correspondiente a la conducción normal. En este caso, el controlador decidió con las condiciones del entorno aumentar la velocidad para completar la maniobra de adelantamiento.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una nueva arquitectura de control de vehículos autónomos, utilizando controladores borrosos que toman como modelo la conducción llevada a cabo por humanos en maniobras de alto riesgo, y según el modo de conducción en el que se encuentre. Se consideraron adelantamientos con dos y tres vehículos en carreteras de doble sentido, y con un vehículo circulando en sentido contrario.

La rutina de abortar adelantamiento fue probada, mostrando buenos resultados al momento de decidir, en función de las condiciones del entorno, cuando volver al carril derecho, y si acelerar o frenar en función del tiempo hábil para evitar una colisión frontal. El controlador propuesto para la manobra de adelantamiento con tres vehículos, permite solucionar de forma rápida y segura el problema de indecisión que presentan los conductores cuando se encuentran en la situación descrita.

Los resultados muestran que con un algoritmo sencillo, y a través del cálculo de los tiempos $T_{seguridad}$ y $T_{recorte}$, puede conocerse cuando abortar una maniobra de adelantamiento. En este punto, la seguridad para volver al carril derecho ha sido la premisa de diseño. La definición de este algoritmo de decisión es la aportación más importante de este trabajo.

Por otra parte, es importante indagar en nuevas tecnologías para la comunicación entre vehículos. Para ello el grupo AUTOPIA se está planteando utilizar otros sistemas de comunicación, para mejorar los actualmente instalado. Tecnologías como Wimax,

Zigbee o RFID están planteadas para futuras aplicaciones en el proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos: TRANSITO (Coordinación Local entre Vehículos e Infraestructuras), TRA 2008-06602-C03-01; GUIADE (Guiado automático de vehículos de transporte público mediante percepción multimodal para mejorar la eficiencia), GUIADE P9-08 y MARTA (Movilidad y Automoción con Redes de Transporte Avanzadas).

REFERENCIAS

- Alonso, J., Jiménez Gil J., Naranjo J.E., Ignacio Suárez J. and Vinagre B. (2007). Cooperative maneuver study between autonomous cars: Overtaking. In: *EUROCAST, Palmas de Gran Canarias, Spain*.
- Barrick, D. (1962). Automatic steering techniques. *IRE Inter. Conv. Rec.* **10**, 166–178.
- DGT (2008). Balance de seguridad vial 2008, reporte técnico, ministerio del interior.
- García, R., de Pedro T. y Roselli A. (1997). Estrategias borrosas para pilotos automáticas. In: *3 Jornadas Iberoamericanas de Automáticas, Cartagena de Indias, Colombia*.
- Hessburg, T. and M. Tomizuka (1994). Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. **14**(4), 55–63.
- Jula, H., Kosmatopoulos E. B. and Ioannou P. A. (2000). Collision avoidance analysis for lane changing and merging. **49**(6), 2295–2308.
- Kammel, S. and Pitzer, B., S. Vacek, J. Schroeder, C. Frese, M. Werling and Goebel M. (2007). Team annieway technical system description. *Technical Report in DARPA Urban Challenge*.
- Milanés, V., E. Onieva, J. Pérez, T. de Pedro and C González (2009). Control de velocidad adaptativo para entornos urbanos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
- Motemerlo, M. (2008). Junior: The stanford entry in the urban challenge. In: *Journal of field Robotics*.
- Naranjo, J. E., Gonzalez C., Garcia R., de Pedro T. and Haber R. E. (2005). Power-steering control architecture for automatic driving. **6**(4), 406–415.
- Ngai, D. C. K. and N. H. C. Yung (2007). Automated vehicle overtaking based on a multiple-goal reinforcement learning framework. In: *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC 2007*. pp. 818–823.
- Onieva, E., Milanés V., González C., de Pedro T., Perez J. and Alonso J. (2009). Throttle and brake pedals automation for populated areas. *ROBOTICA*.
- Pérez, J., Gonzalez C., Milanés V., Onieva E., Godoy J. and de Pedro T. (2009). Modularity, adaptability and evolution in the autopia architecture for control of autonomous vehicles. In: *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009*. pp. 1–5.
- Pérez, J., Onieva E. de Pedro T. García R. Alonso J. Milanés V. y González C. (2008). Comunicaciones entre vehículos autónomos en tiempo real para maniobras de alto riesgo. *XXIX Jornadas de Automática*.
- Rajamani, R., Han-Shue Tan, Boon Kait Law and Wei-Bin Zhang (2000). Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons. **8**(4), 695–708.

- Sakaguchi, T., A. Uno, S. Kato and S. Tsugawa (2000). Cooperative driving of automated vehicles with inter-vehicle communications. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV 2000*, pp. 516–521.
- Shimakage, M., Satoh S., Uenuma K. and Mouri H. (2002). Design of lane-keeping control with steering torque input. *JSAE Review* **23**, 317–323.
- Smith, D.E. and J.M. Starkey (1995). Effects of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: Model development, validation and comparison. *Vehicle System Dynamics* **24**, 163–181.
- Sugeno, M. and M. Nishida (1985). Fuzzy control of model car. *Fuzzy Sets and Systems* **16**, 103–113.
- Uno, A., Sakaguchi T. and Tsugawa S. (1999). A merging control algorithm based on inter-vehicle communication. In: *Proc. IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 783–787.