

Adelantamiento con vehículos autónomos en carreteras de doble sentido

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

*Centro de Automática y Robótica (CAR), UPM-CSIC, Carretera de Campo Real, km. 0.200, 28500 La Poveda, Arganda del Rey, Madrid, España
(e-mail: {joshue.perez, vicente.milanes, javier.alonso, enrique.onieva, teresa.pedro}@car.upm-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 cruce adaptativo (ACC) y 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. Copyright © 2010 CEA.

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 adquiere especial interés (Jula, 1999). Si consideramos el caso de una carretera de doble sentido, la dificultad se incrementa considerablemente y, por ejemplo en el caso de España, el 91 % de las carreteras son de doble sentido.

El adelantamiento es una maniobra de alto riesgo, ya que las decisiones que se toman en su ejecución no dependen únicamente del propio estado del vehículo, sino de otros muchas variables como los factores ambientales, las condiciones del entorno, la distancia del vehículo a curvas e intersecciones, la posición y velocidad de los otros vehículos, etc.. Además la velocidad de los vehículos involucrados en un adelantamiento puede variar repentinamente. Mención aparte merece la dinámica del vehículo, sobretodo en el contacto entre el neumático y el suelo (Smith, 1995) que condiciona mucho la ejecución de la maniobra.

La acción básica para realizar un adelantamiento es el cambio de carril. En (Jula, 1999) se definen las diferentes situaciones para realizar un cambio de carril seguro. En (Rajamani, 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, 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, 2002), para seguir la referencia.

Por otra parte, se necesitan comunicaciones fiables 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 (Uno, 1999; Sakaguchi, 2000).

Otros autores han simulado adelantamientos con diferentes técnicas, como aprendizaje reforzado con múltiple objetivo (Ngai, 2007). En nuestro grupo se desarrolló un simulador para verificar diferentes estrategias de toma de decisiones en maniobras de adelantamiento con tres vehículos (Alonso J., 2007). A partir de un módulo de realidad virtual y de un modelo simplificado del vehículo se construyó un simulador en el cual el vehículo transitaba por las diferentes fases del adelantamiento mediante un diagrama de flujo, utilizando como controlador base un módulo de inferencia borrosa. Si bien los controladores borrosos obtenidos no son directamente trasladables a los vehículos por

la gran diferencia entre un vehículo real y su modelo simplificado, las estrategias de control a alto nivel si fueron extrapoladas del diagrama de flujo del simulador.

En el *DARPA Urban Challenge*, la competición más importante en la conducción de vehículos autónomos (Kammel, 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 láseres 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, 2009).

Los controladores borrosos han sido utilizados ampliamente en el control de vehículos autónomos (Yager R., 1995; Driankov, 2001; Fraichard, 2001). Desde que Sugeno publicase en 1985 sus trabajos sobre el control de vehículos autónomos (Sugeno, 1984, 1985), los motores de inferencia borrosa son una alternativa viable para realizar esta labor. El grupo AUTOPIA ha elegido este tipo de controladores por múltiples razones, la facilidad de transferir el conocimiento experto de los diseñadores en reglas sencillas, los buenos resultados que aporta sin necesidad de disponer de un modelo detallado del vehículo, su fácil interpretación y depuración.

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.

El resto del artículo se divide como sigue: 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 conducidos en modo manual confiere generalidad al experimento aunque lo dificulta, pues los vehículos manuales hacen que el escenario de la maniobra sea impredecible. A continuación se resumen las características de cada uno de los vehículos y de la zona de conducción.

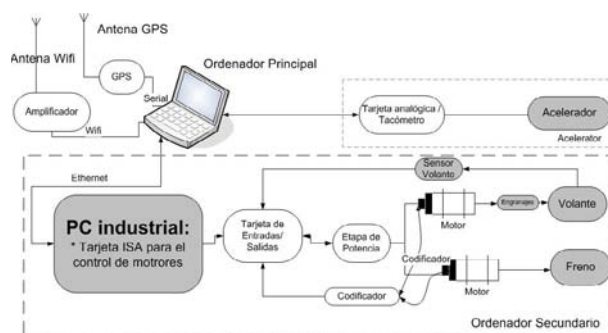


Figura 1. Arquitectura de control implementada

2.1 Vehículo autónomo.

Es una furgoneta eléctrica con una dirección hidráulica, un sistema de frenos convencional y un acelerador que funciona como un potenciómetro. El sistema de control lee del tacómetro la velocidad instantánea, mientras que la posición se obtiene, con precisión centimétrica de un receptor GPS diferencial. La acción sobre el volante se ejerce a través de un motor acoplado a la barra de dirección del vehículo y el control lateral actúa sobre el freno y el acelerador de forma coordinada.

La arquitectura de control separa dos niveles y se implementa en dos ordenadores conectados en red (Pérez, 2009). En el primero se realiza el tratamiento de los datos sensoriales, el control de alto nivel y la acción sobre el acelerador y el segundo se encarga del control de bajo nivel de los motores del freno y del volante, según muestra la figura 1.

2.2 Vehículos no autónomos

Son vehículos convencionales (Figura 2) instrumentados con un PC portátil, un GPS y un sistema de comunicaciones. De esta forma, aunque se conducen manualmente, pueden proporcionar su posición, velocidad y otras variables de interés a los vehículos involucrados en la maniobra.

2.3 Entorno de pruebas y comunicaciones.

El Centro de Automática y Robótica (CAR, UPM-CSIC) dispone de un circuito de pruebas (Figura 3). Los experimentos de adelantamiento con tres vehículos se realizaron en el tramo recto más largo del circuito, de unos 220 metros, lo cual limita la velocidad máxima a 30 km/h.

En la comunicación entre vehículos se utilizan tarjetas inalámbricas conectadas a una red local Wi-Fi. Para el adelantamiento con tres vehículos se implementó el esquema de comunicación que se muestra en la figura 4. El enlace entre vehículos es punto a punto, mientras que el enlace entre estación base y vehículo tiene una configuración servidor-cliente. En (Pérez, 2008) se detalla el sistema de comunicación implementado.



Figura 2. Vehículos no autónomos en las instalaciones del CAR

3. MANIOBRA DE ADELANTAMIENTO.

El adelantamiento entre vehículos consiste en que uno de ellos rebasa la posición de otro más lento que se encuentra en su trayectoria. El adelantamiento más sencillo ocurre en carreteras de un solo sentido, y consiste esencialmente en dos cambios de carril del vehículo que adelanta (VH1), empieza con un cambio al carril izquierdo y termina con una vuelta al carril derecho, una vez se haya rebasado el vehículo adelantado (VH2).

Para comenzar un adelantamiento se deben cumplir ciertas condiciones, entre ellas:

- Ambos vehículos VH1 y VH2 deben circular por el mismo carril y en un segmento recto de longitud suficiente para completar la maniobra.
- La velocidad del vehículo VH1 debe ser mayor que la del vehículo VH2.
- El carril izquierdo debe estar libre, o si se aproxima algún vehículo debe haber tiempo suficiente para completar el adelantamiento.

La figura 5 muestra las tres fases del adelantamiento, las distancias que recorre el vehículo VH1 en las fase 1 y 3 son A y A' respectivamente. Para el adelantamiento sin tráfico de frente (Naranjo, 2003) solo es necesario considerar la distancia A, pues al no existir tráfico en el sentido contrario, no tiene sentido introducir la distancia A'. Sin embargo, como la dinámica del vehículo es diferente en cada fase, en este trabajo introducimos distancia A' y explicamos su utilidad en caso de que sea necesario abortar el adelantamiento.



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

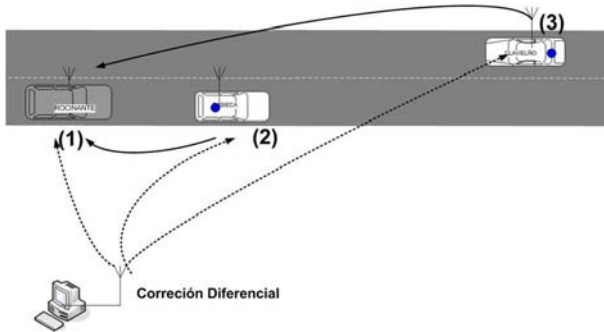


Figura 4. Comunicación entre vehículos y corrección diferencial

3.1 Maniobra de adelantamiento con tres vehículos.

La maniobra de adelantamiento descrita en el punto anterior solo ocurre en condiciones ideales, es decir, sin otros vehículos involucrados. En una situación normal el conductor (en este caso el controlador del vehículo) no puede conocer a priori el comportamiento de los vehículos vecinos. Así, una vez iniciado el adelantamiento, el vehículo VH2 puede acelerar repentinamente o aparecer otro vehículo en sentido opuesto (VH3).

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 volver a su posición inicial. Para ello es necesario conocer en todo momento la posición y la velocidad de todos los vehículos involucrados.

Un adelantamiento seguro exige tomar decisiones que garanticen que el vehículo VH1 tenga tiempo suficiente para volver al carril derecho en cualquier momento y fase de la maniobra, sobretodo en el caso que se detecte un vehículo que se acerca 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 el vehículo VH3 y por tanto tiene tiempo para volver al carril derecho, es decir, si hay espacio libre suficiente para completar el adelantamiento.

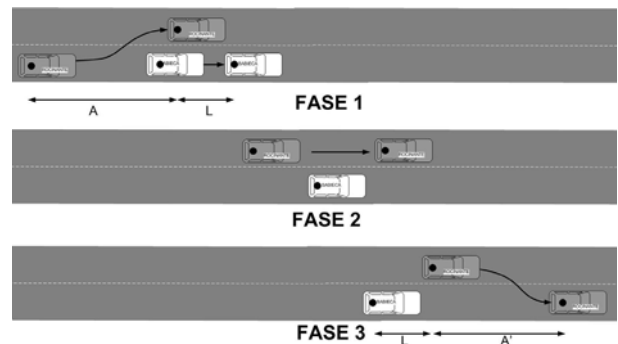


Figura 5. Fases del Adelantamiento.

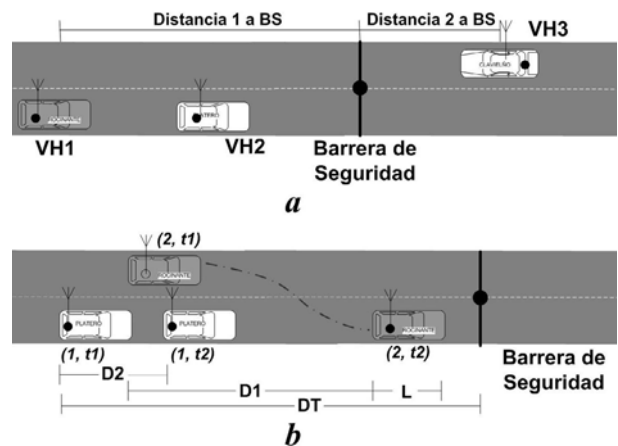


Figura 6. Posición inicial y final de vehículos en fase 3 del adelantamiento

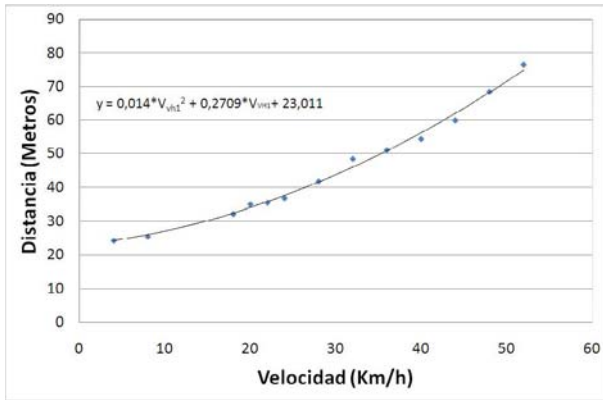


Figura 7. Distancia para el cambio de carril en función de la velocidad de VH1

Supongamos que la fase 3 del adelantamiento se inicia en el instante t_1 -cuando el vehículo VH1 está centrado 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 el intervalo, $T = t_2 - t_1$, el vehículo VH1 recorrería una distancia D_1 , suponiendo que 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 tanto la posición de la barrera de seguridad viene dada por la ecuación siguiente, 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 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:

$$D_1 = 0,014V_{VH1}^2 + 0,271V_{VH1} + 23,01 \quad (2)$$

Además, suponiendo que la velocidad media de VH2 en la fase 3 es V_{VH2} , tenemos que $D_2 = V_{VH2} * T$ y $T = D_1/V_{VH1}$, luego la ecuación 1 la podemos reemplazar por:

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

Si un tercer vehículo circula en sentido contrario, consideremos la velocidad relativa de VH1 respecto de VH2 y VH3:

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

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

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 sus velocidades relativas se puede determinar la acción más segura, esto es acabar el adelantamiento ó abortarlo volviendo a la situación inicial. En efecto, sea DB_1 y DB_3 la distancia entre los vehículos VH1 y VH3 a la barrera de seguridad, respectivamente; y sea T_S - tiempo de seguridad- y T_R -tiempo de recorte- el tiempo que tarda VH1 y VH3, respectivamente, en llegar a la barrera de seguridad, tenemos:

$$T_S = \frac{(DB_1)}{V_{VH1}} \quad (6)$$

$$T_R = \frac{(DB_3)}{V_{VH2}} \quad (7)$$

Antes de continuar detallando el sistema de decisión y control borroso para el adelantamiento con tres vehículos, conviene partir en dos la fase 2 de la maniobra; la fase en la que el vehículo que adelanta VH1 circula por el carril izquierdo o, en otras palabras, el intervalo de tiempo desde que VH1 está alineado con la directriz del carril izquierdo y hasta que VH1 rebasa al vehículo VH2. Las tres fases de la figura 5 son suficientes para un adelantamiento entre dos vehículos, pero si un tercer vehículo circula en sentido contrario deben considerarse las fases 2.1 y 2.2 separadas por el instante en el que la parte trasera de ambos vehículos VH1 y VH2 están sobre la misma perpendicular a la directriz de la carretera.

4. CONTROLADOR BORROSO PARA EL ADELANTAMIENTO

Con la experiencia previa de los conductores humanos se pueden definir los parámetros de control, las funciones de pertenencia y las reglas del control borroso para la maniobra de adelantamiento. En (Sugeno, 1985) aparece un trabajo pionero en utilizar control borroso para emular la conducción humana. Sabemos que la aplicación de la lógica borrosa aplicada al guiado automático no requiere conocer la dinámica completa de los vehículos, ya que se emulan las acciones de los conductores. Al comienzo del programa AUTOPIA optamos por controladores borrosos tipo TSK (Takagi-Sugeno-Kang) con consecuentes singleton, (Kang, 1998) opción que ha sido avalada por los resultados obtenidos, entre otros motivos porque permite tomar decisiones de control en tiempo real.

Para fijar ideas digamos que nuestro controlador básico combina un control lateral y un control longitudinal (ACC) que, a su vez actúa, de forma coordinada sobre el acelerador y el freno. Si durante la marcha se alcanza a otro vehículo más lento y se dan las condiciones, se inicia la maniobra de adelantamiento. Por último, si durante el adelantamiento las condiciones que lo posibilitaron fallan, se activa la maniobra de interrupción del adelantamiento (figura 10).

4.1 Controlador para el cambio de carril

En el cambio de carril el control longitudinal es un control de cruce (CC) que mantiene la velocidad convenida. El control de la dirección solo tiene una salida, la posición del volante y no se considera la velocidad angular, que se fija en el valor máximo; además las funciones de pertenencia se definen de forma que el giro del volante sea suave. En (Naranjo, 2003) se muestran las funciones de pertenencia del control lateral. Las reglas de control son las siguientes:

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 (CBAA) aborta la maniobra de adelantamiento si se detecta la llegada de un vehículo en sentido contrario. Esencialmente el CBAA reduce o aumenta la velocidad del vehículo que adelanta en función de las posiciones y velocidades de los vehículos del entorno, para que pueda volver

de forma segura al carril derecho. Éste controlador sustituye al control longitudinal utilizado en los otros modos de conducción, ya que en maniobras de alto riesgo hay que cambiar la consigna de velocidad de forma muy rápida y eficiente. Para controlar el volante se utilizan las mismas reglas del cambio de carril.

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

El controlador CBAA utiliza dos nuevas variables de entrada: la velocidad relativa V_{rel1} del vehículo VH1 respecto del vehículo VH2 (V_{rel1}) y el tiempo de separación ante colisión TSC (ecuación 8) que queda para que colisionen los vehículos que circulan en sentidos opuestos VH1 y VH3, donde D_{13} es la distancia en metros entre ambos vehículos.

En la figura 9 se muestran las funciones de pertenencia de los valores lingüísticos que toman las variables V_{rel1} y TSC. Para imitar el modo de conducción humano se definen tres valores lingüísticos para cada una de las entradas del controlador CBAA. A continuación detallamos estos valores y su significado.

- Valores lingüísticos de la variable V_{rel1} , velocidad relativa entre el vehículo VH1 y VH2 (ecuación 4): “Negativa” refleja la situación en la que, durante el adelantamiento, el vehículo VH2 acelera hasta superar la velocidad del vehículo VH1. Éste debe retornar al carril derecho y abortar la maniobra. “Cero” refleja la situación en la que ambos vehículos llevan velocidades similares. En función del valor de TSC el vehículo VH1 bien acelera para finalizar la maniobra o decelera para volver a situarse tras el vehículo VH2. “Positiva” refleja la situación más habitual en la maniobra de adelantamiento, en la que la velocidad del vehículo VH2 es inferior a la del vehículo VH1.
- Valores lingüísticos de la variable TSC, tiempo de separación ante colisión: “Alto” corresponde a las situaciones en las que no hay tráfico de frente o, si lo hay el vehículo que circula por el carril contrario está lo suficientemente alejado para no influir en la maniobra. “Bajo” trata de agrupar las situaciones en las que un vehículo circula por el carril contrario y se encuentra tan cerca que pone en peligro la maniobra de adelantamiento. “Medio” refleja las situaciones dudosas en las que el valor real de la variable V_{rel1} determinará la acción a tomar.

Finalmente conviene decir que para establecer los parámetros de las funciones de pertenencia de los valores lingüísticos se reprodujeron posibles situaciones que pueden ocurrir durante un adelantamiento en una vía de doble sentido con tres vehículos conducidos manualmente. Así, se realizaron pruebas en las que se frenaba el vehículo que adelanta para abortar la maniobra o se aceleraba para finalizar de forma segura. Posteriormente,

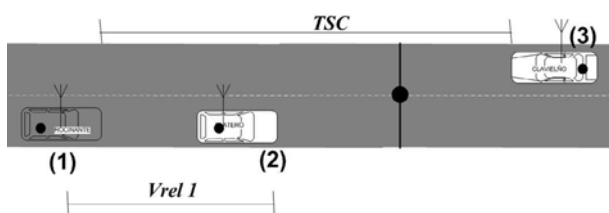


Figura 8. Variables de entrada al Controlador Borroso para Abortar el Adelantamiento (CBAA)

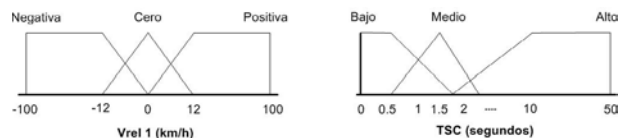


Figura 9. Funciones de pertenencia del controlador CBAA

un análisis de los valores obtenidos del TSC y V_{rel1} permitió determinar los límites de las funciones de pertenencia. Nótese que un ajuste más fino de los parámetros de las funciones de pertenencia así obtenidos, ya sea mediante algoritmos genéticos o sistemas neuro-borrosos, es innecesario para el alcance que pretende dar este trabajo. El motivo es que el comportamiento de vehículos guiados por conductores humanos no es predecible y cambia totalmente de un experimento a otro. En cualquier caso, los resultados experimentales demuestran que la elección de las reglas así como de las funciones de pertenencia es acertada. Las etiquetas singleton (-1, 0 y 1) de las salidas del controlador son levanta, mantiene y pisa, para ambos actuadores.

Las reglas de control se escriben a continuación, se puede observar que las salidas de control evitan acciones simultáneas y opuestas sobre los pedales.

- SI TSC *Bajo* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES acelerador **Levanta**
- SI TSC *Bajo* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES acelerador **Levanta**
- SI TSC *Bajo* 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 **Mantiene**
- SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES acelerador **Mantiene**
- SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES acelerador **Levanta**
- SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES acelerador **Mantiene**
- SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES acelerador **Pisa**
- SI TSC *Bajo* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES freno **Pisa**
- SI TSC *Bajo* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES freno **Pisa**
- SI TSC *Bajo* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES freno **Mantiene**
- SI TSC *Medio* Y V_{rel1} *Negativa* ENTONCES freno **Mantiene**
- 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 **Mantiene**
- SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *cer0* ENTONCES freno **Levanta**
- SI TSC *Alto* Y V_{rel1} *Positiva* ENTONCES freno **Levanta**

4.3 Diagrama de estados

La figura 10 muestra el diagrama de estados implementado en el controlador de nuestro vehículo autónomo. El primer estado es el de conducción con ACC. En este modo de conducción el vehículo circula en el carril derecho.

Si se cumplen las condiciones para adelantar, el vehículo comienza la maniobra. Los tiempos T_S y T_R , 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, VH1 entra en el estado de abortar el adelantamiento y se activa el controlador CBAA. Éste contro-

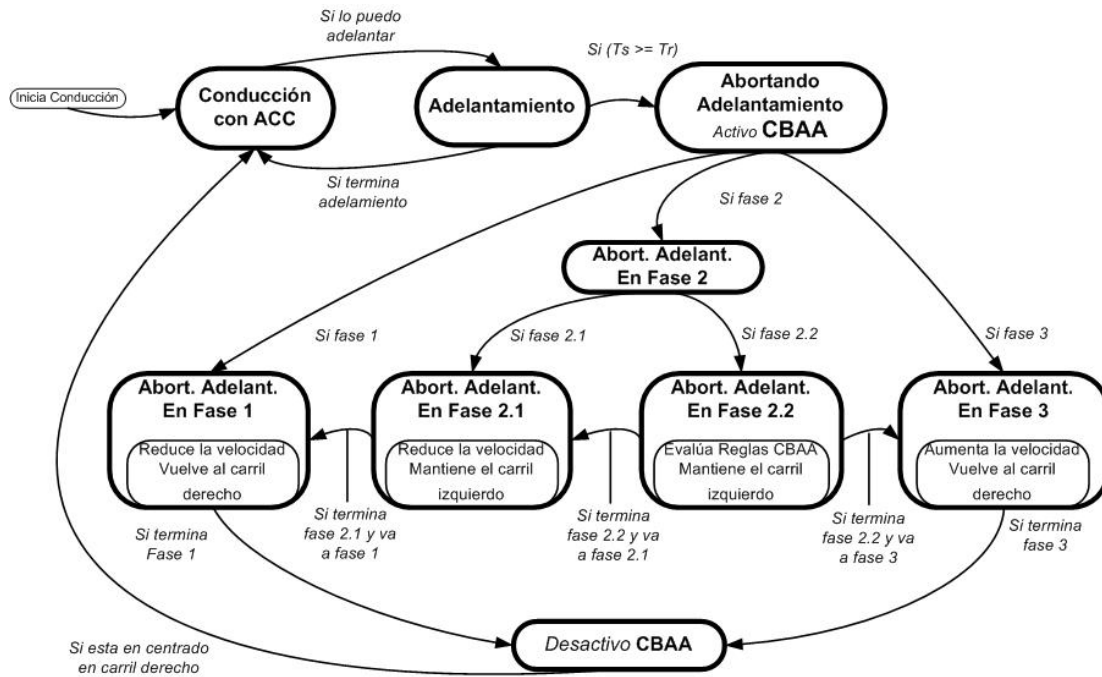


Figura 10. Diagrama de estados con todos los modos de conducción. Algoritmo para la maniobra de abortar adelantamiento

lador 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. Esto se ve reflejado en la figura 10. Si el vehículo se encuentra en fase 2 o fase 3, el controlador CBAA puede evaluar las condiciones para decidir si aumenta la velocidad o la reduce para completar la maniobra. Si el tiempo TSC es alto y la velocidad V_{rel1} positiva, el vehículo puede acelerar hasta acabar el adelantamiento. La fase 2 se divide en dos (respetando la terminología utilizada en trabajos previos (Naranjo, 2003), ya que las acciones del CBAA son distintas en cada una. En fase 2.1 el CBAA reduce la velocidad y el vehículo mantiene el carril izquierdo hasta que el vehículo VH2 pase delante y VH1 pueda volver al carril derecho. Si el vehículo VH1 está en la fase 2.2, el CBAA puede pasar a fase 3, volver al carril derecho y terminar la maniobra exitosamente. El controlador CBAA se inactiva una vez que el vehículo vuelve al carril derecho.

5. EXPERIMENTOS

El esquema de control descrito ha sido probado en tres casos con vehículos reales:

1. Adelantamiento sin tráfico en sentido opuesto.
2. Interrupción del adelantamiento disminuyendo la velocidad del vehículo que adelanta VH1.
3. Finalización del adelantamiento aumentando la velocidad del vehículo que adelanta VH1.

La figura 11 muestra la evolución de las velocidades del vehículo guía y el vehículo automático durante una maniobra de

adelantamiento sin tráfico frontal así como las transiciones entre las distintas fases del adelantamiento. Durante los primeros 35 segundos, el vehículo automático sigue al vehículo guía en modo ACC. Cuando se verifican las condiciones para adelantar, el controlador entra en funcionamiento activando la “Fase 1”. En ese instante la velocidad del vehículo automático se incrementa considerablemente para rebasar al vehículo guía. El tiempo empleado en la maniobra se refleja en la suma de las tres fases en las que hemos dividido el adelantamiento.

En la figura se muestran las velocidades realizando ACC y adelantamiento entre 2 vehículos. La gráfica negra muestra la velocidad del vehículo VH1 y la gráfica 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 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

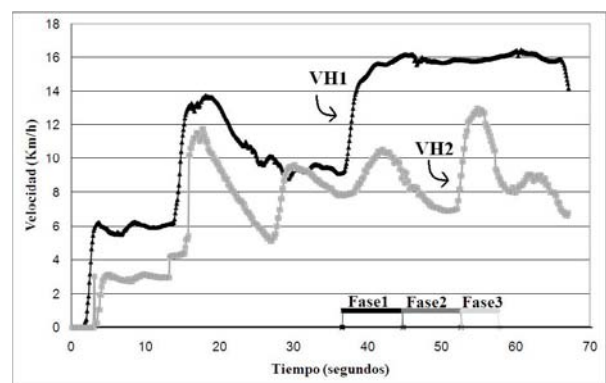


Figura 11. Velocidades y fases del adelantamiento entre dos vehículos

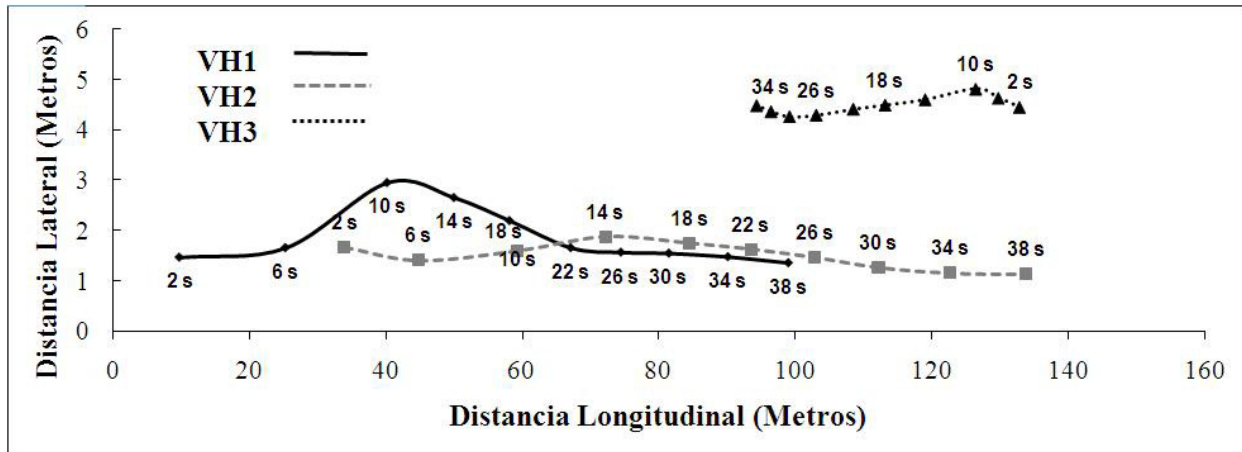


Figura 12. Abortando adelantamiento en fase 1

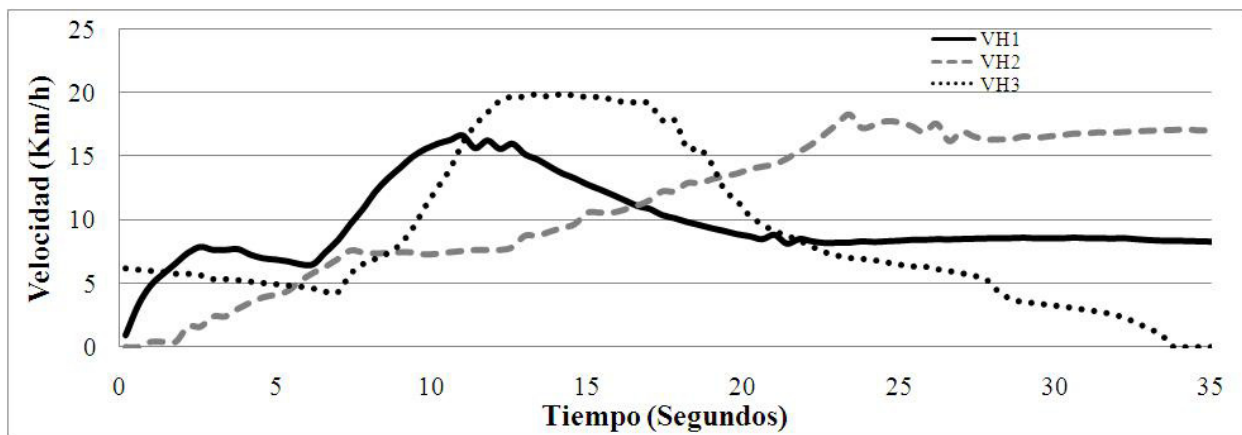


Figura 13. Velocidades de los tres vehículos en la fase 1

tiempo, con saltos de 4 segundos (figuras12 y15). Luego se muestra un gráfico con la evolución de la velocidad de cada vehículo en función del tiempo (figuras13 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)

En las Figuras 12 y 13 se muestra la posición de los vehículos y sus velocidades durante el experimento. La inclusión de los instantes de tiempo en la primera hace posible comparar ambas gráficas. Alrededor del segundo 6, se aprecia un incremento en la velocidad del vehículo automático con la intención de rebasar al vehículo guía. El aumento de la velocidad del vehículo que circula en sentido contrario en el segundo 10, provoca un cambio en los parámetros que determinan la viabilidad del adelantamiento y, en consecuencia, una inmediata disminución de la velocidad del vehículo automático, ya situado en el carril izquierdo, alrededor del segundo 12, volviendo de forma segura detrás del vehículo guía y abortando el adelantamiento. La evolución de los tiempos T_S y T_R del controlador se muestra en la figura 14. 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, momento en el que, alrededor del segundo 11, se activa el controlador para abortar el adelantamiento. Dado que el vehículo automático reduce su velocidad, el tiempo deja de crecer. Aunque, después de la primera activación, no se vuelve a considerar el valor de estos tiempos. Cuando el vehículo haya regresado al carril derecho se puede reconsiderar la maniobra de adelantamiento.

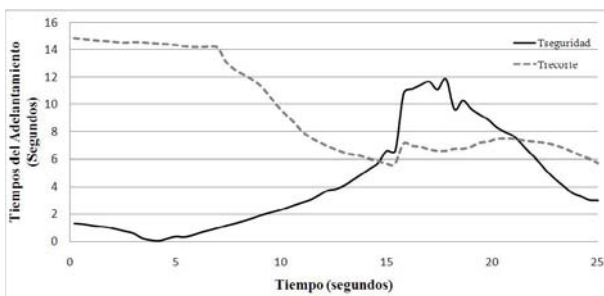


Figura 14. Tiempos Tseguridady Trecorte en la fase 1

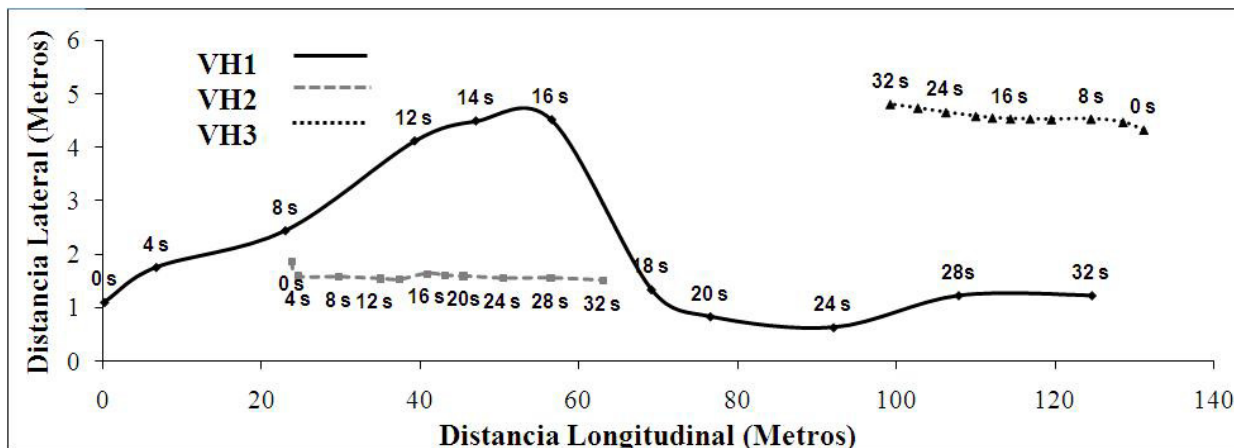


Figura 15. Abortando adelantamiento en fase 2_2

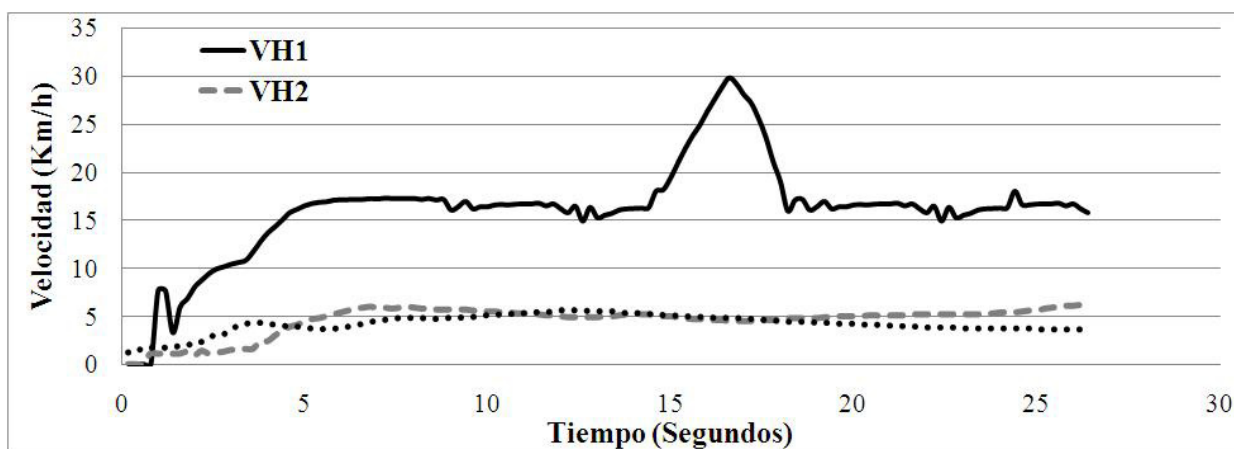


Figura 16. Velocidades de los tres vehículos en la fase 2_2

5.2 Abortar el adelantamiento en Fase 2.2 (Aumenta Velocidad)

En este último experimento, se presenta cómo el sistema de control diseñado no sólo es capaz de frenar al vehículo en caso de riesgo, sino de acelerar y terminar la maniobra si ésta es la acción más segura. Al igual que en el experimento anterior, las posiciones y velocidades de cada uno de los vehículos se muestran en las figuras 15 y 16 respectivamente. Siguiendo la gráfica 15, se aprecia un incremento inicial (segundo 4) de la velocidad para realizar el adelantamiento de forma segura. La detección de un vehículo en sentido contrario, provoca la entrada del controlador CBAA que, alrededor del segundo 15, decide incrementar significativamente la velocidad para terminar el adelantamiento de forma segura.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un esquema para hacer adelantamientos automáticos con control borroso. Se ha tomado como modelo el comportamiento de conductores y se han considerado adelantamientos con dos y tres vehículos y tráfico en sentido contrario.

Las pruebas realizadas para abortar el adelantamiento mostraron que las decisiones tomadas sobre cuándo volver al carril derecho y si acelerar o frenar en función del tiempo hábil para evitar una colisión frontal, son adecuadas. Luego el controlador propuesto para la maniobra de adelantamiento con tres vehículos,

permite solucionar de forma rápida y segura la indecisión que tienen los conductores cuando se encuentran en la situación descrita.

Los experimentos muestran que un algoritmo sencillo que considera los tiempos de seguridad y de recorte que hemos definido, puede decidir cuándo hay que interrumpir un adelantamiento. Destaquemos que un retorno seguro al carril derecho ha sido la premisa de diseño de este algoritmo de decisión es la aportación más importante de este trabajo.

Por otra parte, es importante investigar nuevas tecnologías para comunicación entre vehículos. Para ello el grupo AUTOPIA está planteando utilizar otros sistemas de comunicación, para mejorar los actualmente instalados. 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. Suárez J. y Vinagre B. (2007). Cooperative maneuver study between autonomous cars: Overtaking. En: *EUROCAST, Palmas de Gran Canarias, España*.
- Barrick, D. (1962). Automatic steering techniques. *IRE International Convention Record* **10**, 166–178.
- Driankov, D. y Saffiotti, A. (2001). Fuzzy logic techniques for autonomous vehicle navigation. *Springer-Phisica Verlag, Studies in Fuzziness and Soft Computing* pp. ISBN 3–7908–1341–9.
- Fraichard, Th. y Garnier, Ph. (2001). Fuzzy control to drive car-like vehicles. *Robotics and autonomous systems* **34**, 1–22.
- Hessburg, T. y Tomizuka, M. (1994). Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. *IEEE Control Systems Magazine* **14**(4), 55–63.
- Jula, H., Kosmatopoulos E. B. y Ioannou P. A. (1999). Collision avoidance analysis for lane changing and merging. *University of Southern California, California PATH Research Report*.
- Kammel, S., Pitzer B. Vacek S. Schroeder J. Frese C. Werling M. y Goebel M. (2007). Team annieway technical system description. *Technical Report in DARPA Urban Challenge*.
- Kang, G., Lee W. y Sugeno M. (1998). Stability analysis of tsk fuzzy systems. En: *Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vol. 1. pp. 555–560.
- Milanés, V., Onieva E. Pérez J. de Pedro T. y González C. (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. En: *Journal of field Robotics*.
- Naranjo, J. E., Reviejo J. Gonzalez C. Garcia R. y de Pedro T. (2003). Overtaking maneuver experiments with autonomous vehicles. En: *ICAR, The 11th International Conference on Advanced Robotics*.
- Ngai, D. C. K. y Yung, N. H. C. (2007). Automated vehicle overtaking based on a multiple-goal reinforcement learning framework. En: *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC 2007*. pp. 818–823.
- Pérez, J., Gonzalez C. Milanés V. Onieva E. Godoy J. y de Pedro T. (2009). Modularity, adaptability and evolution in the autopia architecture for control of autonomous vehicles. En: *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 y 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., Uno-A. Kato S. y Tsugawa S. (2000). Cooperative driving of automated vehicles with inter-vehicle communications. En: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV 2000*. pp. 516–521.
- Shimakage, M., Satoh S. Uenuma K. y Mouri H. (2002). Design of lane-keeping control with steering torque input. *JSAE Review* **23**, 317–323.
- Smith, D.E. y Starkey, J.M. (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. y Murakami, K. (1984). Fuzzy parking control of model car. En: *Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 23. pp. 902–903.
- Sugeno, M. y Nishida, M. (1985). Fuzzy control of model car. *Fuzzy Sets and Systems* **16**, 103–113.
- Uno, A., Sakaguchi T. y Tsugawa S. (1999). A merging control algorithm based on inter-vehicle communication. En: *Proc. IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*. pp. 783–787.
- Yager R., Y. Y Zadeh, L. A. (1995). *Fuzzy Logic y Soft Computing*. World scientific publishing.