

Sistema de asistencia a la conducción basado en una red de comunicaciones de bajo coste



Vicente Milanés-Montero*

Enrique Onieva-Caracuel*

Blas M. Vinagre-Jara**

Carlos González Fernández-Vallejo*

Joshué Pérez-Rastelli*

Javier Alonso-Ruiz*

* Departamento de Informática Industrial, Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAI-CSIC). vmilanes@iai.csic.es. Tfno: 91 87 11 900, ext. 286.

** Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura (UEX). bvinagre@unex.es.

Recibido: 16/10/09 • Aceptado: 23/12/09

Driving aid system based on a low-cost wireless network

ABSTRACT

• This work presents a possible solution to one of the major causal of traffic accidents in urban environment as well as in highways: the high speed on the part of the drivers. The developed system is based on the combination of an easy low-cost sensor-data wireless network and a commercial vehicle that has been modified in order to carry out an autonomous driving. The system here presented is based on the combination of sensory information coming from the infrastructure - Zigbee sensors - with the communication of this information to the vehicles to adapt the speed in function of the external environment. The system has been tested in the private driving circuit at the IAI-CSIC facilities through a vehicle equipped with the necessary instrumentation to carry out the longitudinal control of the vehicle - break and throttle pedals - autonomously. There have been realized three experiments in real traffic conditions: a speed control before a risk curve, an automatic control of a pedestrian crossing and a crossing vehicle. They show the good behavior of the designed system.

• **Keywords:** autonomous vehicle, wireless networks, sensorial fusion, Zigbee sensors.

RESUMEN

Este trabajo presenta una posible solución a una de las mayores causas de accidentes en circulación tanto urbana como en carretera: el exceso de velocidad por parte de los conductores. El sistema desarrollado se basa en la combinación de una sencilla red de comunicación de datos de sensores de bajo coste con la modificación de un vehículo comercial para manejarlo de forma automática. El sistema aquí expuesto se basa en la combinación de información sensorial proveniente de la infraestructura -sensores Zigbee- con la comunicación de esta información a los vehículos para, en función de las condiciones, adecuar la velocidad. El sistema ha sido probado en el circuito privado de pruebas del IAI-CSIC mediante un vehículo equipado con la instrumentación necesaria para llevar a cabo el control longitudinal del vehículo -pedales de acelerador y freno- de forma automática. Se han realizado tres experimentos de circulación real: una adecuación de velocidad ante una curva peligrosa, un control automático de un paso de peatones y un cruce de vehículos que muestran

el buen comportamiento del sistema diseñado.

Palabras clave: vehículos autónomos, comunicaciones inalámbricas, fusión datos, sensores Zigbee.

1 ANTECEDENTES

En los últimos años el desarrollo de los sistemas de ayuda a la conducción (ADAS, *Advanced Driver Assistance Systems*) ha provocado un significativo descenso en el número de accidentes en zonas urbanas. A pesar de lograr el objetivo impulsado por la Unión Europea en 2001 (White Paper, 2001) de reducir hasta un 50% el número de fallecidos en accidentes de tráfico, el último informe presentado por la *Dirección General de Tráfico* en el mes de septiembre, demuestra que casi el 75% de los accidentes de tráfico se producen en circulación urbana o carreteras secundarias (Información de accidentes, 2009). El principal motivo aludido por las autoridades es el exceso de velocidad y la distracción al volante, que unidas provocan el mayor número de accidentes.

Los sistemas desarrollados por los fabricantes de automóviles en los últimos años están fundamentalmente basados en facilitar la labor al conductor en circulación a altas velocidades. Entre ellos, podemos destacar el control de cruceo (Ioannou y Chien, 1993) (CC, del inglés *Cruise Control*), en el que el conductor puede fijar la velocidad de circulación del vehículo centrandolo en el manejo del volante y su extensión en el control de cruceo adaptativo (Panaturak et al., 2009) (ACC, *adaptive cruise control*), donde el vehículo es capaz de adecuar su velocidad al vehículo precedente a velocidades superiores a los 30km/h. La última evolución es el control de cruceo inteligente (Echegaray y Wenbin, 2008) (ICC, del inglés *Intelligent Cruise Control*) que funciona para todo el rango de velocidades.

En la misma línea, han surgido diversos sistemas que avisan al conductor de situaciones de inminente peligro ya sea mediante señales visuales, sonoras o hápticas. Cabe citar los sistemas de aviso de salida del carril que alertan sobre un posible abandono del carril de circulación (Cerone et al., 2007) o los sistemas de detección de ángulo muerto (Collado et al., 2004) que avisan sobre un posible riesgo en el caso de realizar un cambio de carril. Estos sistemas presentan el inconveniente de la dependencia del factor humano, esto es, de su capacidad de respuesta al estímulo en función de diversas variables como la edad del conductor o su fatiga (Dragone, 2009).

El campo de los sistemas inteligentes de transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) constituye el enlace entre las tecnologías de la información, las comunicaciones, los vehículos y las redes que transportan personas o mercancías. Desde el punto de vista de la investigación, se han producido numerosos avances en este campo. Uno de los primeros en desarrollar un sistema automático fue el grupo liderado por el profesor Broggi en la *Universidad de Parma* (Italia), donde su vehículo ARGO fue capaz de llevar a cabo el control de dirección del vehículo gracias a un sistema basado en visión artificial durante 2000 km (Broggi et al., 1999). Durante esta prueba, el control de velocidad fue realizado por un conductor humano. En Japón, el *Ministerio de Transporte* se ocupa de regular la seguridad de la industria del vehículo. El programa más relevante es el *Advanced Safety Vehicle* (ASV) (Sugasawa et al., 1996). Bajo su amparo, las grandes compañías japonesas de automóviles han desarrollado técnicas para mejorar la seguridad, como sistemas ITS de advertencia y ayuda. En 2007 comenzó la cuarta fase del programa ASV y en octubre de ese mismo año Nissan presentó la cuarta generación denominada Nissan ASV-4, cuyo objetivo es la reducción de los accidentes de tráfico mediante una comunicación vehículo – vehículo en la que se avisa al conductor de la existencia de otro vehículo en condiciones de climatología adversas o intersecciones de riesgo. Los principales avances en la actualidad en el desarrollo de vehículo autónomos se pueden encontrar en el DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) *Urban Challenge*. Esta competición fue creada como

respuesta a una iniciativa del congreso norteamericano para que una tercera parte de los vehículos terrestres del ejército fueran automáticos para el año 2015. El grupo de la universidad *Carnegie Mellon* con un vehículo modelo *Chevy Tahoe* llamado *Boss* ganó la última edición celebrada en 2007 recorriendo en algo más de cuatro horas un circuito urbano de 85 km de manera autónoma (Urmson et al., 2008).

Los trabajos desarrollados por el grupo AUTOPIA, dentro del cual se encuadra la investigación aquí presentada, están centrados en la utilización de sistemas de comunicación para llevar a cabo maniobras cooperativas entre vehículos (Milanés et al., 2009; Naranjo et al., 2008; Naranjo et al., 2007). La investigación orientada en esta dirección está fundamentada en que, en algún momento, coexistirán los vehículos guiados por conductores humanos y vehículos automatizados; debiendo por tanto existir algún sistema de comunicación que envíe la información más relevante ya sea directamente a los vehículos o a un centro de control situado en la infraestructura.

En este sentido, se encuentra en fase de desarrollo un nuevo estándar de comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC, *Dedicated Short Range Communications*), que cubre el espectro entre los 5,850 y los 5,925 GHz. El comité de estandarización E17.51 de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) trabaja en el desarrollo de un estándar para aplicaciones entre vehículos basadas en comunicaciones inalámbricas. DSRC es, por tanto, un sistema de comunicaciones con un alcance medio y cuyo principal objetivo será aumentar la seguridad vial gracias a las comunicaciones vehículo-vehículo. Así pues, DSRC es un complemento perfecto a las comunicaciones móviles, proporcionando una elevada tasa de transferencia de datos en situaciones de riesgo donde la reducción en los retardos es crítica. Con el objetivo de evitar cuellos de botella, estas comunicaciones serán orientadas: esto es, cada vehículo sólo establecerá conexión con los vehículos que puedan interactuar con él en un breve espacio de tiempo.

2 INTRODUCCIÓN

Los principales inconvenientes de los sistemas hasta ahora presentados se deben a la inclusión de un sistema de comunicaciones más un sistema de posicionamiento para poder transmitir la ubicación del vehículo guiado por un conductor humano. Así por ejemplo, sistemas como los de aviso de llegada a curva (CWS, *Curve Warning System*) o de control inteligente de la velocidad (ISA, *Intelligent Speed Assistance*) requieren la inclusión de un sistema de posicionamiento y un mapa para determinar la trayectoria futura. A pesar de ser una intrusión mínima, requiere de la instalación de ciertos sistemas en el vehículo y la perfecta actualización de los mapas del navegador. Por otra parte, sólo un mapa generado dinámicamente podría advertir de situaciones temporales como accidentes, carreteras obstruidas, etc.

El objetivo del trabajo aquí presentado es adecuar la velocidad del vehículo automáticamente gracias a una red de comunicaciones de bajo coste, permitiéndole incluso interactuar con vehículos conducidos manualmente, obteniendo la información acerca de los mismos a través de sensores instalados en la infraestructura. Para ello, se va a utilizar un sistema de comunicación y sensores *Zigbee* instalados en la infraestructura que nos permitirá determinar las acciones a tomar por el vehículo automático. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema aquí presentado se han realizado tres experimentos. Los dos primeros consisten en adecuar la velocidad del vehículo según las condiciones del entorno (una curva peligrosa o un paso de peatones) y el segundo de ellos consiste en el paso de una intersección en el que, mediante dos sensores colocados en la infraestructura, podemos saber si hay algún vehículo en la zona de riesgo de colisión, tomando así las acciones oportunas para evitar un posible accidente.

3 ZIGBEE: UN ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA DE BAJO COSTE

El desarrollo de los sistemas de comunicación inalámbricos en los últimos años ha provocado la aparición de multitud de nuevas aplicaciones y un amplio abanico de posibilidades para solventar problemas que hasta ahora resultaban de difícil respuesta.

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la *ZigBee Alliance*. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN, *wireless personal area network*) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y una larga vida útil de sus baterías.

Zigbee Alliance es un consorcio iniciado por *Philips*, *Honeywell*, *Invensys* y seguido por *Motorola* (ahora *Freescale*), *Mitsubishi* y hasta 25 empresas para crear un sistema estándar de comunicaciones inalámbrico y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de domótica, automatización de edificios (denominado *inmótica*), control industrial, periféricos de PC y sensores médicos. Los miembros de esta alianza justifican el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo del *Bluetooth*. Puede transmitir con un simple protocolo de 20kB/s hasta 250Kbps trabajando a una frecuencia de 2,4GHz con la tecnología GSSS, bajo consumo y rangos entre 10 y 300 metros, aunque las condiciones físicas ambientales son las que determinan las distancias de trabajo.

IEEE 802.15.4 es un simple protocolo de paquetes de datos para redes inalámbricas ligeras. *ZigBee*, se conoce con otros nombres como "HomeRF Lite", también puede usar las bandas libres ISM de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU). Una red *ZigBee* puede estar formada por hasta 255 nodos, los cuales tienen dormido el "transceiver" *ZigBee* la mayor parte del tiempo, para mantener un bajo

consumo (Liu y Fan, 2008).

Se definen tres tipos de dispositivos que pueden actuar en una red *Zigbee*.

Coordinador puede ser o bien el director de una red en árbol o servir como enlace con otras redes. Cada red sólo puede tener un coordinador y es el elemento de más alto nivel.

Router puede servir bien para transmitir información al coordinador o como interconexión entre dispositivos separados en la red.

Terminador su misión es enviar la información que contienen sus sensores bien a un router o directamente a un coordinador. Estos dispositivos pueden ser activados o desactivados de manera inalámbrica, prolongando así su vida útil.

Nombre	Tamaño	Alcance en exteriores	Consumo inactivo
Imote2	36×48×9mm	30 m	390 uA
IRIS	58×32×7mm	250 m	8 uA
MicaZ	58×32×7mm	90 m	15 uA
TelosB	65×31×6mm	90 m	5 uA
WeBee 3	31×14×3mm	30 m	0,5 uA
KMote	40×22×8mm	150 m	7 uA
SunSPOT	64×38×25mm	100 m	36 uA

Tabla 1: Características de dispositivos *Zigbee* comerciales

En la Tabla 1 se muestran algunos de los modelos que se pueden encontrar en el mercado. El modelo empleado para nuestra aplicación será el IRIS de *Crossbow*, debido fundamentalmente a su gran alcance que lo convierte en el dispositivo idóneo para aplicaciones en exteriores. Así pues, los dispositivos seleccionados de esta serie son: estación base/Gateway modelo BU2110BA como controlador del sistema, tarjeta de radio modelo XM2110CA como router y la tarjeta de sensores MTS310CB para la captación de las señales del exterior. Esta tarjeta está montada sobre un router para el envío de la información.

Podemos sintetizar diciendo que los terminadores *Zigbee* están pensados para conectarse a un único coordinador permanentemente, pero tienen la capacidad de transmitir la información de los sensores que llevan conectados.

4 SISTEMA DE COMUNICACIÓN IMPLEMENTADO

Una vez seleccionado el modelo más apropiado para la aplicación que queremos desarrollar, pasamos a detallar la estructura de control implementado. El sistema está basado en una comunicación infraestructura-vehículo en el que la información sensorial recogida del entorno es procesada

directamente en el vehículo y, en función de las condiciones del tráfico, toma las decisiones de control oportunas con la información obtenida - tanto de los sensores embarcados en el vehículo como de los colocados en la infraestructura -.

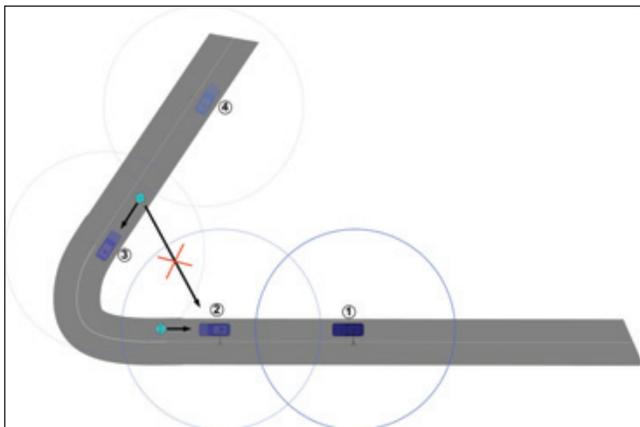


Figura 1: Recepción de la información sensorial colocada en la infraestructura

En la figura 1 se muestra un ejemplo del objetivo buscado con la inclusión de este tipo de sistemas de comunicación en la infraestructura. El análisis de la maniobra está realizado desde el punto de vista del sistema embarcado en el vehículo. En la imagen, se muestra el vehículo automático en cuatro posiciones distintas durante una situación habitual en circulación en carretera: una curva peligrosa que implica una necesaria deceleración del vehículo para aumentar la seguridad. Suponemos que el vehículo va circulando a una velocidad prefijada por el sistema de control. En la gráfica, se observa como en la posición marcada con una circunferencia como uno, el vehículo se encuentra alejado de la zona de riesgo y no detecta ningún sensor en su zona de cobertura. Posteriormente, en la segunda posición, vemos que el vehículo detecta el segundo sensor y empieza a recibir señales de él. El coche prosigue la marcha y, una vez alcanzado el sensor, el paso del vehículo modifica el valor de la señal que el sensor envía y el vehículo toma la acción de control oportuna -en este caso reducir significativamente su velocidad. En la tercera posición, el vehículo ha sobrepasado la zona de riesgo y detecta un nuevo sensor cuya información es recogida por el sistema de control del vehículo. Cuando dicho sensor modifica su valor, indica que la zona de posible accidente ha finalizado. Una vez procesada la información, el vehículo retoma la velocidad de referencia que llevaba en la posición uno. Finalmente, en la última posición, el vehículo no detecta ninguna señal y prosigue su marcha a la velocidad de cruce.

Con este sistema de funcionamiento, podríamos mejorar no sólo la seguridad en curvas peligrosas, sino en cualquier circunstancia de circulación de tráfico como pueden ser intersecciones, pasos de peatones, rotondas, etc.

En nuestro caso, vamos a utilizar la tarjeta de sensores MTS310CB de *Crossbow*, que está equipada con sensores

de luz, temperatura, acústico, sonoro, acelerómetro de dos ejes y magnetómetro de dos ejes. Se realizaron pruebas experimentales para comprobar el funcionamiento de cada uno de los sensores y la velocidad de refresco en función de la información transmitida.

Teniendo en cuenta que el ciclo de control del vehículo automático (Milanés et al., 2008) viene dado por el receptor GPS y está fijado en 5 Hz, se consideró como principal objetivo obtener la máxima actualización posible del valor de los sensores con el fin de tomar acciones de control a esa frecuencia para la futura inclusión del sistema presentado en la arquitectura AUTOPIA. Con esta premisa, se realizaron pruebas con todos los sensores en funcionamiento obteniendo una velocidad máxima de refresco de un segundo. Este valor, teniendo en cuenta las velocidades de un vehículo en circulación urbana, se consideró inadmisibles debido a que los metros que puede recorrer el vehículo en el caso más desfavorable sin obtener información puede ser crítica para actuar en consecuencia.

Distintas pruebas experimentales determinaron que el uso de un único sensor -el sensor de luz- permitía una mayor frecuencia de trabajo y el refresco era similar al ciclo de ejecución del programa de control. Por tanto, se sacrificó información sensorial por una mayor velocidad de respuesta.

De esta forma, una vez lanzado el ciclo de control, el programa desarrollado en C++ (Pérez et al., 2009) pregunta por la recepción de algún posible sensor por la estación base ubicada dentro del vehículo automatizado. Si no se recibe ninguna señal de la infraestructura, el vehículo continúa con la velocidad prefijada por el programa de control y que había sido cargada a la vez con el mapa cartográfico a seguir. Si recibe alguna señal exterior, toma las acciones oportunas para incrementar o disminuir la velocidad con la intención de aumentar la seguridad de los ocupantes del vehículo. A pesar de tener automatizado también el control lateral del vehículo, esto es, la dirección (Onieva et al., 2009), se sale del estudio presentado en este trabajo.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación empleado, se realizaron diversas pruebas en un entorno real para comprobar la cobertura y el comienzo de la comunicación entre la estación base embarcada en el vehículo y los sensores ubicados en la infraestructura. En la figura 2 se muestra uno de los experimentos realizados para determinar el alcance de los sensores - fijado en 300m por el fabricante para entornos abiertos. Este test fue llevado a cabo en el circuito de pruebas privado propiedad del IAI-CSIC y las pruebas se realizaron ubicando dos sensores a ambos lados de una intersección y el vehículo automático conducido por un conductor humano por la calle perpendicular. Como se aprecia en la figura, la recepción de información del primer sensor es detectada a 80m de distancia del vehículo, mientras que la segunda ocurre a 50m. Esto es debido a que el segundo sensor se encuentra ubicado en una zona donde hay unos árboles que pueden debilitar la señal, mientras que el primero se encuentra en una zona completamente despejada.

En cualquier caso, esta distancia de detección se considera suficiente para tomar acciones de control con la suficiente antelación para evitar un posible accidente.

El sistema del acelerador está controlado a través de dos entradas de tensión analógicas que se conectan directamente al acelerador y que son controladas a través de una tarjeta

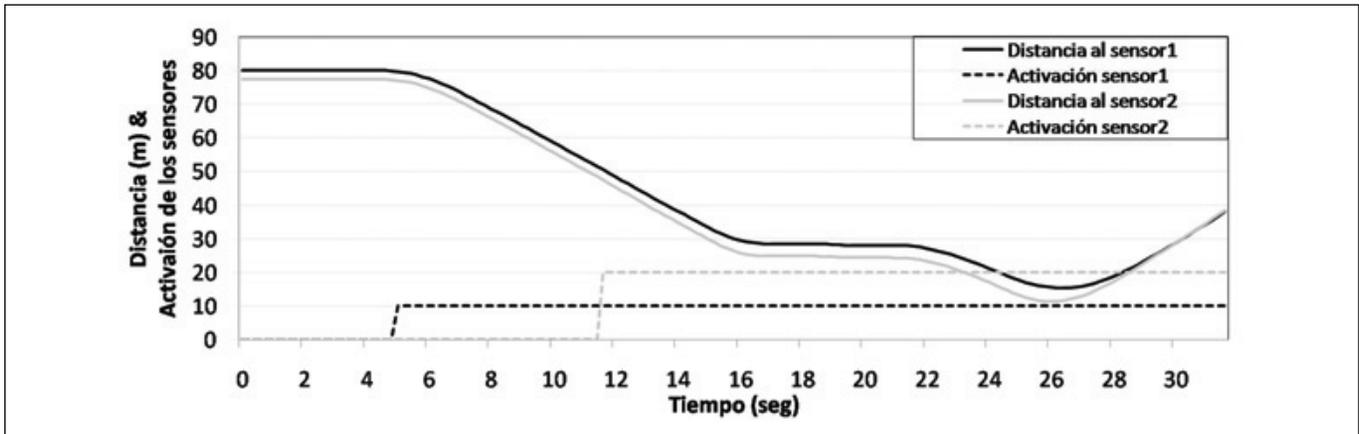


Figura 2: Distancia de activación de los sensores Zigbee ubicados en la infraestructura

5 VEHÍCULO EXPERIMENTAL

El vehículo utilizado para llevar a cabo los experimentos reales es un descapotable modelo *Citröen C3 Pluriel*, que ha sido modificado para permitir su conducción automática. El principal objeto de este trabajo es el control de velocidad del vehículo de forma inteligente con lo que vamos a describir la implementación a nivel hardware de los sistemas de control para manejar tanto el pedal del acelerador como el de freno. Posteriormente, veremos la implementación a nivel software del control y el equipamiento del vehículo.

La figura 3 muestra un diagrama de bloques general del sistema propuesto. El vehículo utilizado para realizar los experimentos está dotado de la capacidad de controlar los pedales de acelerador y freno de forma automática gracias a un ordenador industrial que genera las señales de control. Ambos sistemas conmutan a automático a través de unos interruptores que habilitan esta posibilidad.

PCI 1720. Esta tarjeta está conectada al PC embarcado en el vehículo, que se encarga de enviar las tensiones generadas por el controlador borroso para regular la aceleración del vehículo.

El sistema de frenado electro-hidráulico diseñado partía con la única premisa de mantener el funcionamiento en todo momento del circuito original del coche. Por este motivo, se instaló una válvula selectora que nos permitía conmutar sin retardos entre los dos sistemas de frenada. De esta manera, asegurábamos tener siempre disponible un sistema que permitiera frenar el coche desechando la idea de válvulas eléctricas, cuyo tiempo de conmutación podría introducir retardos indeseables. El sistema diseñado para conectar a la válvula selectora está compuesto por un depósito de líquido de frenos con una capacidad de un litro que incluye una bomba acoplada a un motor de continua de 12 voltios y 350 W de potencia.

La presión ejercida por la bomba del sistema electro-hidráulico está controlada por tres válvulas. La primera de ellas es una limitadora cuyo valor está fijado a 160 bares -valor obtenido experimentalmente- para evitar que se

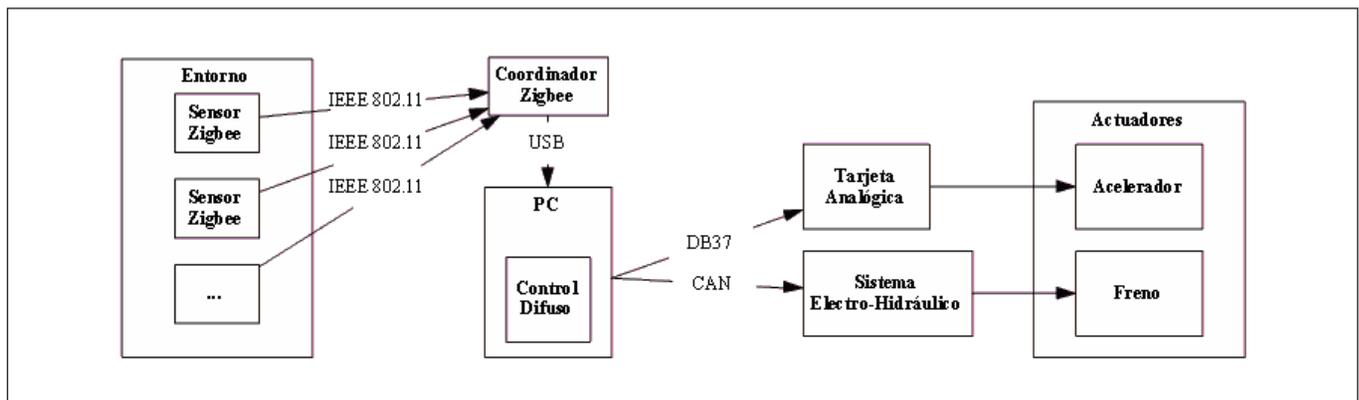


Figura 3: Diagrama de bloques del sistema propuesto

produzcan daños en el disco de freno. La segunda es una válvula todo/nada que nos permite la circulación del líquido de frenos tanto desde la bomba hasta las ruedas como en sentido opuesto. Esta válvula es normalmente abierta y se cierra para permitir el paso del líquido. La última válvula es una electro-proporcional con un rango de presión entre 12 y 250 bares y cuya tensión de control oscila entre 0 y 10 voltios. Finalmente, el sistema incluye un manómetro que nos permite saber la presión que estamos introduciendo en cada momento.

Para los experimentos se ha contado con una estación base ubicada en el vehículo automatizado y hasta dos estaciones colocadas en la infraestructura capaces de comunicar la información procedente de los sensores a la estación base. Con estos dispositivos se han llevado a cabo tres experimentos para comprobar el correcto funcionamiento del sistema planteado. En la figura 4 se muestra el vehículo automático circulando por carretera y los sensores Zigbee ubicados en la infraestructura. Se ha utilizado un carril ubicado en el centro de la carretera para colocar los sensores dentro del mismo y evitar que los vehículos los dañen. Este carril se ha denominado carril sensorial. Todos los dispositivos de control, así como el PC embarcado en el vehículo, se encuentran en el maletero del mismo, con lo que su aspecto externo es idéntico al de cualquier vehículo comercial.

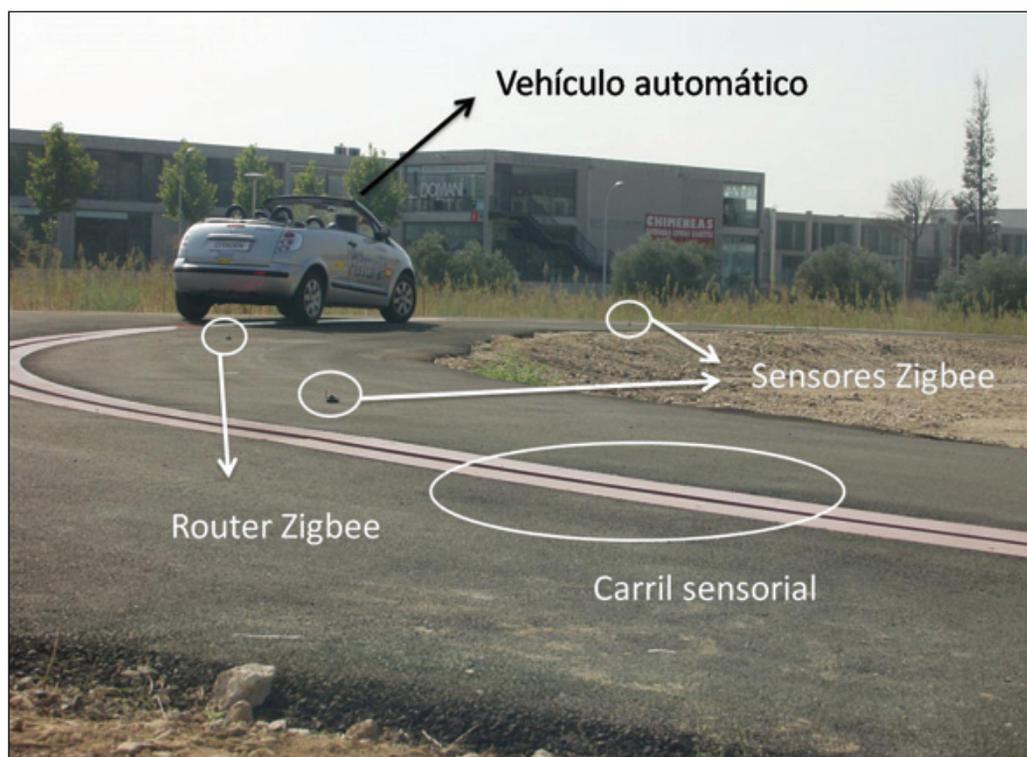


Figura 4: Coche experimental Clavileño propiedad del IAI-CSIC

El sistema de control está implementado como una clásica arquitectura de control en cascada donde el alto nivel

es llevado a cabo mediante lógica borrosa. Esta técnica de control ha sido ampliamente utilizada por el grupo (Milanés et al., 2009; Milanés et al., 2009; Naranjo et al., 2008; Naranjo et al., 2007; Onieva et al., 2009) con excelentes resultados.

6 PRUEBAS

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se han realizado tres experimentos que verifican su funcionalidad. El primero de ellos emula la llegada a una curva peligrosa no señalizada y que el conductor no es capaz de detectar. Mediante dos sensores ubicados en la infraestructura, la estación base recibe la información de la entrada y salida de la curva adaptando su velocidad a las necesidades de la carretera. El segundo experimento es una aplicación práctica para entornos urbanos y causa de un gran número de accidentes: un paso de peatones. El sistema diseñado consiste en un pulsador cuya activación interviene directamente sobre el sistema de frenos del vehículo deteniendo su marcha. Pasados unos segundos y si el sistema no ha vuelto a activarse, el vehículo prosigue su camino. Finalmente, presentamos un experimento donde se muestra la interacción con otros vehículos no automatizados: una intersección. En este caso, se define un área de seguridad antes y después del cruce, y se colocan dos sensores en dichos puntos. Si

existe un vehículo entrando o circulando por dicha zona, el vehículo automático se detiene antes de la intersección. La marcha se reanuda cuando nos aseguramos de que no existe ningún vehículo en la intersección.

6.1 Primer experimento: Curva peligrosa

Para este primer experimento hemos fijado una velocidad automática de circulación de 20km/h. En la figura 5 se muestra en el sistema de *Coordenadas Universal Transversal de Mercator* (UTM,

Universal Transverse Mercator) la posición del vehículo en la carretera de circulación y la ubicación de los sensores Zigbee con un aspa. En la parte superior de la figura 6 se muestra la velocidad de referencia del vehículo -marca en negro- y la velocidad real de circulación que lleva el vehículo a lo largo

del experimento -marca gris. En la parte central, se muestra el valor de la salida de cada uno de los sensores Zigbee. En dicha gráfica se puede apreciar como el primero -marca en negro, situado inicialmente a 80m del vehículo, es detectado desde el principio de la maniobra. El segundo sensor -marca gris-, situado a la salida de la curva, no es detectado hasta una distancia sensiblemente más cercana. Esto es debido a que el segundo sensor está ubicado tras una caseta colocada en la parte interior de la curva, que evita la detección desde el primer momento. En cualquier caso, la tardía detección no afecta al sistema de control que lo detecta con la suficiente antelación. En la gráfica inferior se muestra la salida normalizada del control longitudinal -acelerador y freno- del vehículo automático.

En la parte superior de la figura 6 se aprecia como el vehículo comienza el experimento detenido. Una vez iniciada la marcha, alcanza la velocidad de referencia fijada por el sistema de control y la

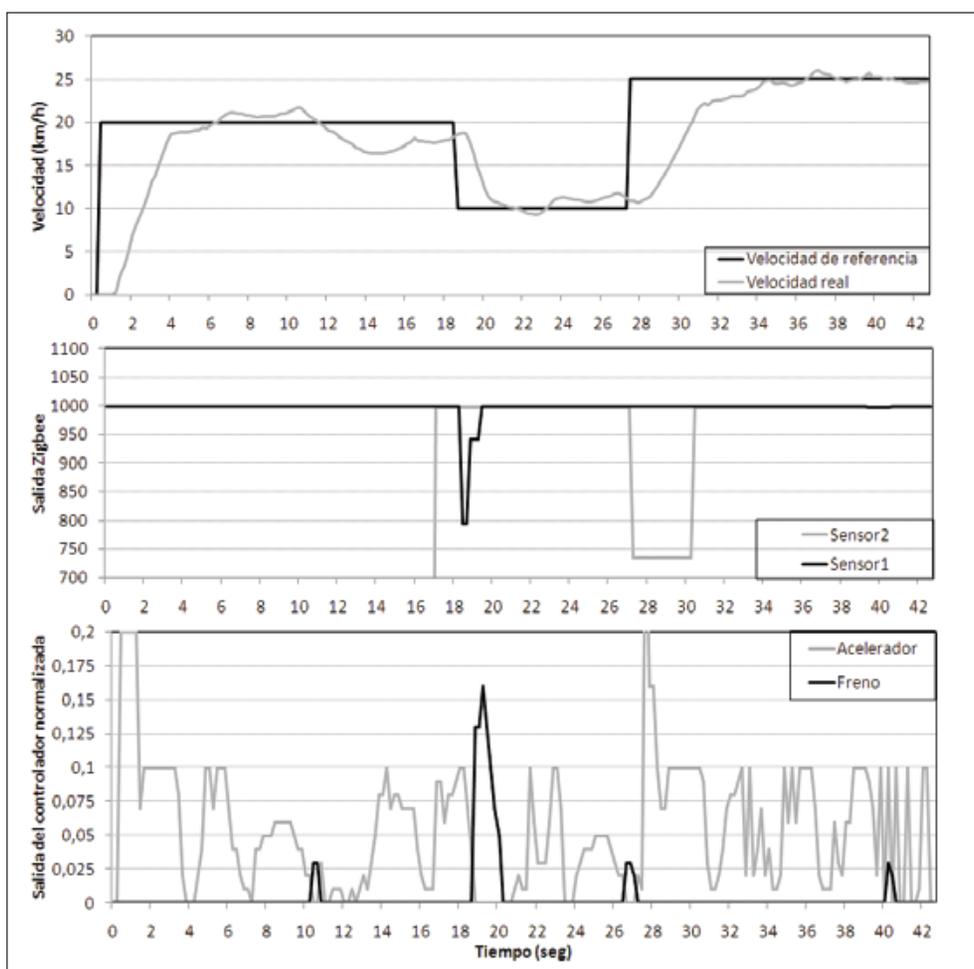
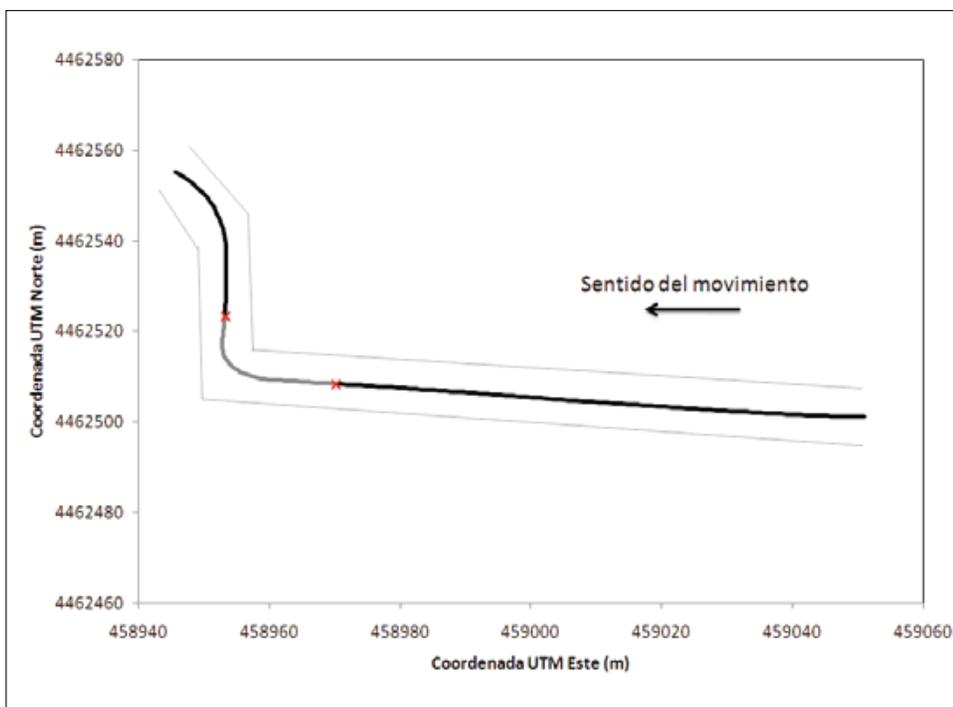


Figura 6: Velocidad de referencia y real del vehículo, salida de los sensores de luz Zigbee, Salida normalizada del controlador longitudinal



mantiene hasta alcanzar el primer sensor. En la gráfica central vemos como, algo después del segundo 18, el vehículo pasa por encima del primer sensor de luz, detectando el programa de control una variación brusca de su valor de salida, que es considerada como que el vehículo se encuentra en ese punto. Vemos como, una vez detectada esa incidencia, la velocidad de referencia es bajada hasta los 10km/h durante el tramo que dura la curva -como se puede ver marcado en gris en la figura 5. Una vez pasada la zona de riesgo, sobre el segundo

Figura 5: Representación en coordenadas UTM de la maniobra de curva peligrosa. Las aspas marcan las posiciones de los sensores Zigbee y el color gris el tramo considerado de riesgo

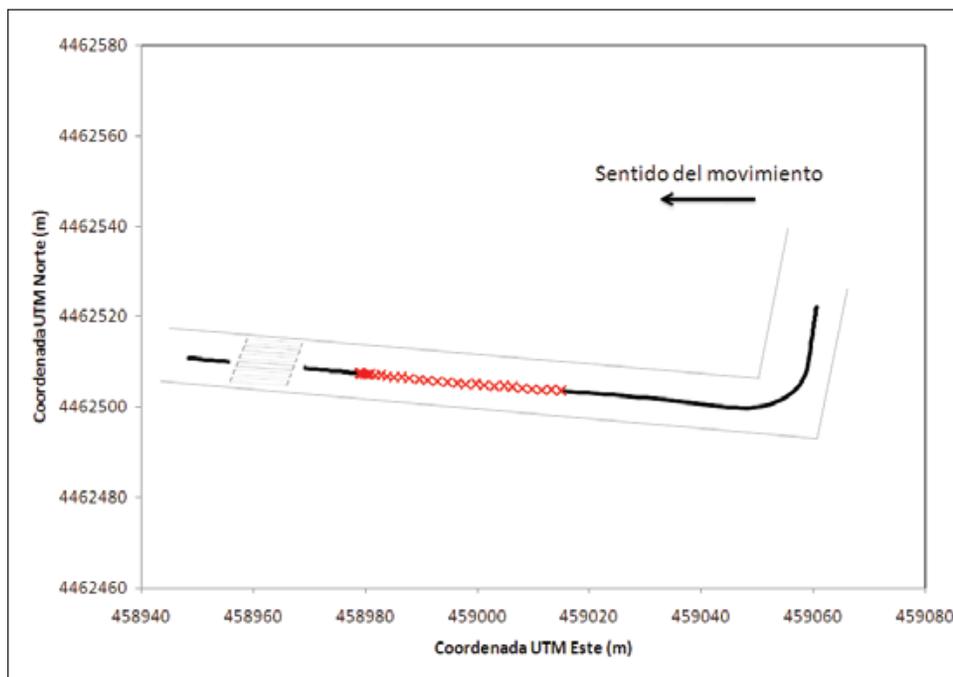


Figura 7: Maniobra del paso de peatones en coordenadas UTM. Las aspas indican el momento en el que detecta que un peatón está pasando y hace disminuir su velocidad hasta detenerse

27 se detecta el segundo sensor de indicación de fin de riesgo. De forma automática, la velocidad de referencia es modificada hasta los 25km/h y se produce una fuerte aceleración que se ve reflejada en la salida del controlador borroso que se muestra en la parte inferior de la figura 6.

6.2 Segundo experimento: Paso de peatones

En este caso estamos circulando con el vehículo a una velocidad inicial de 30 km/h que posteriormente aumenta hasta los 35 km/h (gráfica superior de la figura 8). En ese instante se detecta que hay un peatón en el paso de peatones cercano. El peatón debe pulsar el paso de peatones que se ve reflejado en la gráfica central de la figura 8. El sensor Zigbee se activa y manda una señal que modifica la velocidad de consigna hasta los 0 km/h para que pare en la posición predeterminada para ese sensor. Se estima un tiempo de 10 segundos para el paso del peatón desde que el valor del sensor retorna al valor inicial. Si no se vuelve a modificar el valor del sensor Zigbee el vehículo retoma la velocidad de referencia a una velocidad algo inferior a la que llevaba de referencia para mayor seguridad. La parte inferior de la gráfica muestra la salida normalizada del controlador borroso. En la figura 7 tenemos las coordenadas UTM de la maniobra con la ubicación del paso de peatones y con las aspas las posiciones a intervalos regulares mientras el coche se detiene completamente.

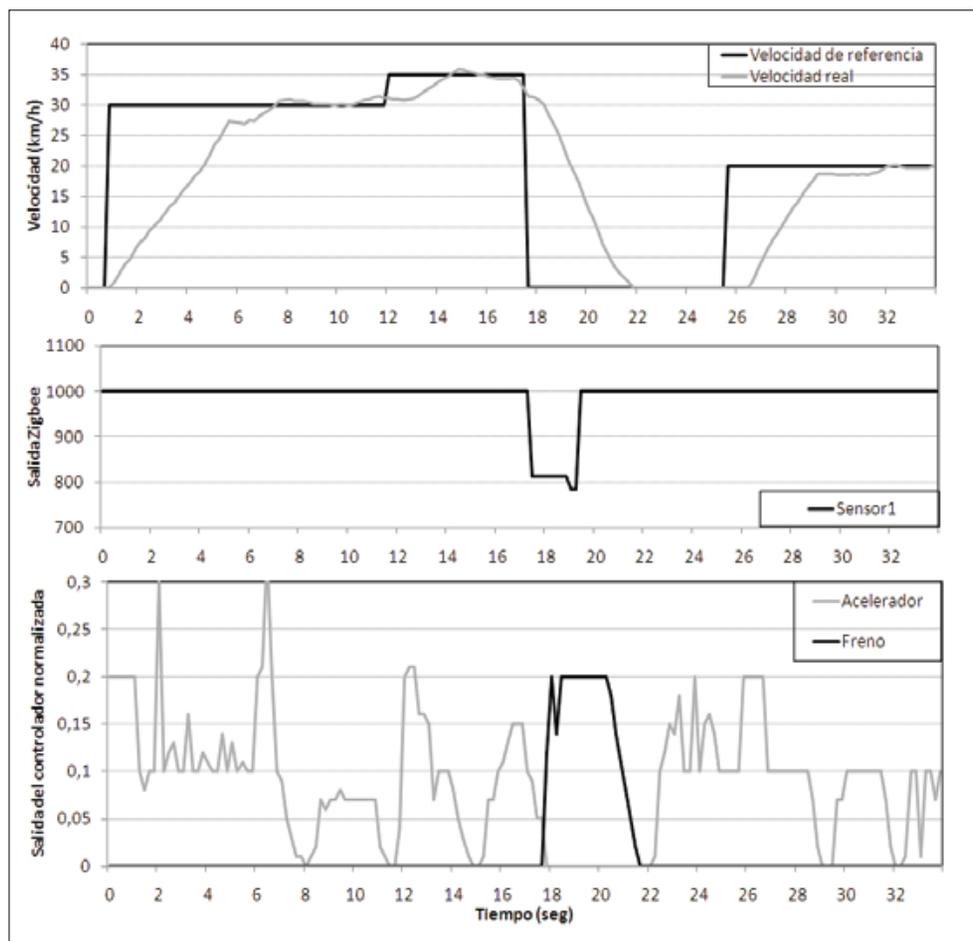


Figura 8: Velocidad real y de referencia, salida del sensor Zigbee ubicado en el paso de peatones y salida del controlador longitudinal para un paso de peatones

6.3 Tercer experimento: Intersección de vehículos

En este caso hemos colocado los sensores Zigbee antes y después de una intersección. Inicialmente ninguno de

los dos es detectado por la lejanía del coche automático de ellos (parte inicial de la gráfica central de la figura 10, vemos como el sensor1 empieza a recibir en el segundo 5 y el sensor2 alrededor del 12). Una vez empieza a recibir señal, un vehículo activa el primer sensor alrededor del segundo 14. El coche automático recibe la señal, interpretándola como un coche que viene por su derecha y comienza a frenar hasta detener el vehículo antes de la intersección. Una vez recibida la señal del segundo sensor, retoma la marcha a una velocidad más elevada (figura 9) a la que llevaba previamente para asegurar que, mientras él se encuentre en la intersección, ningún otro vehículo por el carril preferente llegará a ella.

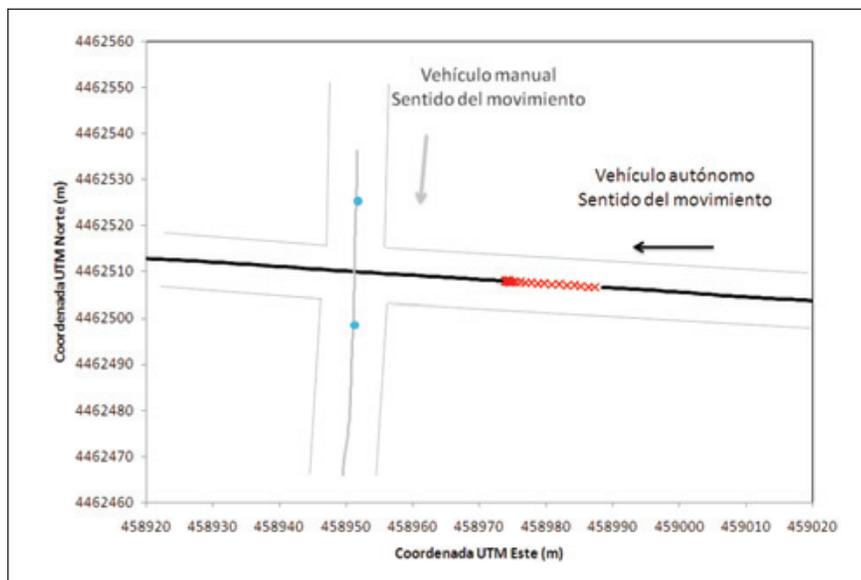


Figura 9: Coordenadas UTM del movimiento de ambos vehículos en la aproximación a la intersección. Las marcas azules indican la ubicación de los sensores Zigbee y las aspas rojas el tiempo en el que el vehículo manual se encuentra entre ellas y por tanto el vehículo automático disminuye su velocidad

7 DISCUSIÓN

En este trabajo se ha presentado una posible solución para evitar accidentes en carretera y fundamentalmente en tráfico urbano debido a excesos de velocidades por parte de los conductores. Se ha mostrado un sencillo sistema basado en comunicación infraestructura-vehículo, que permite incorporar la información de los sensores ubicados en la infraestructura a un vehículo automatizado que modifica su velocidad en función de las condiciones del tráfico o, en un paso previo, permitir a un sistema ADAS mandar mensajes de advertencia a los conductores de vehículos no automatizados.

Se han añadido tres experimentos en condiciones reales de como este sistema puede mejorar la seguridad vial, pero su uso no queda limitado sólo a situaciones predecibles como una curva peligrosa, un paso de peatones o una intersección, sino que creemos que es extensible para situaciones imprevistas de circulación como un accidente o un bache en la carretera que,

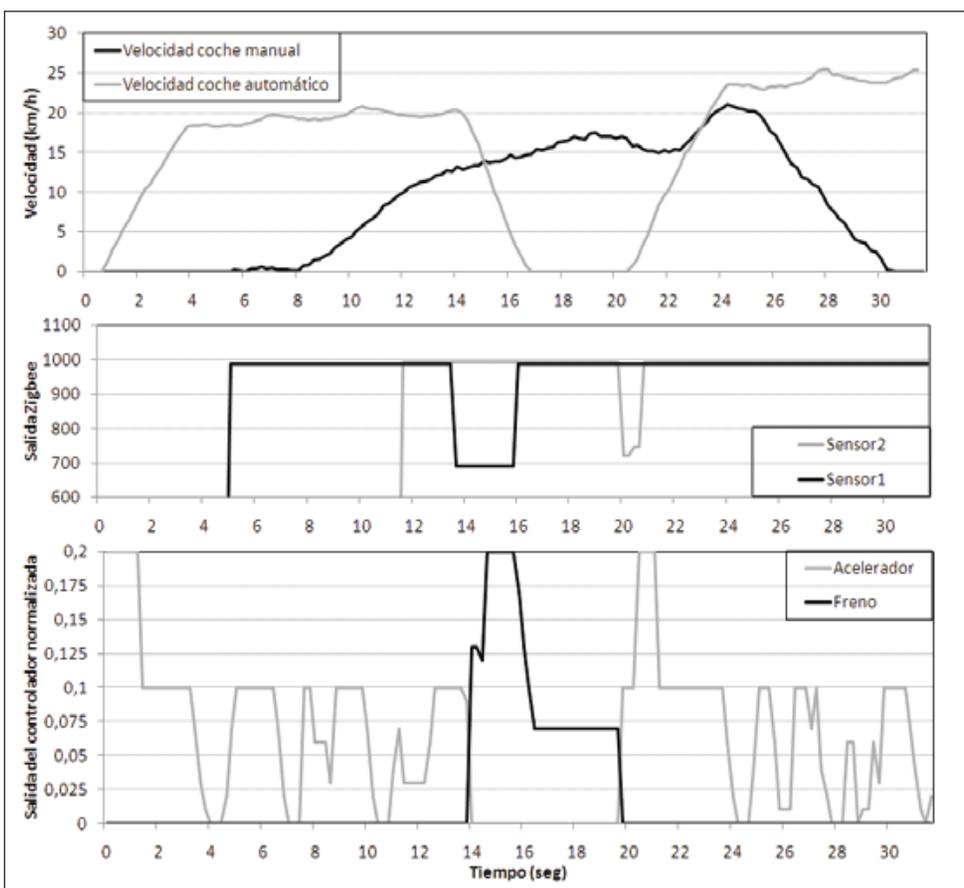


Figura 10: Velocidad del vehículo automático y manual, salidas de los dos sensores Zigbee ubicados en la infraestructura y salida del controlador borroso

mediante la sencilla colocación de este dispositivo metros antes del incidente, modificaría la velocidad del vehículo de forma automática aumentando la seguridad y fiabilidad.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema aquí presentado presenta tres mejoras reseñables. En primer lugar, se ha desarrollado un sistema de mínimo coste mediante sensores ubicados en la infraestructura que pueden servir para mandar una señal de aviso al conductor o, como en el sistema presentado, actuar directamente sobre el vehículo para evitar posibles accidentes. En segundo lugar, es de destacar la facilidad de este sistema para introducir un nuevo elemento que advierta de una situación imprevista temporal como obras o un posible accidente. Por último, la combinación de este sistema con una cartografía digital podría solventar los problemas que ésta presenta de actualización dinámica.

Finalmente y como futuro trabajo afrontaremos este estudio desde un punto de vista más global ubicando la estación base de control en una unidad central de gestión del tráfico en lugar de en un vehículo. De esta forma, la información recogida por todos los sensores podría ser enviada a cualquier vehículo equipado con un sencillo sistema de comunicaciones inalámbricas y, desde el punto de vista del análisis local, podríamos cubrir zonas urbanas de riesgo donde confluyan incorporaciones, rotondas, pasos de peatones y cruces llegando al objetivo buscado: tasa de accidentes nula.

8 AGRADECIMIENTOS

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

9.- BIBLIOGRAFÍA

- Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A, et al. "The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems". *International Journal Intelligent Control and Systems*. 1999, Vol.3-4, p.409-441.
- Cerone V, Milanese M, Regruto D. "Experimental results on combined automatic lane keeping and driver's steering". *Actas del American Control Conference ACC '07'*. 2007, p.3126-3131.
- Collado J M, Hilario C, de la Escalera A, et al. "Model based vehicle detection for intelligent vehicles". *Actas del IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2004, p.572-577.
- Dragone D. "I am getting tired: Effort and fatigue in intertemporal decision-making". *Journal of Economic Psychology*. 2009, Vol.30-4, p.552-562.

- Echegaray S, Wenbin L. "The modular design and implementation of an intelligent cruise control system". *Actas del IEEE International Conference on System of Systems Engineering*. 2008, p.1-6.
- *Información de accidentes*. Dirección General de Tráfico. Informe técnico, 2009.
- Ioannou P A, Chien C C. "Autonomous intelligent cruise control". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1993, Vol.42-4, p.657-672.
- Liu C H, Fan C C. "Zigbee- Research into Integrated Real-Time Located Systems". *Actas del IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference APSCC '08'*. 2008, p.942-947.
- Milanés V, Perez J, Onieva E, et al. "Electric power controller for steering wheel management in electric cars". *Actas de Compatibility and Power Electronics CPE '09*. 2009, p.444-449.
- Milanés V, Naranjo J E, González C, et al. "Autonomous Vehicle based in Cooperative GPS and Inertial Systems". *Robotica*. 2008, Vol.26, p.627-633.
- Milanés V, Onieva E, Pérez J, et al. "Control de velocidad basado en lógica borrosa para entornos urbanos congestionados". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2009, Vol.6-4, p. 66-73.
- Naranjo J E, González C, Garcia R, et al. "Lane-Change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2008, Vol.9-3, p.438-450.
- Naranjo J E, González C, Garcia R, et al. "Cooperative Throttle and Brake Fuzzy Control for ACC+Stop&Go Maneuvers". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2007, Vol.56-4, p.1623-1630.
- Onieva E, Alonso J, Pérez J, et al. "Autonomous car fuzzy control modeled by iterative genetic algorithms". *Actas de IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2009, p.1615-1620.
- Pananurak W, Thanok S, Parnichkun M. "Adaptive cruise control for an intelligent vehicle". *Actas del IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2009, p.1794-1799.
- Pérez J, González C, Milanés V, et al. "Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for control of autonomous vehicles". *Actas del IEEE International Conference on Mechatronics*. 2009, p.1-5.
- Sugawara F, Ueno H, Kaneda M, et al. "Development of Nissan's ASV". *Actas del IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 1996, p.254-259.
- Urmson C, Anhalt J, Bae H, et al. "Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge". *Journal of Field Robotics*. 2008, Vol.25-8, p. 425-466.
- *White Paper: 'European Transport Policy for 2010: Time to Decide'*. European Transport Commission, 2001.