

# **EXPERIENCIAS DE SISTEMAS COOPERATIVOS COMO CATALIZADORES PARA ALTOS NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN EN LA CONDUCCIÓN**

**José Eugenio Naranjo Hernández**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Felipe Jiménez Alonso**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Alfredo Valle Barrio**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Alberto Cruz Ruiz**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Jorge González Pérez**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Aitor Gómez Torres**

INSIA, Universidad Politécnica de Madrid, España

## **RESUMEN**

Más allá de las aplicaciones para mejorar la fluidez y seguridad del tráfico, los sistemas cooperativos se están planteando como herramientas catalizadoras para lograr mayores niveles de automatización de los vehículos. El objetivo consiste en que los vehículos puedan disponer de información con un horizonte de percepción superior al que les proporcionan sus sensores embarcados y que, en la actualidad, están limitando sus prestaciones de funcionamiento autónomo y los escenarios en los que se pueden desenvolver como tales.

En este sentido, se han desplegado 2 corredores cooperativos interconectados en vías periurbanas de Madrid, concretamente, en la entrada por la autovía A6 y un tramo de la vía de circunvalación M30 totalizando más de 20 km. Estos corredores cooperativos están formados por un conjunto de RSUs (RoadSide Units) que se comunican con los centros de control C-ITS y que proporcionan una cobertura continua y con muy bajos tiempos de latencia a lo largo de todo el recorrido.

De esta forma, los vehículos dotados de OBUs (Onboard Units) podrán recibir esta información en tiempo real y, en caso de ser conducidos de forma autónoma, podrán realizar ciertas maniobras como la adaptación de la velocidad o maniobras de cambio de carril sin intervención del usuario.

En este artículo se trata la arquitectura desplegada y se presentan los resultados de los ensayos que se han realizado, tanto de la eficiencia en la transmisión de la información desde el centro C-ITS a las RSUs y su difusión a las OBU de los vehículos, como la respuesta de los vehículos con conducción autónoma ante las indicaciones recibidas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas cooperativos se definen como aquellos sistemas de seguridad, eficiencia y confort en el entorno vial basados en el intercambio de información entre vehículos y/o infraestructuras, mediante comunicaciones inalámbricas (Cruz, 2019). Incluso se puede extender el intercambio de información a usuarios que no se encuentren en el interior de un vehículo en el instante de recibir el servicio mediante el uso de dispositivos móviles o tabletas. Al encontrarse el vehículo conectado en un entorno cooperativo posibilitará que además de poseer los datos propios y los percibidos por medio de los sensores embarcados, podrá disponer de la información transmitida por el resto de los vehículos, las infraestructuras a su alrededor y centrales de tráfico (Jiménez, 2012).

Car 2 Car – Communication Consortium (<https://www.car-2-car.org/>) busca el desarrollo, prueba y despliegue de sistemas cooperativos en Europa basados en la comunicación de corto alcance entre vehículos, entre vehículos e infraestructuras y entre vehículos y otros usuarios de la carretera para mejorar la seguridad y la eficiencia vial. Otras comunicaciones complementarias, como la telefonía, serán consideradas cuando sean requeridas. El principal objetivo del consorcio es garantizar la interoperabilidad de los sistemas cooperativos, abarcando todas las clases de vehículos a través de marcas y fronteras representando a empresas de vehículos o infraestructuras, autoridades y organizaciones relacionadas con los C-ITS e institutos de investigación.

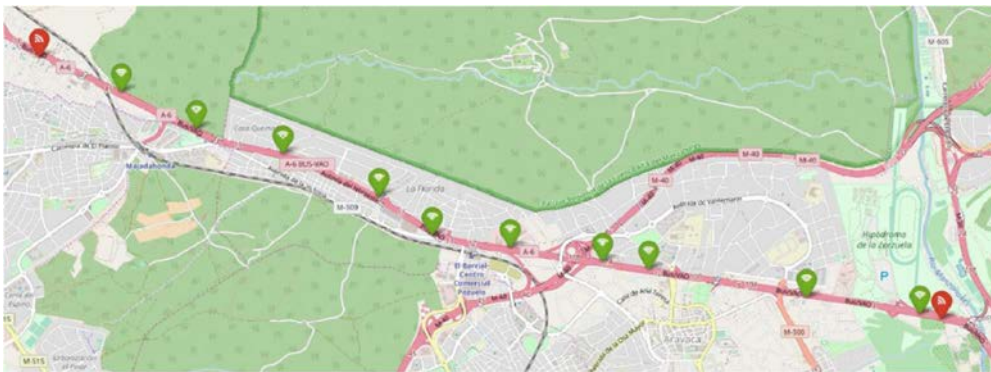
En los últimos años, se han acometido diferentes proyectos en España para el despliegue de estos servicios en corredores de carreteras reales. En concreto, el proyecto Auto C-ITS (<https://www.autocits.eu/>) tiene por objetivo el contribuir al despliegue de los servicios cooperativos en Europa mejorando así la interoperabilidad de los mismos entre países, y promoviendo el papel de los servicios cooperativos (C-ITS) como catalizadores para la implementación de la conducción autónoma. Para ello se han desarrollado tres proyectos piloto en tres grandes ciudades europeas situadas en el corredor atlántico: Madrid, París y Lisboa (Figura 1).



**Fig. 1 - Proyectos piloto del proyecto Auto C-ITS**

El piloto español formado por INSIA-UPM, INDRA y la DGT ha desplegado en el carril de vehículos de alta ocupación (VAO) situado en la A-6 desde el km 7 al km 17 entre las carreteras M-30 y M-40 (Figura 2). El piloto ha desplegado tres servicios C-ITS Day 1, en los que los vehículos autónomos y conectados realizan las maniobras de seguridad basándose en la información recibida de la autoridad de carreteras a través de una infraestructura C-ITS. Se marca con indicadores en color rojo muestran las RSU que cuentan con conectividad 5G mediante la que se comunican con otras RSU y los vehículos de la carretera, además de conexión a internet para comunicarse con el centro de control.

En verde se muestran las RSU que solo cuentan con conectividad 5G sin salida a internet que hacen las funciones de repetidores de los mensajes obtenidos del centro de control a través de las RSU en rojo.



**Fig. 2 - Ubicación de las RSUs C-ITS en la A-6 (km 7, km 17)**

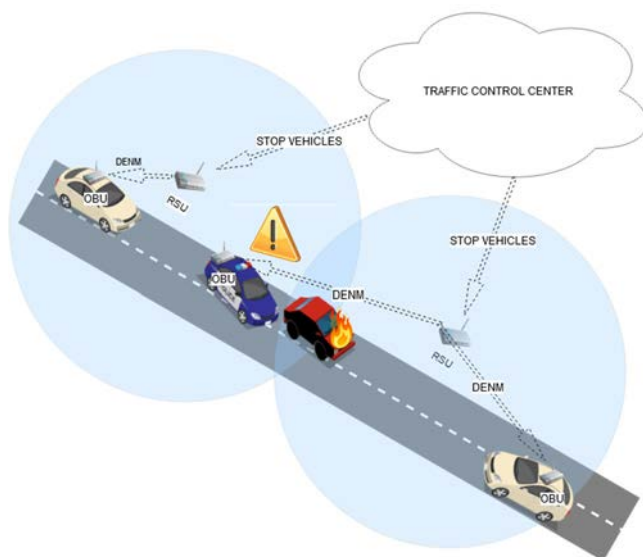
La plataforma europea C-ROADS (<https://www.c-roads.eu/pilots/implemented-services.html>) es una iniciativa de diferentes Estados miembros y operadores de carreteras que desean colaborar para lograr el despliegue de servicios C-ITS de forma armonizada e interoperable en toda Europa. La armonización es el activo principal de la cooperación C-ROADS, ya que garantiza un despliegue sostenible y eficiente de los C-ITS. En consecuencia, todos los participantes comparten la visión de los objetivos principales que son, además de la armonización, la implementación a través de pilotos de los servicios Day 1 y Day 1.5, las demostraciones de la implementación de C-ITS y el avance hacia una implementación a gran escala.

A nivel español, (C-ROADS Spain), pretende impulsar la participación de todas las entidades del sector, además de influir en las decisiones a tomar en Europa. Está compuesto por 5 pilotos (Madrid, SISCOGA en Galicia, Cantábrico, Mediterráneo y DGT 3.0), cada uno de ellos con su particular conjunto de tecnologías y servicios C-ITS. Esta heterogeneidad tiene como objetivo cubrir un amplio espectro de casos, con el fin de evaluar el impacto de la movilidad conectada en muchos escenarios representativos.

## **2. FUNCIONAMIENTO DE LAS COMUNICACIONES V2X**

La comunicación V2X se refiere a la capacidad de un vehículo de poder comunicarse con cualquier otro receptor, ya sean infraestructuras (V2I), peatones (V2P), otros vehículos (V2V) o con redes (V2N) (Figura 3). Mediante la transmisión de mensajes, el vehículo puede conocer en tiempo real la situación de los demás vehículos próximos en la vía, enviando y recibiendo información sobre una retención del tráfico, una bajada de la velocidad, la necesidad de cambiar de carril por un obstáculo en la carretera o el peligro que puede haber más adelante debido a un accidente, entre muchos otros eventos posibles.

Gracias a los centros de control de tráfico, se puede controlar en tiempo real la situación en las vías y, si es necesario, mediante este sistema de comunicaciones, enviar información hacia los vehículos, utilizando mensajes que serán recibidos por las infraestructuras, que posteriormente los diseminarán a los vehículos en su rango de comunicaciones. Para ello, se emplean módulos de comunicación V2X. Estos módulos tienen la capacidad de enviar y recibir mensajes (ETSI-ITS, 2014), tengan el origen que tengan, siempre que esté verificada su autenticidad. En caso de estar instalados en la vía, se denominan Road Side Units (RSUs), situados en infraestructuras altas como pueden ser pórticos de información o farolas para, de esta forma, tener visión directa con los vehículos y así transmitir con mayor facilidad y rango los mensajes. Esta versión de módulos de comunicaciones está hermetizada para tener la capacidad de soportar las inclemencias del tiempo. Las unidades localizadas en los vehículos son On Board Units (OBUs), las cuales son en esencia iguales que las RSUs, con un tamaño más contenido para estar colocadas en el vehículo sin perder apenas capacidad de carga.



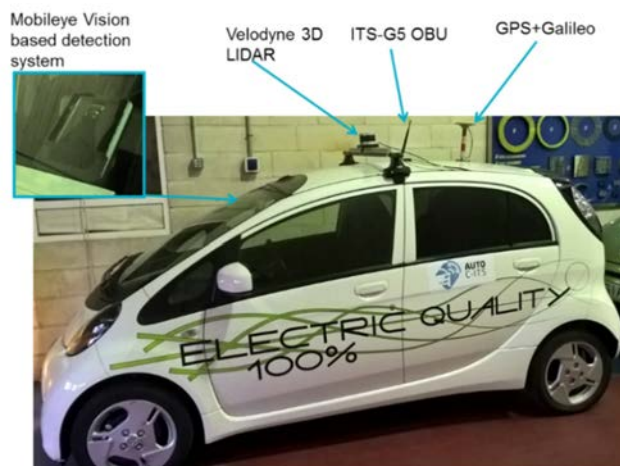
**Fig. 3 - Diagrama de funcionamiento de las comunicaciones V2X**

Un ejemplo típico de la comunicación V2X sería el control de un atasco. El centro de control de la autoridad encargada del tráfico, la Dirección General de Tráfico (DGT) en España, enviaría un mensaje a las RSUs de la carretera situadas en el rango cercano al atasco, indicando una ruta alternativa que permita la descongestión del tráfico. Al recibir este mensaje, se enviaría a continuación a las OBUs de los vehículos en el rango que indique el centro de control, avisando con antelación a los conductores del atasco.

La comunicación V2X tienen un gran potencial en el futuro de los vehículos conectados y autónomos, pudiendo en la actualidad avisar al conductor de posibles pasos a seguir mediante los ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) en la conducción y, en el futuro, controlar totalmente las capacidades del vehículo y el recorrido a seguir mediante el envío de mensajes.

### 3. FUNCIONAMIENTO DEL VEHICULO

Con el fin de probar la capacidad de los corredores cooperativos para ser catalizadores de la conducción autónoma, se emplea un vehículo Mitsubishi i-MIEV (Figura 4), automatizado por el Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), perteneciente a la UPM.



**Fig. 4 - Detalle del vehículo autónomo del INSIA**

Este vehículo ha sido automatizado siguiendo el esquema de automatización de la Figura 5. Este esquema sigue la misma distribución utilizada por el vehículo Stanley (Thrun et al, 2006) de “The Stanford Racing Team” en la competición “2005 DARPA Grand Challenge” (Buehler et al, 2007).

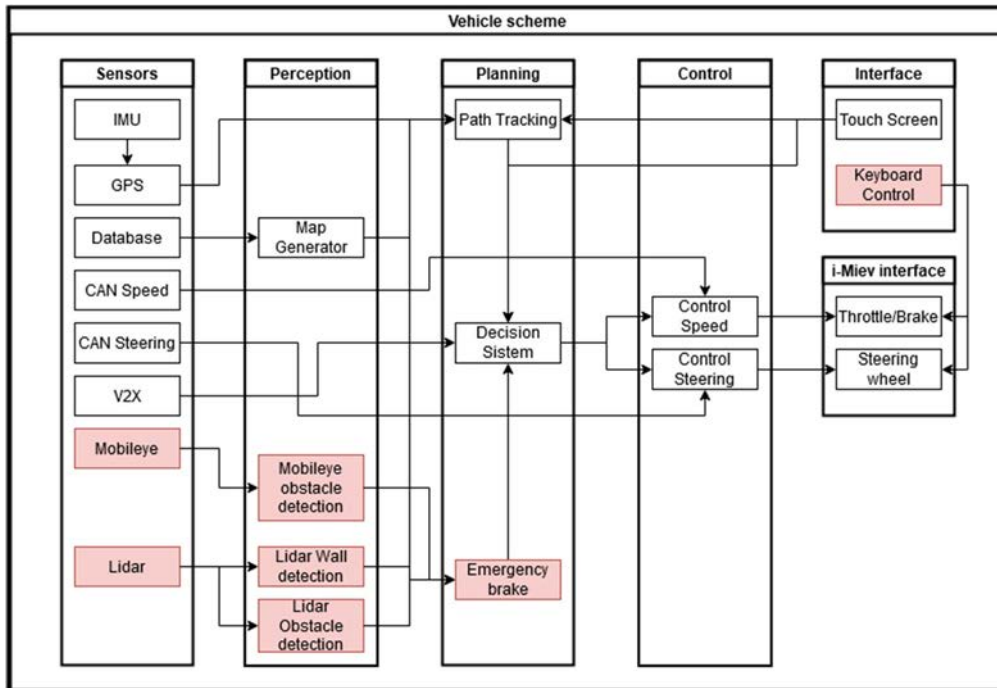
Se pueden encontrar en primer lugar los sensores con los que cuenta el vehículo en la actualidad que son un GPS con corrección inercial, una base de datos en la que se encuentra el mapa pregrabado mediante sus posiciones GPS, la lectura de la velocidad y el ángulo de volante que se recogen del CAN BUS del vehículo, el módulo de comunicaciones V2X, además de una cámara Mobileye y un LiDAR. Dentro del módulo de percepción debe destacarse para el objeto de los ensayos que se ha implementado un generador de waypoints a partir de los puntos GPS en bruto guardados en la base de datos.

En el bloque de planificación se encuentran los dos módulos de alto nivel principales en el vehículo; por un lado, el path tracking que realiza el cálculo de la velocidad y el ángulo de volante necesario para seguir la planificación del mapa y, por otro lado, el sistema de decisiones que recoge la consigna calculada por el módulo de path tracking además de las consignas recibidas de los sensores Mobileye y LiDAR y la consigna dada por el módulo de comunicaciones. El módulo de toma de decisiones se encarga de centralizar la información recibida de cada uno de los módulos y enviar al control la consigna más adecuada en cada momento.

El último paso del ciclo de control corresponde a los módulos de control de velocidad y control de giro de volante los cuales reciben las consignas del módulo de toma de decisiones y las convierten en señales adecuadas para los actuadores del vehículo. Todas las funciones del vehículo controlan a través de una pantalla táctil que permite activar/desactivar el control autónomo además de seleccionar los sensores que se utilizan en cada momento y el mapa pregrabado a utilizar.

También cuenta con la posibilidad de realizar el control del vehículo de manera manual dentro de automatización a través de un teclado.

En el esquema se han señalado en rojo aquellos módulos que no se utilizan en las pruebas del presente estudio.



**Fig. 5 – Esquema del Sistema de control del vehículo autónomo de INSIA-UPM**

#### 4. ENSAYOS EN CARRETERA

Se han realizado ensayos en carretera con tráfico a lo largo de los corredores cooperativos desplegados y que proporcionan cobertura continua. En concreto, en este artículo se muestra el caso de un ensayo en el carril bus-VAO de la autovía A6 en la salida de Madrid.

El ensayo con un recorrido de 7,8 kilómetros se ha realizado de manera completamente autónoma. El objetivo de este ensayo es mostrar el comportamiento del vehículo en una posible situación real, en la cual durante la conducción recibe la información de los eventos, emitidos por la DGT, debido a retenciones en la vía. Durante el recorrido se han simulado 3 eventos en la carretera cuyo radio de acción se puede ver en la Figura 6.





**Fig. 6 - Representación de la ruta realizada en el ensayo**

Para los eventos emitidos en el ensayo, se ha seguido el método de definición de eventos del “common data dictionary” del estándar de comunicaciones V2X el cual clasifica la naturaleza los eventos por causa (ETSI-ITS, 2019) y subcausa (ISO, 2019), asociándoles a cada uno de los mismos un protocolo de actuación definido por los centros de control de tráfico de cada Estado.

Para este ensayo se han utilizado tres eventos diferentes con dos tipos de consigna de actuación del vehículo. Por un lado, los eventos pueden indicar una consigna de velocidad máxima en el radio de relevancia del evento. El vehículo mantendrá la velocidad mínima entre la velocidad marcada por el mapa definido previamente y la consigna de velocidad de evento. Por otro lado, los eventos pueden indicar la necesidad de un cambio de carril, hacia el izquierdo (por defecto, el vehículo circula por el carril derecho) para lo cual el vehículo recalculará el trazado del mapa para situarse en el carril inmediatamente siguiente a la izquierda del actual.

Los eventos que se han emitido para este ensayo son los siguientes.

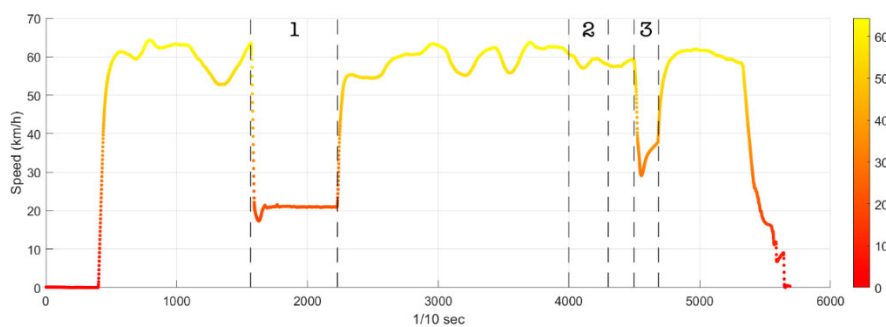
- El evento A consiste en una reducción de velocidad a 35 km/h debido a una retención. Este evento se encuentra situado en las coordenadas (40.474913, -3.833989) y tiene un radio de acción de 200 metros. Este evento ha sido definido con causa 6, subcausa 0 que indican que se encuentra una superficie deslizante.
- El evento B con causa 6, subcausa 0 que indican que se está realizando un trabajo en la carretera, consiste en un cambio de carril y posterior regreso. Este evento se encuentra situado en las coordenadas (40.465152, -3.797245) y tiene un radio de acción de 250 metros.
- El evento C definido con causa 26, subcausa 0 que indican que hay un vehículo lento en la carretera, consiste en una reducción de velocidad a 20 km/h debido a una retención. Este evento se encuentra situado en las coordenadas (40.464283, -3.789678) y tiene un radio de acción de 100 metros.



## 5. RESULTADOS

En este apartado se muestra el comportamiento del vehículo tanto durante los eventos descritos anteriormente cómo durante su conducción en modo autónomo. Para ello se van a revisar dos características principalmente que son el control de la velocidad y el control del ángulo de volante.

En la Figura 7 se muestra la gráfica de velocidad durante el ensayo. El vehículo comienza parado y acelera progresivamente hasta alcanzar su velocidad objetivo de 60 km/h. Se muestran algunas oscilaciones el control de velocidad de  $\pm 5$  km/h debido a la orografía del terreno. En la sección indicada con el número 1 se encuentra el primer evento el cual consiste en una reducción de velocidad a 20 km/h, El vehículo realiza una reducción brusca de velocidad hasta situarse en la velocidad objetivo y la mantiene durante el radio de relevancia del evento. Al salir del radio de relevancia recupera progresivamente la velocidad hasta los 60 km/h fijados por el mapa. En la sección marcada con el número 2 se produce el siguiente evento que consiste en un cambio de carril, el cual no conlleva cambio en la velocidad. Al llegar a la sección marcada con el número 3 se observa una reducción de velocidad a 35 km/h como indica el evento C. Para concluir el ensayo el vehículo realiza automáticamente una frenada progresiva hasta detenerse.



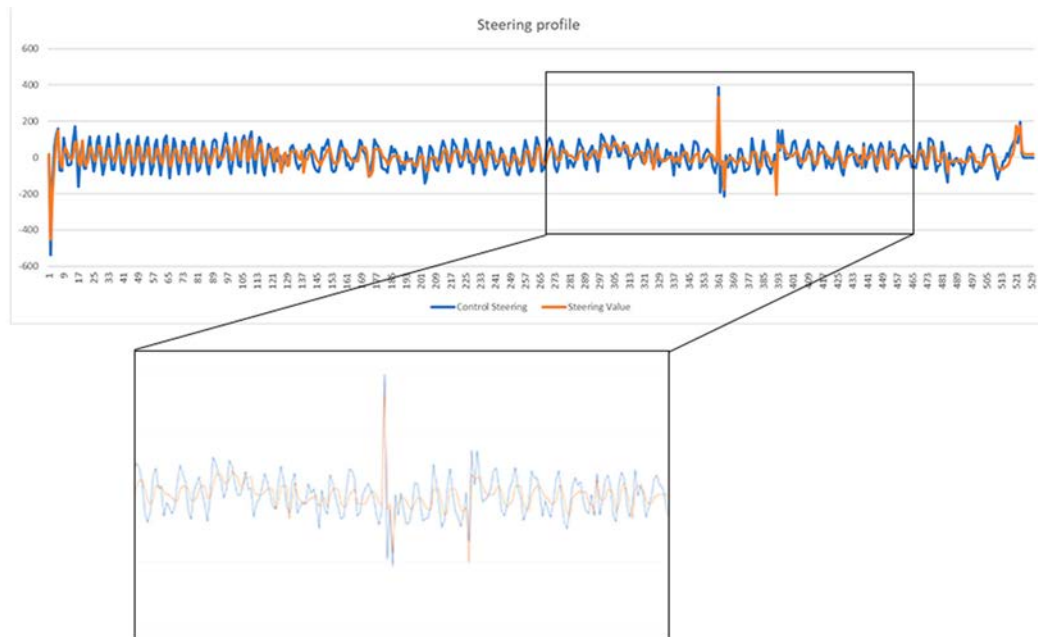
**Fig. 7 - Perfil de velocidad**

En la Figura 8 se observa en detalle el evento de cambio de carril. Como se puede observar, la actuación del evento se realiza con un pequeño desfase correspondiente al tiempo que tarda el vehículo en procesar los eventos y actuar en consecuencia. Este retardo, menor a un segundo, se observa tanto a la entrada como a la salida del evento.



**Fig. 8 - Detalle de la maniobra de cambio de carril**

La Figura 9 muestra la evolución del control del ángulo de volante durante el ensayo, este mantiene el vehículo centrado en el carril en todo momento excepto durante el evento B que, como se ha descrito anteriormente, conlleva un cambio de carril. En la ampliación de la gráfica se muestra el momento en el que el control realiza el cambio de carril ejecutando un giro a la izquierda que rectifica para alinearse con el carril izquierdo y posteriormente, al salir del radio de relevancia del evento, un giro a la derecha que lo devuelve al carril inicial. Durante el resto de la gráfica se perciben las correcciones para el mantenimiento en el carril.



**Fig. 9 - Detalle de control de ángulo de volante**

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado cómo las indicaciones en el corredor cooperativo permiten la operación de un vehículo autónomo en función de consignas externas. El vehículo es capaz de conducir de manera completamente autónoma sobre un mapa pregrabado, manteniéndose en su carril y pudiendo ejecutar las acciones de reajuste de la velocidad junto con un cambio de trayectoria cuando ha resultado necesario, como respuesta a la información de los eventos emitidos por el centro de control de tráfico. De esta forma, parece afianzarse la afirmación de que los sistemas cooperativos tendrán un papel crucial en el ecosistema de la conducción autónoma, además de servir como catalizadores para los altos niveles de automatización en la conducción.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto "Sistema de arbitraje distribuido para conducción cooperativa conectada y autónoma en entornos complejos. CCAD" (PID2019-104793RB-C33) y por la Comisión Europea a través de los proyectos CEF-Transport sector "AUTOCITS" (2015-EU-TM-0243-S) y "C-ROADS Spain" (2016-EU-TM-0272-S).

**REFERENCIAS**

BUEHLER, M., IAGNEMMA, K., Y SINGH, S. (2007). The 2005 DARPA grand challenge: the great robot race. Springer.

CRUZ, A. (2019). Desarrollo de la capa Cooperative Awareness (CAM) para los vehículos autónomos y conectados. Universidad Politécnica de Madrid

ETSI-ITS, (2014) ETSI T. 102 894-2 V1. 2.1 Users and applications requirements. ETSI

ETSI-ITS (2019) ETSI E. 302 637-3 V1. 3.1 Vehicular Communications. ETSI

ISO (2019) ISO 21219-2:2019 Intelligent transport systems — Traffic and travel information (TTI) via transport protocol experts' group, generation 2 (TPEG2) — Part 2: UML modelling rules (TPEG2-UMR)

JIMÉNEZ, F. (2012). Libro Verde de los Sistemas Cooperativos. Universidad Politécnica de Madrid

THRUN, S., MONTEMERLO, M., DAHLKAMP, H., STAVENS, D., ARON, A., DIEBEL, J., LAU, K. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of field Robotics*, 23(9), pp 661-692.