

CONDUCCIÓN AUTÓNOMA Y COOPERATIVA – EL PROGRAMA AUTOPIA EN ESPAÑA

Jorge Godoy

Doctor Ingeniero en Electrónica. Investigador contratado. Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM)

Antonio Artuñedo

Máster en Ingeniería Industrial. Investigador contratado. Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM)

Rodolfo Haber

Doctor Ingeniero Industrial. Científico titular. Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM)

Carlos González

Doctor en Ciencias Físicas. Científico titular. Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM)

RESUMEN: De acuerdo a cifras oficiales de la DGT, los errores humanos son la causa principal de cerca del 90% de los accidentes de tráfico ocurridos en España. Este dato se puede extrapolar al resto de carreteras del mundo, y es el principal motivo por el que en los últimos años se ha invertido mucho esfuerzo en diseñar vehículos más seguros. Así, los vehículos de hoy en día incorporan una diversidad de sistemas inteligentes, diseñados para incrementar su seguridad, confort y eficiencia.

La presente comunicación pretende reflejar los avances del Programa AUTOPIA en cuanto a la conducción autónoma, detallando la arquitectura y las técnicas de control empleadas; así como presentar las líneas de investigación actuales, orientadas a la cooperación inter-sistemas y el desarrollo de herramientas de simulación para la validación de los distintos sistemas desarrollados.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el desarrollo tecnológico en el campo de los sistemas inteligentes de transporte (ITS por sus siglas en inglés) ha permitido dotar a los vehículos con diversos sistemas de ayuda a la conducción (ADAS, del inglés *advanced driver assistance system*), mejorando la experiencia y seguridad de los pasajeros, en especial del conductor. La mayor parte de estos sistemas están pensados para advertir al conductor sobre ciertas situaciones de riesgo, como la salida involuntaria del carril o la proximidad de obstáculos en el camino. No obstante, también podemos encontrar sistemas que van un paso más allá y son capaces de

cooperar con el conductor en el control del vehículo o incluso relegarlos de algunas tareas tediosas. Es en este último grupo donde se encuentran los sistemas de control electrónico de estabilidad (ESP - *Electronic Stability Program*), el antibloqueo de frenos (ABS - *Anti-lock Braking System*), el control de crucero (CC - *Cruise Control*) y los más recientes sistemas de aparcamiento asistido. Continuando con esta línea de desarrollo, el paso siguiente consiste en la supresión del conductor humano, desarrollando sistemas que sean capaces de conducir un vehículo de forma autónoma y con un rendimiento superior al del conductor. Así pues, el desarrollo de sistemas de conducción autónoma de vehículos es una de las líneas de investigación más prometedoras de los últimos años, a partir de la estimación de que la mayor parte de los accidentes de tráfico son causados por errores humanos.

En España, el Programa AUTOPIA es uno de los principales grupos de investigación enfocados en sistemas de ayuda a la conducción, realizando una continua transferencia de técnicas basadas en inteligencia artificial al control autónomo de vehículos. Desde la automatización de los primeros vehículos de su flota hace más de 15 años, la trayectoria de investigación de AUTOPIA se ha dedicado a la mejora de la arquitectura de control y al desarrollo de sistemas de control cooperativo, basados principalmente en la comunicación V2I y capaces de abordar escenarios típicos de la conducción en entornos urbanos y autovías.

A continuación se presenta más en detalle el Programa AUTOPIA y la arquitectura de control embarcada en los vehículos, así como los resultados más relevantes de las demostraciones más recientes y las líneas de investigación actuales en cuanto a la cooperación entre sistemas.

2 EL PROGRAMA AUTOPIA

El Programa AUTOPIA es un grupo de investigación español, perteneciente al Centro de Automática y Robótica (CAR) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Su principal objetivo es la conducción 100% autónoma de vehículos, así como el desarrollo de aplicaciones que permitan mejorar la seguridad en la conducción, principalmente en entornos urbanos y situaciones de alto riesgo.

Desde su creación, en el año 1998, AUTOPIA ha enfocado sus estudios a la transferencia de técnicas de control de robots móviles a la conducción autónoma de vehículos, evitando

en la mayor medida posible la introducción de modificaciones en la infraestructura. La mayor parte de las técnicas aplicadas al control están basadas en la inteligencia artificial, destacando el uso de la lógica borrosa por su facilidad para emular el razonamiento humano durante la conducción.

Actualmente el Programa cuenta con una flota de 6 vehículos automatizados: dos furgonetas eléctricas Citroën Berlingo —los primeros modelos instrumentados por el programa—, dos Citroën C3 con motor a gasolina, un minibús eléctrico con capacidad para 14 pasajeros y, el modelo más reciente, un Citroën DS3. Todos los vehículos han sido instrumentados con una arquitectura de control similar, basada en un ordenador embarcado y un conjunto de actuadores externos para el control del acelerador, freno, volante y caja de cambios. Para la localización y percepción del entorno los vehículos incorporan, según el caso, receptores GNSS diferenciales (GPS + GLONASS), unidades inerciales, lectores de bus CAN —para acceder a la información de los sensores propios del vehículo—, cámaras de visión artificial, sensores lidar y unidades de comunicación IEEE 802.11p, entre otros. El CAR cuenta además con una zona de pruebas construida especialmente para la experimentación con vehículos autónomos. Ésta ha sido diseñada para emular las condiciones de conducción en un entorno urbano, por lo que cuenta con intersecciones, semáforos, distintas señales de tráfico, una rotonda y una red de sensores ZigBee pensada como red auxiliar de la ya mencionada comunicación IEEE 802.11p. La combinación de estas dos últimas garantiza el intercambio de información V2V y V2I en toda la zona de pruebas.

A continuación se detallan algunos de los elementos de hardware embarcados en el vehículo, la estructura de software y el sistema de control del mismo.

2.1 Hardware embarcado

Desde el punto de vista de la localización, los vehículos del programa cuentan con tres dispositivos claves para el sistema: un receptor GNSS (GPS + GLONASS) diferencial, una unidad de medición inercial y un lector de bus CAN (*Controller Area Network*); este último para capturar los datos procedentes del bus CAN propio del vehículo. La unidad GNSS proporciona información de la localización, orientación y velocidad del vehículo con una tasa de 10 Hz. A fin de reducir el error en la medida, los datos de la unidad GNSS se combinan, a través de un filtro de partículas (Godoy, 2012), con los datos de velocidad angular y aceleración lineal capturados por la unidad inercial (con una tasa de muestreo de 100 Hz),

así como con la información obtenida de los sensores propios del vehículo a través del bus CAN. Como particularidad, las unidades inerciales instaladas en los dos vehículos Citroën C3 sincronizan su tiempo de muestreo con el del GPS a través de una señal de 1PPS, facilitando así el filtrado de la información.

A fin de permitir el control de cada uno de los actuadores del vehículo, ha sido necesario incorporar una serie de elementos de hardware específicos en cada uno de ellos. En los últimos modelos se ha empleado una tarjeta analógica para el control del acelerador, un sistema electro-hidráulico y un módulo E/S analógico/digital para el freno y un controlador de motores CC para el control de la dirección. Adicionalmente, se emplea un sistema de relés e interruptores que permiten al usuario conmutar la operación de cada uno de los actuadores entre los modos automático y manual.

El control del acelerador se realiza emulando el comportamiento del pedal electrónico del vehículo a través de la tarjeta analógica instalada. De acuerdo a las especificaciones del fabricante, el pedal no es más que un transductor que convierte la presión ejercida por el conductor en dos señales analógicas proporcionales, de entre 0 y 5 voltios. En lo que respecta al freno, el sistema añadido cuenta con una bomba electro-hidráulica cuya presión de salida es regulada a través de dos válvulas electrónicas. El control de cada una de estas válvulas se realiza mediante un módulo E/S analógico/digital que es controlado a su vez por el ordenador embarcado a través de una interfaz CAN, la cual no debe confundirse con el bus CAN del vehículo.

Por último, para el control del volante se ha modificado el sistema de dirección eléctrica asistida del vehículo. La base de este sistema es un motor eléctrico acoplado directamente a la barra de dirección. Bajo condiciones normales de operación, un calculador mide el par aplicado sobre el volante y utiliza el motor eléctrico para contribuir con el movimiento deseado, reduciendo así el esfuerzo del conductor. Para la automatización del sistema hemos colocado un controlador en paralelo al calculador original del vehículo. De esta forma, al activar el modo de conducción autónoma las conexiones del motor son desconectadas del calculador de la dirección y conectadas al controlador añadido, permitiendo entonces al ordenador controlar la posición del volante a voluntad. El sistema de control implementado sigue el esquema de controladores en cascada presentado en (Pérez et al, 2011a).

Un esquema general de los elementos de hardware añadidos al vehículo se muestra en la Figura 1. Los elementos de percepción y actuación son resaltados en color amarillo y azul respectivamente.

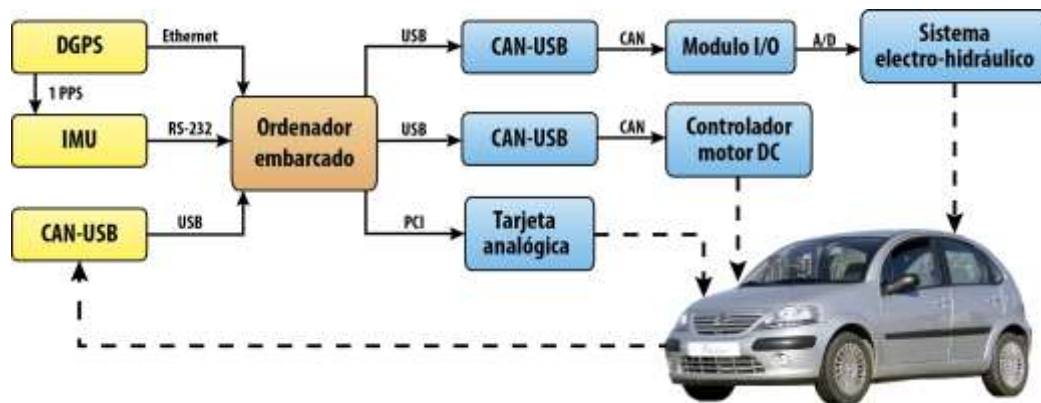


Figura 1: Elementos de hardware embarcados en el vehículo

2.2 Arquitectura de software

Uno de los principales aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar, desarrollar e implementar un sistema es la modularidad del mismo (Parnas, 1972). Dentro del ámbito de la robótica es común encontrar una gran variedad de sistemas complejos que son implementados como una combinación de distintos componentes más sencillos (Montemerlo et al., 2003, Pérez et al., 2009). Esto permite, entre otras cosas, (i) trabajar de forma simultánea en distintos componentes sin interferencia; (ii) detectar errores rápidamente, descartando aquellos módulos que funcionan correctamente; (iii) evitar que ante el fallo de uno de los componentes se produzca un fallo general del sistema y (iv) aumentar la escalabilidad del sistema.

Partiendo de esta idea, se ha desarrollado una arquitectura formada por varios elementos de software, agrupados en función de su tarea principal. En la Figura 2 se presenta un diagrama de la misma, donde se aprecia su división en 4 etapas:

- Percepción, donde se agrupan todos los elementos encargados de la percepción del estado del vehículo y del entorno que lo rodea. A modo de ejemplo se muestran en la figura los componentes empleados en la localización.

- Decisión, donde por un lado, se planifica la trayectoria del vehículo para alcanzar los objetivos establecidos y, por otro lado, se seleccionan las acciones de control en función de la información recibida de la etapa de percepción.
- Actuación, que agrupan los componentes encargados de ejecutar las acciones de control sobre cada uno de los distintos actuadores del vehículo.
- E/S General, donde se agrupan todos los elementos de bajo nivel que pueden ser utilizados por los módulos de otras etapas indistintamente. Por ejemplo, los dispositivos de entradas y/o salidas analógicas y digitales que se utilizan tanto para percibir el estado de un interruptor como para activar las válvulas del sistema de frenado.

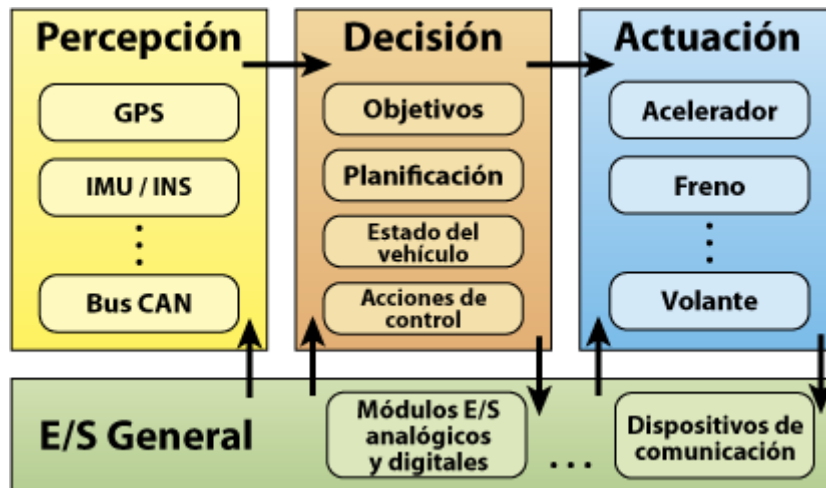


Figura 2: Esquema de la arquitectura de control

2.2.1 LCM y la comunicación entre procesos.

Cuando se ejecuta un programa o proceso en un ordenador, se reserva de forma estática o dinámica un espacio de memoria donde se almacenan los datos del mismo. Esto permite que los diferentes elementos del proceso puedan compartir variables y funciones de forma sencilla, bajo ciertas condiciones definidas en la programación. Sin embargo, cuando un software se descompone en varios procesos independientes, como en nuestro caso, el intercambio de la información no resulta tan trivial. Esto es lo que se conoce como el problema de la comunicación entre procesos (IPC por sus siglas en inglés).

En la actualidad existen diversas soluciones a este problema, algunas propias del sistema operativo y otras desarrolladas como APIs o *middleware*. La selección de la técnica más adecuada para el desarrollo de una determinada aplicación depende de distintos factores como el número de procesos que deben comunicarse, la relación que mantienen entre ellos, su sincronización, las limitaciones de permisos para la lectura/escritura y el número de ordenadores que hospedan el software (Mitchell, 2001).

En nuestro caso, empleamos la herramienta LCM (*Lightweight Communications and Marshalling*) como plataforma de intercambio de datos. LCM es un conjunto de librerías y herramientas para la comunicación entre procesos en sistemas de tiempo real desarrollado por el equipo *MIT DARPA Grand Challenge Team*. Esta utiliza un modelo *publish/subscribe* basado en la difusión *multicast* de mensajes UDP a través de canales de comunicación identificados con un nombre único (Huang et al., 2010). Con esta herramienta cada proceso publica directamente su información en determinados canales y se suscribe a aquellos que cuenten con la información que necesite para su funcionamiento, todo ello sin la necesidad de implementar un nodo central o un proceso maestro. La Figura 3 muestra la organización de los componentes en torno al LCM.

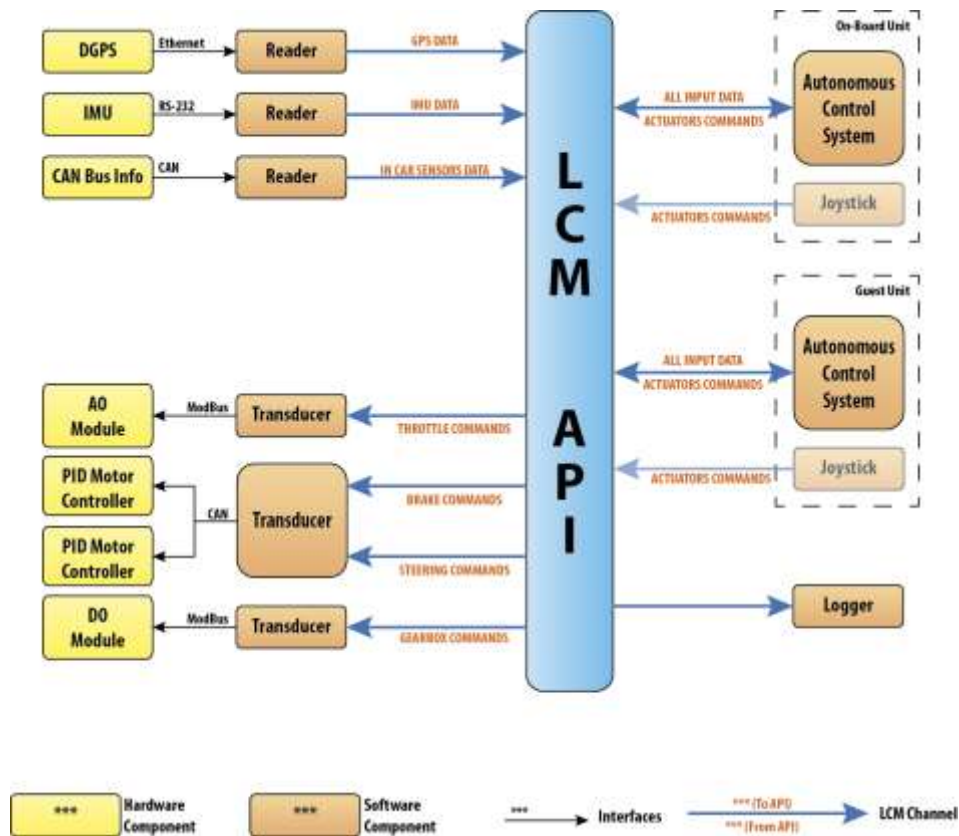


Figura 3: Esquema de la comunicación entre los distintos procesos del vehículo

2.3 Control del vehículo

Como se puede apreciar en la Figura 2 antes mencionada, la etapa de decisión está formada por 3 elementos: Misión, Planificador y Control. El módulo de misión representa el primer nivel de la planificación del vehículo. Al igual que ocurre con otros sistemas robotizados, el vehículo sin conductor requiere que se le indique la tarea específica que llevará a cabo. Esta tarea se puede definir de forma simple, como *ir desde el punto A hasta el punto B por el camino más rápido*; o bien podría ser más compleja, como sería en el caso de un autobús autónomo, el cual debe seguir una trayectoria predefinida, manteniendo una frecuencia de paso determinada mientras realiza paradas en puntos específicos y espera que los pasajeros embarquen y desembarquen. En cualquiera de los dos casos, la tarea se puede presentar como un conjunto de sub-objetivos que se deben alcanzar hasta completar la misma. Esta lista de objetivos es lo que se considera la misión del vehículo.

Una vez definida la misión del vehículo, el siguiente paso consiste en generar una trayectoria de referencia adecuada para completar la tarea. Con este fin se ha implementado el módulo Planificador, segundo en la jerarquía dentro de la etapa de decisión. Éste módulo genera la trayectoria del vehículo de forma dinámica, considerando además la evolución de los obstáculos percibidos en el entorno.

Por último, el módulo Control calcula, en cada ciclo, todas y cada una de las variables necesarias para el control del vehículo y ejecuta los controladores definidos para el modo de control seleccionado. La mayor parte de los trabajos desarrollados por AUTOPIA demuestran una clara preferencia por el uso de controladores basados en lógica borrosa, pero la arquitectura propuesta está abierta a la implementación de otras técnicas de control, siempre que los controladores utilizados sean coherentes con las restricciones de la arquitectura. Los controladores borrosos son definidos y ejecutados dentro de un sub-componente basado en el ORBEX (García et al., 2000).

2.4 Logros más relevantes en los últimos años

A lo largo de su trayectoria, el programa AUTOPIA ha analizado de forma individual gran parte de los escenarios a los que se enfrentan los conductores día a día. Así, se han desarrollado sistemas capaces de abordar situaciones como adelantamientos (Pérez et al., 2011b), incorporaciones (Milanés et al., 2011a), Control de Crucero Adaptativo (ACC) (Naranjo et al., 2006) y frenadas de emergencia (Milanés et al., 2011b), entre otros. A tal fin, se implementan controladores específicos para cada escenario, permitiendo que el sistema

seleccione el más adecuado para la tarea de acuerdo a las condiciones del entorno (Milanés, 2010).

2.4.1 Grand cooperative driving challenge

En Mayo de 2011 se llevó a cabo en Helmond (Holanda) la primera competición europea de vehículos autónomos, *Grand Cooperative Driving Challenge*, conocida como GCDC. La idea tras esta competición fue validar el funcionamiento de los sistemas desarrollados por distintos grupos de investigación en un entorno cooperativo. En concreto, los equipos debían demostrar su capacidad de control en una maniobra de control de cruceo adaptativo con cooperación (CACC). El intercambio de información entre los vehículos se realizó a través de una red inalámbrica, desarrollada a partir de la especificaciones de la arquitectura CALM y el estándar IEEE 802.11p. Durante esta edición sólo se contempló el control longitudinal de los vehículos, dejando el control lateral a cargo del conductor del mismo.

El GCDC se realizó en la autovía holandesa A270, entre las poblaciones de Helmond y Eindhoven, la cual se cerró totalmente al tráfico durante el evento. A pesar de que inicialmente se postularon 11 equipos, sólo 9 de ellos superaron los requisitos mínimos establecidos por la organización, estando el Programa AUTOPIA entre estos participantes. Durante la competición se realizaron varias pruebas que evaluaban el rendimiento del sistema para iniciar y mantener una formación de pelotón durante un recorrido de aproximadamente 6 km de longitud. En esta competición AUTOPIA consiguió el quinto lugar de la clasificación general, alcanzando además la máxima puntuación en cuanto a la evaluación cooperativa del sistema. La Figura 4 muestra los coches durante el GCDC.



Figura 4: Vehículos en el GCDC. Platero abajo a la izquierda.

2.4.2 Demostración de conducción autónoma en carreteras abiertas

En Junio de 2012 AUTOPIA llevó a cabo su primera demostración de conducción autónoma en carreteras reales. El principal objetivo tras esta demostración fue validar el funcionamiento, robustez y capacidad de la arquitectura propuesta para afrontar el problema de la conducción autónoma, bajo condiciones mucho más reales a las que se pueden alcanzar en las instalaciones de prueba. Así, se realizó un recorrido de 100 km de longitud, desde la población de San Lorenzo de El Escorial hasta las instalaciones del CAR en Arganda del Rey.

Durante la prueba se emplearon los dos vehículos C3 del Programa, conocidos como Clavileño y Platero. La función principal del primero fue servir de guía a Platero, que circulaba detrás. De esta forma, los vehículos cooperaban en la construcción de una trayectoria precisa que permitiese al segundo vehículo realizar el recorrido de forma segura. Esto ha sido necesario debido que no se contaba con mapas lo suficientemente precisos para el recorrido seleccionado. Adicionalmente, se implementó un sistema de ACC para mantener la distancia de seguridad en todo momento. Así, ambos vehículos circulaban en una formación de pelotón. El intercambio de información se realizó a través de los sistemas de comunicaciones IEEE 802.11 p con los que cuentan los vehículos.

El experimento tuvo una duración aproximada de 92 minutos, con velocidad promedio de 66 km/h. Desde el punto de vista del tiempo de ejecución, se alcanzó un 99,03% de conducción autónoma, ya que la presencia de un túnel de 900 metros de largo nos forzó a pausar el modo autónomo y reiniciar el algoritmo de localización de los vehículos por medidas de seguridad.

La Figura 5 muestra dos fotografías realizadas durante el recorrido. En la primera imagen se observan los vehículos Clavileño y Platero en la autovía, a la salida de San Lorenzo de El Escorial. La segunda imagen es una captura del interior del vehículo seguidor. En esta última fotografía se observa al autor leyendo un libro —sujetado con ambas manos— mientras que el vehículo circula automáticamente por la autovía. La presencia del conductor fue un requisito establecido por la Dirección General de Tráfico para garantizar la seguridad tanto de los vehículos de la demostración como del resto de vehículos que circulaban en la vía pública.



Figura 5: Fotografías tomadas durante la demostración de conducción autónoma.

3 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ACTUALES

Las líneas de investigación actuales del grupo AUTOPIA se orientan hacia la cooperación entre sistemas. Los nuevos retos implican el desarrollo de nuevos sistemas para mejorar el desempeño de diferentes aspectos de los ITS, tales como la eficiencia, fiabilidad y seguridad.

En el pasado, la investigación sobre sistemas embebidos se enfocó principalmente en los problemas de diseño y optimización de estos sistemas computacionales. Sin embargo, en los últimos años, el foco se ha trasladado a la sinergia compleja entre elementos computacionales y el entorno físico con el que interactúan. Esto ha dado lugar al término Cyber-Physical System (CPS) o Sistema Ciber-Físico (Bartocci et al., 2014), en el que quedan enmarcados los ITS ya que involucran un cercano acoplamiento entre sistemas físicos, recopilación de información distribuida e infraestructuras de difusión, que proveen información para guiar y controlar la operación de estos sistemas (Gokhale et al., 2008).

Las oportunidades que ofrece el paradigma de CPS en cuanto a ITS, abarcan aplicaciones individuales para vehículos, cooperación entre vehículo e infraestructura y cooperación entre diferentes sistemas de infraestructura tal y como se muestra en la FIGURA XXX. Los sistemas desarrollados por el Programa AUTOPIA hacen uso de comunicaciones V2V y V2I así como de sistemas autónomos de percepción basados en sensores tales como lidar, radar o cámaras. El trabajo de AUTOPIA se ha centrado principalmente en el desarrollo de sistemas para el vehículo y sistemas de cooperación vehículo-infraestructura.



Figura 6: Espectro de oportunidades de investigación de CPS en el marco de los ITS. Figura basada en (Gokhale et al., 2008)

En la actualidad, uno de los mayores retos en el campo de la movilidad en lo que a ITS se refiere, consiste en interconectar sistemas independientes con el fin de extraer un beneficio. Un ejemplo podría ser la interconexión de varios subsistemas urbanos tales como sistemas de información de tráfico, sistemas de predicción meteorológica, sistemas de control de semáforos, sistemas de gestión de vehículos de emergencia y sistemas de enrutamiento de vehículos. Actualmente ya se cuenta con este tipo de sistemas en numerosas ciudades. Sin embargo, éstos actúan de forma independiente para conseguir sus propios objetivos tales como minimizar tiempos de espera de vehículos en las intersecciones o calcular rutas óptimas para un vehículo. La interconexión de estos sistemas permitiría una gestión más eficiente de flotas de vehículos de emergencia en situaciones críticas, por ejemplo, permitiendo favorecer la ruta óptima de una ambulancia actuando sobre las temporizaciones de los semáforos y ofreciendo rutas alternativas al resto de vehículos para descongestionar la zona afectada basándose en información proveniente de los sistemas de información de tráfico y sistemas de información meteorológica.

La cooperación entre sistemas permite ofrecer nuevos servicios que conllevan la obtención de beneficios económicos y sociales a la vez que incrementan la eficiencia y seguridad en sistemas de transporte. Varios proyectos europeos recientes abordan estos problemas.

El Centro de Automática y Robótica es parte del proyecto europeo ACCUS (*Adaptive Cooperative Control in Urban Subsystems*). El objetivo de este proyecto es la integración de subsistemas urbanos tales como ITS, sistemas de iluminación o sistemas de gestión energética, bajo el paradigma de Sistema de Sistemas: Los sistemas urbanos evolucionan de forma independiente, tienen sus propios propósitos y su propia gestión. Esta integración permitiría la gestión del comportamiento emergente que pudiera surgir al interconectar diferentes subsistemas. Esto constituye un gran desafío teniendo en cuenta que el lazo de

control se extiende a través de varios sistemas de diferente naturaleza. ACCUS pretende desarrollar un marco teórico y práctico para el diseño de nuevas aplicaciones dentro de escenarios propios de ciudades inteligentes más bien que desarrollar soluciones para específicas escenarios particulares.

En el ámbito de la investigación sobre el transporte, la simulación toma un papel importante. La simulación de ITS es indispensable a la hora de desarrollar nuevos sistemas inteligentes tales como sistemas de ayuda a la conducción o sistemas de control cooperativo entre vehículos, donde aspectos como la seguridad y fiabilidad son factores clave. Las técnicas de simulación también permiten reducir el coste económico asociado a pruebas experimentales con vehículos e infraestructuras reales. Por ello, el foco de AUTOPIA también se sitúa sobre el desarrollo de herramientas de simulación para la validación de los distintos sistemas desarrollados. La Figura 7 muestra una captura de pantalla de una simulación de controladores longitudinales y laterales para el control autónomo de un vehículo.

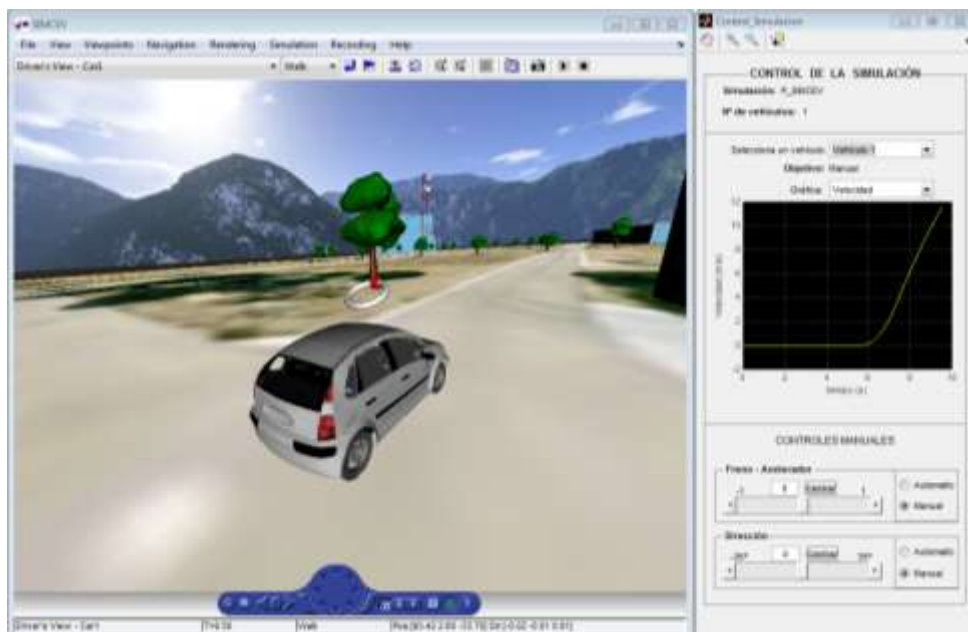


Figura 7: Captura de pantalla de una simulación

El Programa AUTOPIA trabaja en nuevas técnicas de simulación que permiten la interacción en tiempo real entre elementos virtuales y reales (tanto vehículos como sistemas de infraestructura). El uso de estas técnicas permite el prototipado rápido de sistemas tales como sistemas de control para maniobras cooperativas entre vehículos autónomos. También permite realizar un primer acercamiento al acoplamiento entre la parte computacional de un CPS y los sistemas físicos desde una etapa temprana del desarrollo.

La Figura 8 muestra dos capturas de pantalla de una prueba experimental donde dos vehículos simulados interaccionan con un vehículo real.



Figura 8: Captura de video. Mezcla realidad-simulación

4 CONCLUSIONES

El Programa AUTOPIA ha desarrollado e implementado satisfactoriamente una arquitectura de control para la conducción autónoma de vehículos, basada en una estructura modular de software con la que se consigue aprovechar en mayor medida los recursos computacionales del sistema, además de minimizar el riesgo de bloqueo del software y retrasos de procesamiento.

Gracias a la implementación de esta arquitectura ha sido posible alcanzar resultados muy alentadores en las últimas demostraciones realizadas, siendo las más relevantes las del GCDC, donde se alcanzó el 5to lugar de la clasificación general y la demostración de conducción autónoma realizada en carreteras españolas. No obstante, aunque no se abarca en el ámbito de esta comunicación, este sistema también ha contribuido al resultado de otros proyectos como el GUIADE y ONDAF, realizados en los últimos años en cooperación con otras instituciones.

Actualmente el Programa ha expandido su campo de desarrollo más allá del coche, profundizando en las líneas de investigación relacionadas con la cooperación con la infraestructura y otros sistemas Ciber-Físicos con potencial para el desarrollo y mejora de las soluciones de asistencia a la conducción.

5 BIBLIOGRAFÍA

BARTOCCI, E., HOEFTBERGER, O. y GROSU, R. (2014). “Cyber-Physical Systems: theoretical and Practical Challenges”. ERCIM News, páginas 8 – 9.

GOKHALE, A., TAMBE, S., DOWDY, L. y BISWAS, G. (2008). “Towards High Confidence Cyberphysical Systems for Intelligent Transportation Systems”. Department of EECS, Vanderbilt University, Nashville, TN.

GARCÍA, R. y DE PEDRO, T. (2000). “First application of the ORBEX coprocessor: Control of unmanned vehicles”. *Mathware and Soft Computing*, vol. 7, páginas 265–273.

GODOY, J., GRUYER, D., LAMBERT, A. y VILLAGRA, J. (2012) Development of an particle swarm algorithm for vehicle localization. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV 2012*, páginas 1114 – 1119.

HUANG, A.S. AND OLSON, E. y MOORE, D.C. (2010). “LCM: Lightweight Communications and Marshalling”. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, páginas 4057 –4062.

MITCHELL, M., OLDHAM, J. y SAMUEL, A. (2001). “Advanced Linux Programming”. *Landmark Series*. New Riders.

MILANÉS, V., (2010). “Sistema de control de tráfico para la coexistencia entre vehículos autónomos y manuales mediante comunicaciones inalámbricas”. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. Departamento de electrónica.

MILANÉS, V., ONIEVA, E., GODOY, J., VILLAGRA, J. y PEREZ, J., (2011a). “Automated On-Ramp Merging System for Congested Traffic Situations”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12(2), páginas 500 –508.

MILANÉS, V., ONIEVA, E., PEREZ, J., SIMO, J., GONZALEZ, C. y DE PEDRO, T. (2011b). "Making transport safer: A V2V-Based Automated Emergency Braking System". *Transport*, vol. 26(3), páginas 290–302.

MONTEMERLO, M., ROY, N. y THRUN, S., (2003). "Perspectives on standardization in mobile robot programming: The carnegie mellon navigation (CARMEN) toolkit". *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, páginas 2436–2441.

NARANJO, J.E., GONZALEZ, C. AND GARCIA, R. y DE PEDRO, T. (2006). "ACC+Stop&Go maneuvers with throttle and brake fuzzy control". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7(2), páginas 213 – 225,

PARNAS, D. L. (1972). "On the criteria to be used in decomposing systems into modules". *Commun. ACM*, vol. 15(12), páginas 1053–1058,.

PEREZ, 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". *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, páginas 1 –5.

PEREZ, J., MILANÉS, V. y ONIEVA, E. (2011a). "Cascade Architecture for Lateral Control in Autonomous Vehicles". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12(1), páginas 73–82.

PEREZ, J., MILANÉS, V., ONIEVA, E., GODOY, J. y ALONSO, J. (2011b). "Longitudinal fuzzy control for autonomous overtaking". *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2011)*, páginas 188 –193.