

Plataforma Modular Reconfigurable como Nueva Filosofía para el Desarrollo de Electrónica Vehicular Actualizable

V. Cañas^{a, *}, A. García^a, J. de las Morenas^b, J. Blanco^c

^a Grupo Autolog, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 13071, España.

^b Grupo Autolog, Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Almadén, 13400, España.

^c Grupo Autolog, Escuela Politécnica de Cuenca, Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, 16071, España

Resumen

Se presenta una nueva concepción en el desarrollo de Unidades Electrónicas de Control (ECU), también denominadas Unidades de a Bordo (OBU), desde una visión ontológica orientada en la compatibilización de los vehículos con las futuras tecnologías emergentes en el campo de la automoción. Se comienza por un estudio teórico que analiza la problemática en el sector del transporte que va a presentar la convivencia entre los vehículos actuales y los que van a ir apareciendo en el futuro; y que vendrán influenciados por conceptos tales como los vehículos conectados o los vehículos autónomos. Este artículo también aporta una nueva metodología en el diseño de unidades vehiculares de a bordo, basada en el concepto de unidades electrónicas modulares que definen su funcionalidad en base a los módulos que le sean acoplados. Adicionalmente se ha desarrollado un prototipo completo y totalmente funcional con el fin de analizar las posibilidades de la solución propuesta.

Palabras Clave:

Automoción, Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), arquitecturas de control distribuido y descentralizado, componentes, HiL, DSPs, FPGAs, Sistemas de Criticidad Mixta (MCS).

Modular and Reconfigurable Platform as New Philosophy for the Development of Updatable Vehicular Electronics

Abstract

A new conception in the development of Electronic Control Units (ECUs), which are also called On-Board Units (OBUs), is discussed in this paper from an ontological vision oriented to the compatibility of vehicles with future technologies in the automotive field. This work also provides a new methodology in the design of On-Board vehicle units. The proposed technique is based on the concept of modular electronic units that can change their functionality depending on the modules they are consisted of. The study was initially designed at the theoretical level, analysing the problems in the sector in the face of the coexistence between vehicles today and those that are bound to appear in the near future, and that will incorporate capabilities making them connected and even autonomous. Additionally, a fully operational prototype has been developed so as to ascertain the possibilities of the proposed solution.

Keywords:

Intelligent Transportation Systems (ITS), Cyber-Physical Systems (CPS), distributed control, HiL, DSPs, FPGA, MCS.

1. Introducción

Las tecnologías de sistemas de transporte inteligente (ITS) representan un punto de inflexión en el mundo del transporte y la automoción. El principal objetivo de estas tecnologías es el de conseguir interconectar al máximo número de agentes que participan en la red de carreteras de forma que se puedan implementar una elevada cantidad de servicios (Cañas et al., 2016; Kim et al., 2015).

Este intercambio de información entre vehículos, servicios, organizaciones y conductores conlleva un alto potencial en cuanto a crear nuevas oportunidades de mejora de las condiciones del tráfico rodado y de los sectores económicos asociados (Kim et al., 2015).

Los sistemas ciber físicos (CPS) están llamados a posibilitar una revolución tecnológica que lleve a los participantes de las distintas plataformas a estar intercomunicados en tiempo real a través de la nube. Por la propia definición de CPS, una mayor participación de los agentes implicados mejorará la calidad de

*Autor para la correspondencia: valentin.canas@uclm.es

los servicios habilitados por cada nueva tecnología implantada. Esto incluye no solo a los usuarios directos de las carreteras o a los servicios públicos como autoridades y departamentos de emergencias, sino también a los propios fabricantes. Los CPS se integran dentro de los ITS como una forma de interpretar el sistema de carreteras del futuro. Estas tecnologías son de hecho una adaptación del internet de las cosas (IoT) al campo de la automoción (Cañas et al., 2016). Una muestra de esto se observa en Poslad et al. (2015), donde se perfila el concepto de Smart City IoT con el objeto de optimizar los flujos de transporte en el entorno urbano.

Estas innovaciones disruptivas en el ámbito de los vehículos generan, sin embargo, varios problemas asociados a la convivencia con los vehículos que ya forman parte de la red de vehículos. Los cuales, en su gran mayoría, son incompatibles con estas nuevas tecnologías. Así, por ejemplo, un vehículo conectado moderno no tiene forma de comunicarse con vehículos antiguos, por lo que todas las funcionalidades diseñadas en beneficio mutuo basadas en ese enlace son inservibles. Un vehículo autónomo por ejemplo podría aprovechar enlaces de tipo vehicle to vehicle (V2V) para predecir mejor el comportamiento de los conductores de los vehículos no autónomos; lo que sin duda facilitaría la convivencia en los años de transición entre vehículos autónomos y no autónomos.

Por tanto, todas estas funciones que necesitan de una penetración importante en el sistema de carreteras, actualmente se ven fuertemente limitadas por el hecho de que la velocidad de renovación de los vehículos es lenta. Según datos oficiales de la European Automobile Manufacturers Association (ACEA), la edad media de la flota automovilística europea ha ascendido de forma sistemática desde los 8.4 años en 2007 a los 10.7 de 2015 (ACEA, 2017). Esto significa que los vehículos que se están vendiendo en la actualidad, que no incorporan las tecnologías que en el futuro se pretenderá implementar, tendrán una vida de uso estimada similar a los números mostrados. La transición hasta lograr la penetración completa de las nuevas tecnologías en la carretera será más rápida cuánto mejor se consiga incorporar a la flota antigua en los nuevos sistemas.

Frente a esta dificultad, la solución propuesta en este trabajo se focaliza en analizar la arquitectura de la electrónica de los vehículos. En general, la electrónica vehicular es modular, pero no multi-PCB (multi-placa), lo que impide que la electrónica sea actualizable. La solución propuesta, sin embargo, plantea un escenario multi-PCB, lo que permite que los distintos módulos funcionales de la electrónica puedan ser actualizados según se vayan desarrollando nuevas tecnologías. De esta forma la inclusión de esas nuevas funciones que necesitarán de una fuerte penetración en la red de vehículos no se verá tan ralentizada debido a la lentitud con que se renueva el parque automovilístico; dado que estas funciones pueden llegar no sólo a los nuevos vehículos sino también a los que ya están rodando en las carreteras.

Este artículo está organizado como sigue: En primer lugar, se muestra una revisión bibliográfica de los trabajos relacionados con la temática de este artículo. A continuación, en el apartado 3 se presenta la plataforma modular reconfigurable. Seguidamente, el apartado 4 expone la prueba del concepto mostrando un sistema modular reconfigurable desarrollado, específicamente una ECU. El apartado 5 presenta el análisis de los resultados obtenidos con el sistema

desarrollado. Finalmente se presentan las conclusiones y se proponen trabajos futuros.

2. Estado del Arte

En esta sección se analiza la evolución y el estado actual de las distintas áreas que inciden directamente en el desarrollo de unidades electrónicas vehiculares: en primer lugar, la electrónica de vehículos, y posteriormente las tecnologías de vehículos, en donde se hace un especial hincapié en las tecnologías que en la actualidad mayor notoriedad tienen en el sector por su potencial.

2.1. La electrónica vehicular

La incorporación de la electrónica al mundo de la automoción supuso una revolución fundamental que explica las altas cotas de fiabilidad y seguridad alcanzadas en los vehículos de hoy en día. En comparación, las soluciones electrónicas requieren de menos elementos móviles que las soluciones puramente mecánicas, y por ende se reducen considerablemente los diferentes tipos de fallas posibles. Asimismo, la electrónica presenta tiempos característicos mucho más rápidos que las alternativas mecánicas; lo que permite desarrollar sistemas computacionales en torno al sistema vehicular de forma más eficiente, rápida y segura que mediante soluciones mecánicas (Chong, 2010).

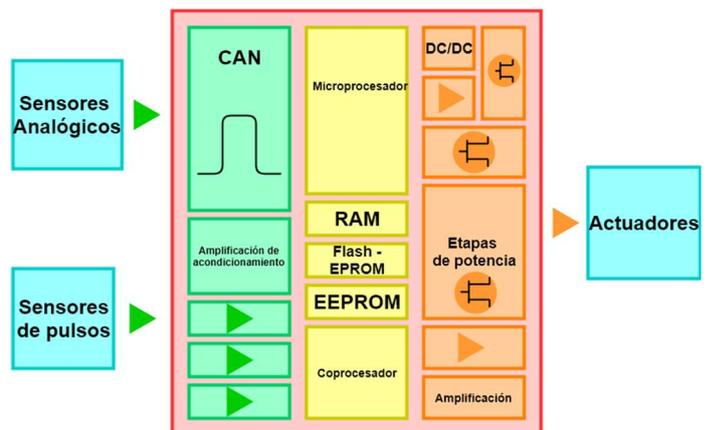


Figura 1: Bloques funcionales de una OBU estándar. Nótese que pese a disponer de una única PCB, la electrónica es distinguiblemente modular.

Desde que se comenzara a incorporar la electrónica al automóvil de forma tímida en la década de los 70, la tecnología ha sufrido grandes transformaciones. El avance de la electrónica automovilística ha sido posible en parte debido a las exigencias de las distintas regulaciones en términos de seguridad, eficiencia y especialmente de niveles de emisiones de gases contaminantes. El resultado es que la mayoría de las funciones que incorporan los vehículos no ha escapado al empuje de la electrónica (Chong, 2010).

El elemento electrónico principal y que forma parte fundamental de cada ECU es el calculador o centralita. Este dispositivo consta de una Placa Única Integrada (SBC, Single Board Computer) embebida, la cual dispone de todos los elementos necesarios para desarrollar su operación específica.

Como se observa en la Figura 1, las OBUs convencionales están formadas por varios módulos sobre una misma PCB. En la electrónica vehicular, por tanto, hay dos niveles de modularidad. El primer nivel está formado por las distintas

ECUs, cada una enfocada en una tarea en específico, e interconectadas entre sí a través de buses de comunicación. El segundo nivel de modularidad es el que forman los distintos bloques funcionales dentro de las propias OBUs.

Una tendencia cada vez más importante en el diseño de sistemas en tiempo real embebidos, como es el caso tratado en el presente artículo, es la integración de componentes con diferentes niveles de criticidad en una plataforma de hardware común. Al mismo tiempo, estas plataformas están migrando de sistemas mononúcleo a multinúcleo. Se han desarrollado técnicas para manejar sistemas de criticidad mixta, pero aún quedan áreas abiertas a la investigación, especialmente en el caso de hardware multinúcleo (Burns y Davis, 2017).

Un sistema de criticidad mixta (MSC) es aquél que tiene dos o más niveles distintos de criticidad (por ejemplo, crítico para la seguridad, para la misión, y de baja criticidad). La criticidad es una designación del nivel de seguridad contra fallos (Reghezani et al., 2017).

La mayor parte de los sistemas embebidos complejos que se encuentra en la industria de la automoción están evolucionando hacia sistemas de criticidad mixta con el fin de cumplir estrictos requisitos no funcionales relacionados con el coste, el espacio, el peso, la generación de calor y el consumo de energía. Los estándares de software en la industria automovilística europea (AU-TOSAR) abordan cuestiones de criticidad mixta, en el sentido de que reconocen que los MCS deben ser soportados en sus plataformas (Burns y Davis, 2017).

En Lu et al. (2013) se estudian mejoras del rendimiento real-time en comunicaciones. Más tarde se trabaja en la escalabilidad de sistemas multinúcleo basado en FPGA en Kliem y Voigt (2014). Han et al. (2017) analizan las posibilidades de compartir recursos en MSC multinúcleo basándose en la limitación de la carga de trabajo y el bloqueo de la sobrecarga y Reghezani et al. (2017) analizan la caracterización de interferencias en MSC bajo sistemas multinúcleo Linux. Deutschbein et al. (2017) analizan el funcionamiento de las tareas en modo ciclo en sistemas críticos para la seguridad y multinúcleo y Li et al. (2017) proponen un sistema de programación federada de criticidad mixta para tareas paralelas en tiempo real. Bate et al. (2017) proponen un protocolo de reactivación mejorado para software embebido de criticidad mixta. En Dai y Burns (2017) se analizan algoritmos para predecir el peor tiempo de ejecución en sistemas en tiempo real de larga vida útil. Burns y Baruah (2017) estudian la migración de tareas críticas en un entorno cíclico, y en Burns y Davis (2017) se realiza un extenso análisis del estado del arte en sistemas de criticidad mixta. Burns et al. (2018) realizan un análisis de configuraciones MSC robustas.

2.2. Marco Actual de la Tecnología en Vehículos

En los últimos años la carrera tecnológica ha evolucionado con fuerza en el sector del automóvil y del transporte; para el que se han desarrollado un gran número de ayudas a la conducción con el objetivo de mejorar la seguridad tanto urbana como en carretera. Algunos ejemplos de ello son el frenado de emergencia, el sistema eCall, o el control de crucero adaptativo.

Algunos ejemplos de aplicación se muestran en Garrido et al. (2016), donde se realiza un cálculo de trayectorias en intersecciones en tiempo real o en Flores et al. (2016) donde se

estudia el uso del cálculo fraccional para el seguimiento cooperativo de vehículos. Asimismo, en Astarita et al. (2015) se estudia una metodología cooperativa para establecer el consumo de combustible en tiempo real, o en Bifulco et al. (2015) un modelo lineal para estimar la influencia en el consumo de los ADAS. Aquí se vislumbra ya el enlace que hay entre ADAS y los sistemas colaborativos.

El enlace entre ADAS y sistemas colaborativos da lugar en sí mismo a otra revolución tecnológica en el sector del transporte: los llamados Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) (Cañas et al., 2016). El principal objetivo de estas tecnologías es el de interconectar el conjunto de vehículos en una red de forma que se puedan implementar nuevas medidas de seguridad, eficiencia, control y optimización de los flujos del tráfico tanto privado como comercial o público. Un sistema ITS incorpora por tanto un gran número de opciones y ayudas integradas que trabajan de forma coordinada.

Así, en Chen y Cheng (2010) se presenta un primer repaso a la aplicación de la teoría de agentes en ITS y estas filosofías son aplicadas en posteriores estudios. De este modo en Baur et al. (2010) y De Grande et al. (2016) se realizan simulaciones de redes de vehículos ITS. En Godoy et al. (2013) se propone una red auxiliar V2X para la mejora de varias funciones en carretera. En Kotb et al. (2016) se desarrolla un servicio de parking conectado. En Kim et al. (2015) se realiza un análisis de la movilidad ITS en Corea del Sur con conclusiones similares a Doecke et al. (2015) en donde se comprueba que la inclusión de una realimentación del estado de la red de vehículos conectados mejora el funcionamiento de un sistema de frenado automático.

Los ITS pueden tener un menor o mayor grado de complejidad y, en función de ésta, las funcionalidades y el espectro de vehículos que abarcan son distintas. Así, por ejemplo, algunos ITS se centran en la comunicación individual de cada vehículo con una central que se encarga de coordinar el sistema. En dicho caso se habla de un ITS centralizado o de tipo vehicle-to-infrastructure (V2I). Otro tipo de ITS son los descentralizados o vehicle-to-vehicle (V2V), en los cuales cada vehículo interactúa con los vehículos a su alrededor. El caso de ITS más complejo, que pretende abarcar el máximo de funcionalidades, es una combinación de los anteriores; de forma que cada vehículo puede interactuar tanto con los vehículos a su alrededor como directamente con una central del sistema. En este caso se trata de una red ITS híbrida o vehicle-to-X (V2X) (Barrachina et al, 2013; Stübing, H., 2013) donde X representa tanto vehículos como infraestructuras. Dado que estos últimos sistemas potencialmente integran toda la red vehicular, las funcionalidades implementadas son más complejas y fiables y, por tanto, pueden desarrollar medidas de cooperación entre vehículos. Este caso se corresponde con tecnologías de Cooperative-ITS (C-ITS)

Existen trabajos en este sentido como el de Kato et al. (2002), donde se dan los primeros esbozos en el control de vehículos para conducción colaborativa, y el de Vahidi y Escandarian (2003), donde se analiza el posible impacto del control de crucero adaptativo en los flujos de tráfico. Más tarde Arem et al. (2006) analizan los avances en las investigaciones en evasión inteligente de colisiones mediante control de crucero adaptativo y Hafner et al. (2013) propone una arquitectura de evasión cooperativa de colisiones en intersecciones. Posteriormente, Larue, Rakotonirainy et al. (2015) y Larue, Kim et al. (2015) analizan cómo varía el

comportamiento de los conductores ante la introducción progresiva de funcionalidades ITS.

Un paso más allá de los sistemas de transporte inteligente sigue la vía de la conducción autónoma. Así en Christie et al. (2016) se muestra una serie de trabajos en vehículos eléctricos autónomos o sin conductor en Europa en el proyecto CATS (City Automated Transportation System). En ese proyecto se empieza ya a analizar el siguiente paso que corresponde a una red de vehículos no sólo conectados sino además autónomos; lo que permite elevar la conducción cooperativa a su máximo exponente.

En resumen, todos estos trabajos muestran que estas tecnologías son una fuente de beneficios en ámbitos tales como seguridad vial, eficiencia, optimización y obtención de nuevos servicios por parte de los usuarios.

Estos estudios han tenido una evolución paralela en el ámbito de la seguridad. Así en Chong (2010) se realiza un análisis sobre el crecimiento de la electrónica en vehículos del futuro desde el punto de vista de la securización hardware. En Stübing (2013) se realiza un extenso y profundo análisis de los distintos ataques que puede sufrir una plataforma de vehículos conectados y se plantean los enfoques necesarios para evitar esas posibles vulnerabilidades. También Woo et al. (2015) y Dellios et al. (2015) se centran en analizar la seguridad en el coche conectado.

2.3. Problemática

El sector de la automoción es en la actualidad especialmente competitivo. Existe una especialización muy alta y suele ser habitual que se mantengan las plataformas cerradas con el objetivo de evitar el espionaje entre fabricantes. Esto ocasiona que cada fabricante centre sus esfuerzos en ciertos puntos específicos arrastrando los problemas que surgen del propio hecho de trabajar de forma cerrada y especializada.

Así, cada fabricante apuesta por una serie de tecnologías distintas, y por añadido es común que desarrolle sus tecnologías de forma exclusiva; lo que conlleva que la competencia no pueda acceder a dichos avances de forma directa y sea frecuente recurrir a la ingeniería inversa. Esto finalmente deriva en una fragmentación tecnológica muy grande, dado que las soluciones electrónicas implementadas entre los vehículos de un fabricante y otro pueden variar de forma considerable, no siendo compatibles entre sí de ningún modo.

Son varias las tecnologías en desarrollo para los sistemas de transporte del futuro en el ámbito de la interconexión entre vehículos; así como de los mismos con la nube. Esto quiere decir que dichas tecnologías aún no están disponibles a niveles de producción de nuevos productos. En caso de que el hardware de los vehículos no se pueda actualizar, las tecnologías empleadas en las siguientes generaciones de vehículos podrían quedarse obsoletas en unos años; o crearse nuevos estándares que dejarán fuera del sistema a muchos vehículos antiguos.

El problema de la compatibilidad se acentúa más aún dado que es común que ni tan siquiera exista compatibilidad de componentes entre vehículos del mismo fabricante. Esto puede deberse a que los nuevos diseños sean completamente incompatibles con los anteriores; pues no se trabaja en perseguir la retro compatibilidad de la misma manera que en otros sectores como el de los componentes informáticos. Otro

factor de incompatibilidad lo puede constituir el hecho de que el mismo fabricante emplee simultáneamente varias tecnologías en paralelo para distintos modelos, con características similares, pero sin compatibilidad directa. Esto es así porque en definitiva el fabricante contempla cada vehículo como un producto cerrado y enfoca todos sus esfuerzos en ese sentido.

Esto ha llevado a la industria a asumir como una situación aceptable que los vehículos no puedan recibir ningún tipo de actualización, ni a nivel de Software ni menos aún a nivel de Hardware electrónico. Esta idea sin embargo ha empezado a cambiar debido a la entrada de nuevos fabricantes provenientes del sector tecnológico que tienen una concepción distinta en cuanto a actualizaciones se refiere. Así a modo de ejemplo, el fabricante Tesla Motors ha estado actualizando sus vehículos a nivel Software de forma constante durante los últimos años, añadiendo nuevas funcionalidades a los vehículos ya vendidos. Incluida la conocida función Autopilot que permite al vehículo funcionar de forma semiautónoma (Ross, 2016).

Este fabricante sin embargo ya ha anunciado que sus nuevos vehículos van a tener un ciclo de renovación de entre 12 y 18 meses, lo que significa que los vehículos van a ir quedando obsoletos en períodos de tiempo relativamente cortos, a partir de los cuales dejarán de recibir cualquier tipo de actualización. La situación del resto de fabricantes no es mucho mejor, sino al contrario ya que Tesla es uno de los pocos fabricantes que realmente llega a dar algún tipo de actualizaciones a los vehículos que ya han sido vendidos.

En el caso de los fabricantes tradicionales la situación es más drástica puesto que el vehículo queda obsoleto en el mismo momento en que es adquirido; ya que a partir de entonces la situación típica es que no vuelva a recibir ninguna actualización de Software salvo las correspondientes a seguridad. Existen algunos avances en este punto: Volkswagen por ejemplo permitirá que los vehículos accedan a nuevas funcionalidades vía software, pero sólo de forma temporal y como demostraciones para que, tras un período de uso, el propietario decida si quiere pagar por dicho paquete o bien renunciar a él.

Esto representa una alternativa completamente legítima para el fabricante, pero conlleva dificultades a la hora de conseguir una solución homogénea al problema que aquí se pretende remarcar: las tecnologías futuras a implementar en las carreteras necesitan que haya una alta penetración de la tecnología en el sistema de transporte para que pueda funcionar explotando todo su potencial. Y además requieren de un alto nivel de aceptación por parte de los usuarios; así como de que éstos puedan participar de la nueva tecnología con facilidad y obteniendo beneficios claros. Para lo cual, dichas tecnologías, deben mostrar sus bondades desde el primer día, facilitando a los usuarios la entrada al sistema.

En este sentido varios estudios han analizado la penetración mínima de estas tecnologías para que ciertas aplicaciones puedan ser funcionales (Kim et al., 2015). En Doecke et al. (2015) también se pone de manifiesto cómo una mayor penetración de la tecnología de vehículos conectados en el parque móvil mejora de forma notable la respuesta del freno automático.

Por tanto, la penetración de los nuevos sistemas tecnológicos en la carretera es un parámetro que afecta directamente a su éxito puesto que incide en la calidad de su funcionamiento. En consecuencia, los beneficios se

maximizan en una situación de buena penetración en el sistema de carreteras.

Tan relevante como la penetración es la estandarización. La existencia de diversas tecnologías con funcionalidades similares pero incompatibles entre sí resulta contraproducente dado que en dicha situación aparece la llamada fragmentación de sistemas. En un entorno de este tipo varios sistemas funcionan en paralelo, pero no cooperan de forma fructífera; por lo que las funcionalidades efectivas y los beneficios obtenidos se ven limitados.

Sin embargo, la industria se encamina hacia un punto completamente distinto, en el que sólo podrán sacar provecho de las funciones más novedosas los vehículos que desde el mismo momento de su fabricación incorporen dicha tecnología. Lo que significa que la implantación de éste será lenta dado que no se facilitará a los usuarios potenciales que participen, sino que se les pondrá una gran barrera: necesitarán comprar un nuevo vehículo. Además, al tener funcionalidades limitadas dado que la penetración inicial del sistema podría ser baja, el incentivo por participar de esa misma tecnología podría ser mínimo para el usuario común.

Un sistema en el que los vehículos pueden interactuar de forma inteligente disminuye en gran medida las dificultades de convivencia entre los vehículos de conducción autónoma y el resto de los vehículos (Christie et al., 2016; Cañas et al., 2016).

Adicionalmente, como consecuencia de la forma de trabajo de la industria del automóvil, surge un problema recurrente que afecta a las instituciones investigadoras. Cada vez que una Universidad o un centro investigador pretende desarrollar su investigación en torno al sector automotriz, lo más común es hacerlo de la mano de algún fabricante de forma que se pueda acceder a su tecnología. Esto tiene puntos positivos, tales como el aprendizaje mutuo de mundos tan distintos como el académico y el industrial; pero al mismo tiempo estos acuerdos suelen ir acompañados de cláusulas que ponen límite a las investigaciones a llevar a cabo, así como a la difusión de los desarrollos obtenidos.

Audi junto con Nvidia ha desarrollado una alternativa basada en hardware modular que puede ser indicio de cómo la industria va a tratar de adaptarse a un entorno cada vez más volátil en los próximos años debido a las sucesivas tecnologías disruptivas que van a ir apareciendo. La GPU del sistema de aprendizaje automático es un módulo cuyo conector se encuentra estandarizado, lo que facilita los diseños futuros además de posibilitar la actualización del componente según este vaya evolucionando con el paso de los años (Wang et al., 2017).

Ante el problema de la baja estandarización han ido apareciendo desarrollos adicionales realizados por Universidades, teleoperadoras como Vodafone (Festag, 2014) y fabricantes. En Ott y Kutscher (2006) se diseña una primera pasarela modular para conectar vehículos en general a la red. Más tarde en Wallmark et al. (2014) se lleva a cabo un demostrador de vehículo que permite realizar ensayos, no sobre un vehículo comercial, sino sobre uno abierto que permite un control absoluto de la mecánica y de la electrónica. En Astarita et al. (2015) se propone una forma de expandir funcionalidades ITS a los vehículos no inteligentes empleando para ello el teléfono inteligente como pasarela. En la regulación (EU) No 165/2014 sobre tacógrafos inteligentes, se establece que a partir de 2017 todos los camiones deben incorporar una unidad con conexión a internet. A causa de esto,

en Cañas et al. (2016) se propone y estudia la inclusión de estos vehículos, que por ley ya disponen de conectividad a una red centralizada, en un esquema ITS estandarizado. Esto se consigue mediante el rediseño de los tacógrafos inteligentes de forma que éstos actúen al mismo tiempo como pasarela del camión al estándar de interconexión de vehículos.

2.4. Motivación

En el presente artículo se plantea una revisión ontológica de la modularidad en la electrónica del automóvil. En la exhaustiva revisión bibliográfica realizada, se constata como la configuración típica actual en la electrónica vehicular se basa en varios módulos interconectados por buses. Siendo cada uno de dichos módulos a su vez modulares en el sentido de que están formados por distintos bloques funcionales, pero no en el sentido físico dado que comparten una misma PCB indivisible. A partir de esta afirmación surgen varias preguntas: ¿Será ésta la configuración óptima de producción? ¿Y para las próximas generaciones tecnológicas? Este estudio sienta las bases para una nueva plataforma que permita enfrentarse a los problemas derivados de un entorno cambiante como es la industria del automóvil en la actualidad.

3. Plataforma Modular Reconfigurable

La idea central del sistema propuesto se basa en que cada unidad esté formada por distintos módulos en PCBs diferenciadas. Cada módulo cumple así una función como parte de una capa de abstracción superior en la que un algoritmo toma el control de la coordinación de los distintos componentes de la electrónica vehicular otorgándole la condición de CPS.

La configuración típica de cada unidad dispone de uno o varios módulos computacionales o principales que funcionan como maestros y se encargan de coordinar el resto de los módulos conectados. Como se puede ver en la Figura 2, los distintos módulos se acoplan a un módulo principal de forma que se pueden obtener distintas unidades mediante la combinación de distintos módulos. Cada unidad modular está formada por un hardware distinto, estando cada una de ellas encargada de una tarea para la cual su hardware está especializado.

El hecho de que cada unidad sea individualmente modular abre un gran abanico de posibilidades tales como actualizar los componentes a nivel hardware en el futuro. Esto permite asimismo que los diseños sean reutilizables y que las mejoras hardware de una generación a otra no tengan por qué circunscribirse a cada unidad electrónica de control (ECU, OBU) desarrollada. Por ejemplo, de una generación a otra esta solución posibilita mejorar un módulo computacional sin modificar el resto de los módulos.

3.1. Hardware Modular Reconfigurable

El concepto propuesto consiste en una plataforma concebida desde una nueva visión en la forma de desarrollar el hardware de las unidades electrónicas vehiculares mediante una base estandarizada y modular. La plataforma consta de una serie de módulos normalizados de forma que modificando la selección y disposición de los módulos se obtienen distintas unidades de control electrónico. Estas unidades a su vez

pueden ser dispuestas de distintas formas, sin tener que atender a un único protocolo.

A diferencia de las ECU's comerciales, la modularidad de las unidades electrónicas según el concepto propuesto no sólo se circunscribe al flujograma de funcionamiento de la propia unidad, sino que cada módulo se encuentra separado a nivel hardware en PCBs individuales.

Cada unidad modular puede estar formada por distinto hardware, estando cada una de ellas encargada de una tarea para la cual su hardware está especializado. El hecho de que cada unidad sea individualmente modular abre un gran abanico de posibilidades tales como actualizar los componentes a nivel hardware en el futuro.

Esto permite asimismo que los diseños sean reutilizables y que las mejoras hardware de una generación a otra no tenga por qué circunscribirse a cada placa. Por ejemplo, se puede mejorar un módulo computacional sin modificar el resto de los módulos.

El aumento de los módulos electrónicos añade una nueva complejidad al diseño general del producto de un automóvil, mientras que, al mismo tiempo, introduce muchos factores nuevos que tienen que ser considerados para permitir que la industria sea viable y competitiva en el largo plazo. Factores como fiabilidad, diseño modular y gestión de datos son algunos ejemplos. A medida que se avanza en una era de automóviles de combustible alternativo, hay que tener en cuenta que la inclusión de la electrónica en los vehículos sólo aumentará. Por lo tanto, es vital entender cómo el diseño electrónico madura junto con las otras disciplinas en el ciclo general de diseño del producto; y cómo afecta el resultado final a la producción de vehículos. Esta solución se muestra también muy interesante en los ámbitos del prototipado de nuevos conceptos.

En algunos casos, principalmente en el caso de los módulos de procesamiento o de control, un mismo módulo puede incorporar funciones propias de otro tipo de módulos. Así, los módulos de procesamiento en ocasiones incorporan funcionalidades de lectura y escritura digital o analógica o de comunicaciones inter-unidades.

3.2. Plataforma Software Basada en CPS y Computación Reconfigurable

La modularidad reconfigurable de la plataforma no está definida únicamente a nivel Hardware, sino que ocurre lo mismo a nivel Software. El algoritmo encargado de la gestión de la unidad desde el módulo principal de la misma dispone de bloques de control exclusivos para el manejo de cada uno de los módulos subordinados posibles. De esta manera, el algoritmo de control analiza los módulos conectados al bloque computacional y se coordina con el resto de las unidades del sistema para definir su funcionalidad dentro del sistema vehículo en el que se integra. Esta característica es controlada desde el módulo principal que es la encargada de distribuir las funcionalidades y la carga computacional entre las distintas unidades del vehículo.

El modo de funcionamiento explicado está enfocado a la investigación y el desarrollo de nuevos sistemas y funcionalidades en el sector de la automoción. En el caso de los vehículos destinados al usuario final, sin embargo, el sis-

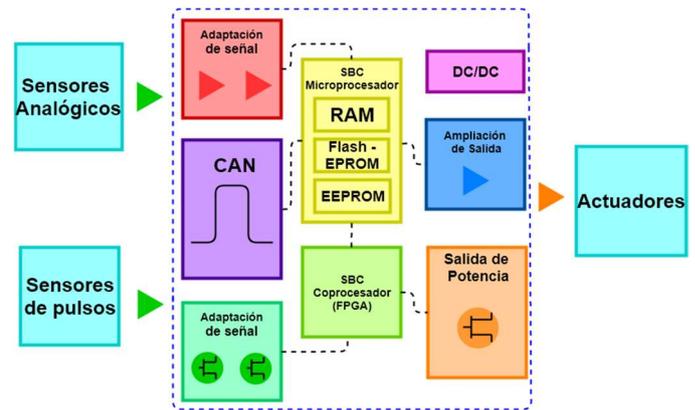


Figura 2: Ejemplo de configuración de varias placas que integran un conjunto modular. Obsérvese cómo cada placa independiente cumple con una función específica dentro del conjunto.

tema debe seguir ofreciendo las ventajas del sistema modular, pero al mismo tiempo ofrecer una protección ante un potencial atacante. De tal forma, el modo de funcionamiento es distinto de modo que el Software de cada ECU deja atrás su modularidad. Así, el algoritmo de cada módulo principal consta únicamente de los bloques de Software correspondiente a los módulos que va a llevar conectados y, además, la funcionalidad ahora está predefinida. En este modo de usuario final las ventajas de disponer de un sistema modular no desaparecen, sino que sólo pueden ser actualizadas por parte de los servicios técnicos autorizados para tal fin.

La plataforma modular propuesta contiene hardware y software informático que puede ejecutar varias aplicaciones de criticidad diferente, por ejemplo, críticas y no críticas para la seguridad. Esto también es conocido como sistema de criticidad mixta. En estos sistemas, no resulta trivial garantizar la ejecución en tiempo real de forma determinista de las aplicaciones críticas.

Los sistemas tradicionales de seguridad crítica tenían que probarse y certificarse en su totalidad para demostrar su fiabilidad. Un sistema de criticidad mixta es un sistema que contiene hardware y software informático que puede ejecutar varias aplicaciones de criticidad diferente. Aplicaciones de diferente criticidad están diseñadas para diferentes niveles de seguridad, siendo las aplicaciones de alta criticidad las más costosas de diseñar y verificar.

Demostración del Concepto: ECU Reconfigurable La unidad básica de la que se nutre la plataforma propuesta son los módulos. Como ya se ha explicado antes, con la combinación de varios módulos puede formarse cualquier ECU de vehículo. Algunos ejemplos de ECU's, obtenidas según la combinación de módulos y la programación de estos, son la ECU de inyección o de control del tren motriz, de antibloqueo de las ruedas (ABS), de control de estabilidad (ESP) o de telecomunicaciones (TCU), entre muchas otras.

Estas ECU's incorporan módulos de comunicación siguiendo los estándares de la industria automotriz. De esta manera, son capaces de comunicarse entre ellas mediante un protocolo tal como CAN, LIN, Flexray o A-Ethernet, empleando dicho canal para intercambiar información relevante para su funcionamiento. Gracias a esto, estas ECU's pueden ser empleadas para sustituir una ECU en un conjunto electrónico cerrado, o bien pueden formar parte de un sistema únicamente compuesto con electrónica de la plataforma modular presentada.

Para poner de manifiesto la flexibilidad de la plataforma modular, se ha desarrollado una Unidad Electrónica de Control a partir de la combinación de varios módulos diseñados en el laboratorio. La ECU de inyección es la encargada de una de las tareas más cruciales de un vehículo, puesto que controla la ignición de los cilindros del motor. En el caso de un vehículo eléctrico, la unidad equivalente es la Unidad Electrónica del Motor síncrono que coordina las señales necesarias para gobernar los bobinados del motor eléctrico. El demostrador que se describe detalladamente en las siguientes subsecciones tiene el aspecto mostrado en la Figura 3. En esta imagen se pueden apreciar los diferentes módulos montados sobre un soporte común; aunque se han separado las etapas de electrónica de potencia (especialmente la destinada a la adaptación de la señal de los inyectores) en una caja con las dimensiones adecuadas para su adaptación en el hueco del motor.

3.3. Planta del Demostrador

La unidad electrónica original que se sustituye con este demostrador modular es una ECU DC MR-PLD fabricada por Daimler AC para los motores de camión Mercedes-Benz WD de las series 950.0-954.3 V6.

La unidad de control del motor genera las señales necesarias para la inyección electrónica de combustible diésel y está diseñada para las series de motores 450, 500 y 900. La función principal de la unidad de control es la generación de la señal requerida para activar los solenoides de las válvulas de inyección. Con respecto a esto, se calculan y configuran el inicio de inyección óptimo y la cantidad de inyección necesaria para el par o el régimen de giro exigido por la unidad de control en el lado del motor en función de los parámetros característicos del propio motor, así como de las variables ambientales tales como presión atmosférica, temperatura ambiental o proporción de oxígeno en el aire.

La unidad de control también proporciona características adicionales como el reconocimiento de fallas, la capacidad de actuar en modos de funcionamiento seguro, diagnóstico e interfaces con otros sistemas de control a través del CAN-BUS.

3.4. Hardware de la ECU Reconfigurable

Se ha seleccionado un núcleo FPGA encargado de leer las señales de posicionamiento de los ejes del motor y generar las correspondientes señales de ignición sobre una etapa de salidas de alta potencia. El núcleo FPGA funcionaría como un dispositivo esclavo de la CPU de la placa principal de control (SBC). Es sobre la SBC donde se implementan las distintas metodologías de control de la inyección. Esta unidad consta, por tanto, y como se puede apreciar en la Figura 4, de dos núcleos de procesamiento. De esta forma este sistema se estructura como una constelación de dos estrellas, siendo una de ellas satélite (FPGA) de la principal (SBC).

La estrella principal consta de tres módulos secundarios o planetas: Módulo de comunicación CAN-BUS, módulo de puertos digitales I/O y módulo analógico de entradas y salidas. Estos dos últimos además constan de dos módulos adicionales o satélites.

En el caso del módulo digital, los módulos asociados son un módulo de protección digital por buffers (un banco de amplificadores operacionales conectados en modo de seguimiento para este caso) para la entrada de señales y un módulo de adaptación optoacoplada para la salida de señales digitales.

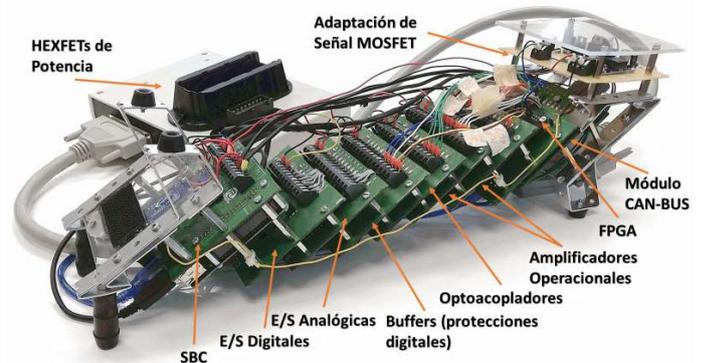


Figura 3: ECU Reconfigurable Desarrollada

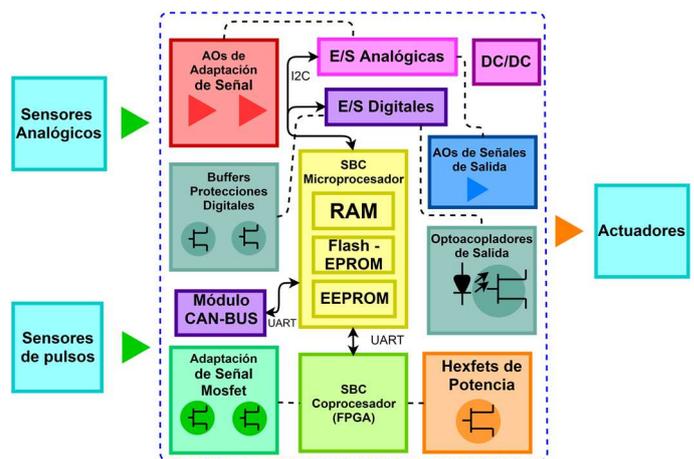


Figura 4: Esquema de la ECU Reconfigurable

Los módulos asociados al módulo analógico son un módulo de protección de entrada de señal analógica basada en amplificadores operacionales de baja potencia y para la salida otro módulo de adaptación de señal analógica basada en amplificadores operacionales provistos de etapas de potencia. Por otro lado, la estrella satélite, cuyo núcleo es el módulo FPGA, tiene tres planetas asociados: Un módulo de protección y adaptación de las señales rápidas del motor a señal digital mediante transistores MOSFET, y por otro lado dos módulos de salida digital mediante transistores de potencia HEXFET, lo cual refleja una solución habitualmente utilizada en el sector.

3.5. Software de la SBC

El sistema operativo sobre el que se ejecutan las operaciones en la SBC es Linux-rt kernel 4.14_rt empleando el parche PREEMPT_rt, corriendo sobre un procesador ARMv8 de 64 bits y cuatro núcleos con una frecuencia de trabajo de 1.4GHz.

Como se puede observar en la Figura 5, inicialmente se realiza un chequeo de los distintos protocolos de comunicación que son necesarios para el correcto funcionamiento de la ECU.

En caso de que se produzca un fallo en alguno de los distintos protocolos, el programa terminará su ejecución. Si las comunicaciones son establecidas de manera correcta, se procede a realizar un vaciado de los buffers de la comunicación UART, tanto el del puerto utilizado para la comunicación con la FPGA como el del utilizado para la comunicación directa con el simulador del motor. También se inicializan los puertos de la placa de E/S digitales para que la comunicación I2C con la SBC sea correcta. Una vez finalizado el chequeo e inicialización de los protocolos de comunicación, se crean los distintos hilos de ejecución. La ejecución en la SBC es multinúcleo, lo que no es trivial (Han et al., 2017). Bajo condiciones de un sistema operativo no determinista convencional, aparecen problemas en la ejecución en tiempo real de tareas críticas (Reghenzani et al., 2017). Garantizar una latencia constante y pequeña (en el orden de pocos milisegundos) de forma que el comportamiento sea de tiempo real es una necesidad muy importante de cara a un buen comportamiento del regulador y a garantizar la seguridad del sistema.

El software corre bajo el planificador SCHED_FIFO. Las operaciones están configuradas en modo cíclico, de forma que el tiempo límite de las operaciones coincide con el periodo de ejecución, según criticidad. Cada operación relevante está separada y paralelizada de las demás mediante distintos hilos de ejecución. Las operaciones con un mayor nivel de criticidad tienen un periodo de ejecución menor que las operaciones con menor nivel de criticidad (Deutschbein et al., 2017 y Li et al., 2017).

La parte con mayor nivel de criticidad del software está formada por cinco hilos de ejecución más el hilo de ejecución principal. Por lo tanto, hay seis ejecuciones funcionando de forma paralela, aunque cinco de ellas (todas excepto la del hilo principal) sólo ejecutan su función si el motor está arrancado. En caso contrario su función es esperar el arranque de éste. Estos cinco hilos se sincronizan al finalizar la ejecución todos ellos, dentro de la iteración en la que se encuentran. Estas iteraciones se suceden de forma cíclica con un periodo delimitado en 5ms. A continuación, se detallan las operaciones realizadas en cada uno de los hilos.

- Hilo 1 (Hilo comunicación I2C): Comprueba el estado de las distintas entradas de la placa de E/S digitales a través del protocolo I2C. Su objetivo, por tanto, es conocer el estado de las señales del contacto, el embrague y el arranque en tiempo de ejecución. También comprueba que los distintos protocolos de comunicación sigan operativos.

- Hilo 2 (Hilo comunicación UART con la FPGA): Siempre que el motor esté arrancado, recibe de forma constante, en formato ASCII, el régimen de revoluciones actual del motor a través del protocolo de comunicación UART establecido con la FPGA.

- Hilo 3 (Hilo comunicación UART con el motor): Su funcionamiento es idéntico al del hilo anterior, pero recibiendo el régimen de revoluciones al que se desea llevar al motor, lo que se recibe a través del módulo CAN-BUS.

- Hilo 4 (Hilo para calcular el régimen actual): En caso que el motor esté arrancado, este hilo toma los caracteres ASCII, recibidos de la FPGA, que hacen referencia al régimen de revoluciones actual y llama al método `calcular_regimen_actual()` para obtener el entero resultante.

- Hilo 5 (Hilo para calcular el régimen objetivo): Realiza la misma función que el hilo anterior pero llamando al método

`calcular_regimen_objetivo()`, pues es el dato que se desea obtener.

- Hilo 6 (Hilo para el algoritmo regulador y el envío de la inyección): Este hilo realiza diversas operaciones: primero, aplica el controlador que implementa la ECU con el fin de obtener la inyección necesaria para que el régimen actual alcance el régimen objetivo. Seguidamente, calcula los caracteres ASCII correspondientes al dato obtenido del controlador. Finalmente, realiza el envío de dichos caracteres hasta la FPGA a través del protocolo de comunicación UART.

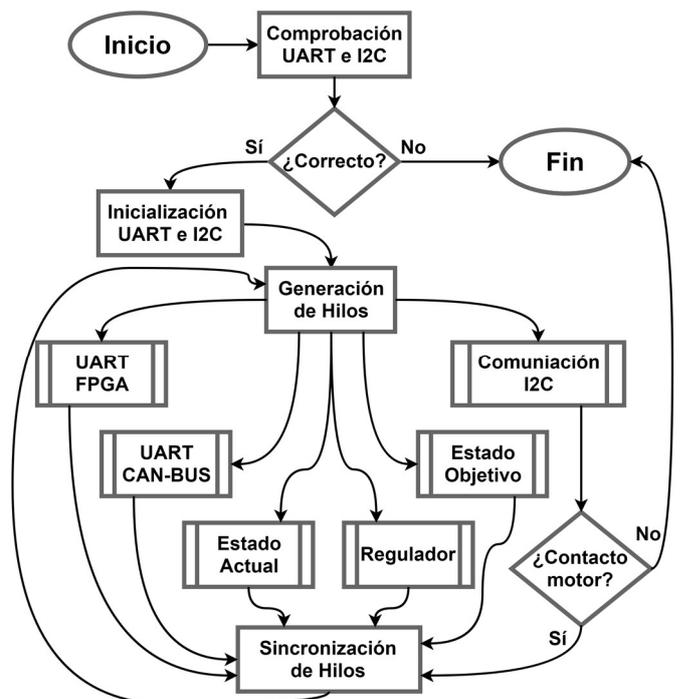


Figura 5: Flujograma del Software de la SBC

3.6. Software de la FPGA

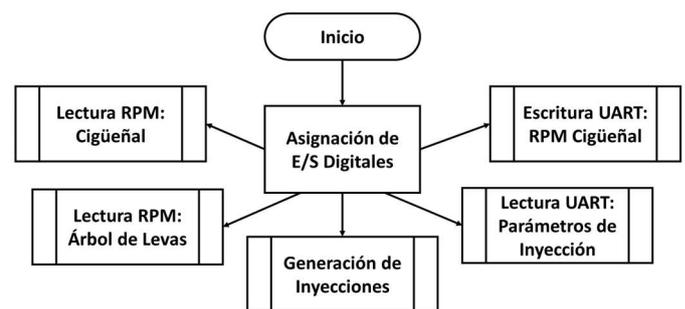


Figura 6: Flujograma del Funcionamiento de la FPGA

La FPGA funciona como esclava de la SBC. Representa al mismo tiempo un sensor y un actuador al interpretar las señales más rápidas tanto en el sentido de lectura como en el de escritura. Así, la FPGA calcula constantemente el valor de las revoluciones del cigüeñal a partir de las señales de giro del motor correspondientes a la sensorización en el cigüeñal y en el árbol de levas, a través de una adaptación de señal en un módulo de tipo digital basado en MOSFETs.

De este modo, tras cargar la configuración de los puertos digitales y el mapa correspondiente al motor en el que se instala la ECU, la FPGA pasa a calcular de forma continua el

régimen de giro del motor sobre las señales de éste, y a su vez sobre estas señales ejecuta la inyección. Los parámetros de la inyección a ejecutar los lee continuamente desde la SBC mediante UART, y por el mismo medio responde con el régimen de giro instantáneo, parámetro que la SBC necesita para poder cerrar el lazo de control en la forma de algoritmo de control. El flujograma de control de la FPGA se muestra en la Figura 6.

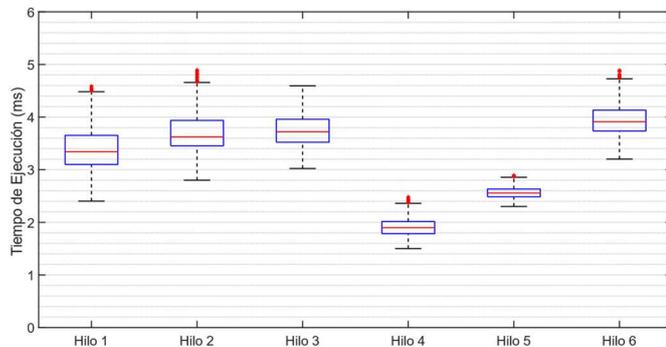


Figura 7: Tiempos de ejecución de cada hilo

4. Análisis de los Resultados

En la Figura 7 se muestran los tiempos de ejecución de cada uno de los hilos de la SBC por separado dentro de una ejecución en paralela de todos ellos, sincronizados en el final de cada iteración, con un periodo de 5ms mediante el planificador SCHED_FIFO.

El cuello de botella, es decir, el tiempo de ejecución del hilo más lento, es inferior a los 5 milisegundos del periodo de ejecución de los hilos críticos. Este valor de periodo es válido para el control de motores dado que éstos, como sistemas mecánicos, tienen unas latencias superiores mostrando tiempos de establecimiento del orden de un segundo en funcionamiento sin carga y superior con carga. En el caso concreto del motor con el que se trabaja, a máximo régimen de giro (2000 rpm) el cigüeñal completa un giro en 30 ms. Puesto que por cada dos vueltas de cigüeñal se dan las seis inyecciones del motor, a cada rotación de este son tres las inyecciones que tienen lugar. Por tanto, el máximo régimen de giro del motor el tiempo entre inyecciones es de 10 ms, lo que quiere decir que el sistema de control diseñado es capaz de modificar el valor a inyectar al menos dos veces antes de que llegue a producirse la nueva inyección incluso con el motor en su máxima velocidad.

La plataforma modular presentada se basa en la intercomunicación entre módulos. A partir del ejemplo mostrado, se va a analizar si los protocolos de comunicación empleados, UART e I2C, son adecuados.

4.1. Protocolo UART

El protocolo de comunicación UART es utilizado por la unidad de control de motor para la comunicación entre la SBC y la FPGA así como con el módulo CAN-BUS conectado a las líneas CAN del motor.

La comunicación está configurada con un Baud Rate de 4000000 baudios, con un tamaño de los mensajes enviados de 16 bits. Con esta configuración la latencia, es decir, el tiempo

que transcurre desde que uno de los dispositivos envía el mensaje hasta que el opuesto lo lee, es muy bajo. El problema es que existe la limitación computacional de que el hilo más lento, el del algoritmo de control, ralentiza el envío consecutivo de información. Por ello, se sacrifica la velocidad de los hilos más rápidos de forma que el poder de cálculo en vez de enviarse a esos hilos se redirija al hilo que representa el cuello de botella. De esa manera se nivela el tiempo dedicado a cada hilo y el flujo de datos es continuo.

Se pueden utilizar los resultados obtenidos anteriormente para las operaciones dos y tres (comunicación serie UART con la FPGA y con el motor, respectivamente) para obtener los valores del tiempo entre envíos UART consecutivos.

Tabla 1: Resultados de mediciones de los puertos UART

| Tiempo entre envíos medio (ms) | Tiempo entre envíos máximo (ms) | Tiempo entre envíos mínimo (ms) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1.85 | 2.60 | 1.01 |

Como se puede observar en la Tabla 1, el envío de los hilos de comunicación UART presentan unos tiempos medios de 1.85 milisegundos en cada operación de envío o recepción de datos. Además, se puede ver que no alcanzará un valor superior a los 2.60 milisegundos. Dado que estos tiempos son inferiores a los tiempos del hilo más lento, se puede concluir que el empleo de esta configuración UART es válido para las necesidades vehiculares analizadas, que como se ha mencionado antes son de 10 ms entre inyecciones a máxima velocidad del motor.

4.2. Protocolo I2C

Con el fin de conocer la latencia de envío y recepción de datos del protocolo de comunicación I2C empleado, se empleó un osciloscopio para medir el desfase entre la señal que se activa al realizar alguna acción el posible conductor del vehículo y la señal que responde la ECU como consecuencia de dicha acción. A lo largo del proceso de toma de datos se ha tomado una muestra de 10^7 valores de latencia.

Como se puede observar en la Tabla 2, la comunicación I2C que se establece entre distintos módulos presenta una latencia media de 685.60 μ s, y el valor más alto de latencia I2C medido es de 876 μ s. Estos valores son suficientemente bajos y robustos para la aplicación vehicular analizada. A nivel de reacción humana, estos tiempos hacen inapreciable el retardo existente entre el momento en que el posible conductor manda una orden y esta es interpretada por la unidad de control de motor.

Tabla 2: Resultados de mediciones de los puertos I2C

| Latencia media (μ s) | Latencia máxima (μ s) | Latencia mínima (μ s) |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 685.60 | 876 | 544 |

4.3. Respuesta de la FPGA y del Sistema en Marcha en el Prototipo Presentado

La FPGA empleada trabaja con un tiempo de reloj de 50 MHz. La frecuencia de referencia para trabajar con las señales del motor se rebaja sin embargo a 3.125 MHz. Esto quiere decir que se trabaja con una resolución de tiempo de 320 ns, y

dado que los mensajes pueden transmitir valores de hasta 16 bits, se puede mantener esta resolución para medir anchos de pulso de un máximo de hasta 210ms. Esto da un rango de medición de entre 4.8 Hz y 1.563 MHz, teniendo en cuenta el teorema de Nyquist sobre muestreo, manteniendo la precisión de 320 ns. Estos parámetros encajan perfectamente en los rangos de funcionamiento de las señales de control del motor, ya que a velocidad del motor de arranque (230 rpm del cigüeñal) la señal de control generada por el cigüeñal es de 138 Hz y la del árbol de levas de 23 Hz, y a la máxima velocidad del motor (2000 rpm del cigüeñal) la señal correspondiente al propio cigüeñal es de 1200 Hz y la correspondiente al árbol de levas de 200 Hz. En la Figura 8 se observa cómo se realiza la inyección desde la FPGA una vez que sus señales han pasado por la etapa de potencia transistorizada en HEXFETs manteniendo el nivel de corriente constante a lo largo de la inyección variando el ancho y la frecuencia de los pulsos de tensión en el bobinado del inyector. Esto permite que la SBC tome el gobierno de la FPGA con una garantía absoluta en su funcionamiento aplicando algoritmos de control para generar respuestas en el motor como se puede observar en la Figura 9.

4.4. Escalado de Módulos de la Plataforma

En lo relativo al escalado con muchos módulos, hay que tener en cuenta las limitaciones de las comunicaciones. El direccionamiento de los módulos I2C es de 7 bits, lo que posibilita que hasta 128 módulos de este tipo sean conectados en el mismo bus I2C. Sin embargo, la principal limitación no se haya tanto en cuántos módulos sea capaz de soportar la plataforma, como en cuántos de estos necesitan operar con unas latencias bajas. Teniendo en cuenta la latencia máxima medida en el canal I2C (876 μ s) y que el periodo de funcionamiento del software es de 5ms, en estas condiciones no se podrían manejar correctamente más de 5 módulos I2C en el máximo nivel de criticidad de forma simultánea en el mismo bus. Dado que cada módulo digital dispone de 16 puertos de E/S digitales y cada módulo analógico 24 puertos de E/S analógicos. En combinación, se tienen puertos suficientes para prácticamente cualquier operación vehicular, dado que por motivos de seguridad sería incorrecto acumular tantas operaciones críticas en una única unidad. Es por ello que las ECUs actuales ya están muy especializadas distribuyendo la carga de trabajo crítica entre ellas, lo que conlleva que el número máximo de módulos necesarios para cumplir con esas especificaciones no sea elevado.

Además, se disponen de cuatro puertos UART en la SBC, que permite la conexión de módulos de telecomunicaciones, comunicaciones inter-unidades (CAN-BUS) o unidades de coprocesamiento como en este caso es el módulo FPGA. En este caso, el módulo FPGA dispone de un puerto I2C adicional bajo el cual podrían llegarse a manejar otros tres módulos I2C bajo condiciones de máxima criticidad cumpliendo con los 5ms de periodo de funcionamiento exigidos en la aplicación. Asimismo, la propia FPGA dispone de 84 puertos de E/S digitales, así como 8 puertos de entrada analógicos adicionales. La SBC también cuenta con interfaces WiFi y Bluetooth que pueden emplearse en comunicaciones inalámbricas dentro del vehículo para aplicaciones de baja criticidad.

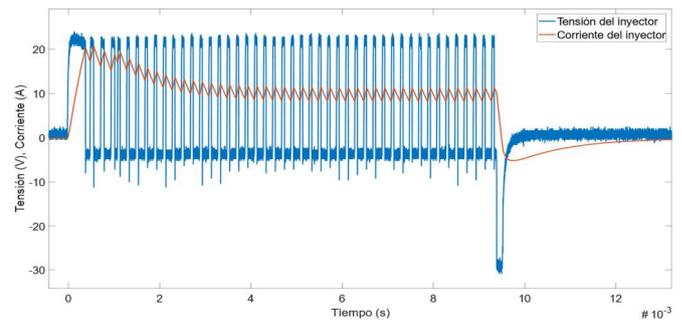


Figura 8: Señales de Inyección

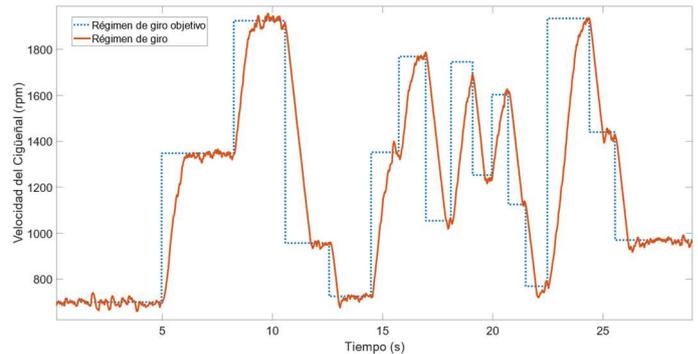


Figura 9: Respuesta del Modelo Real en Ejecución

5. Conclusiones

En este artículo se presenta una plataforma modular reconfigurable para su aplicación en la industria del transporte y de la automoción, prestando especial atención a los nuevos requisitos que impondrá la inclusión de los ITS. Esta plataforma permite desarrollar nuevos conceptos con rapidez; lo que resulta de gran utilidad a la hora de realizar nuevas investigaciones en el área de la ingeniería automotriz. La plataforma se propone como una solución para los investigadores y desarrolladores en el campo de la ingeniería electrónica y de control en el sector del automóvil. Asimismo, y dado que la plataforma de hardware es abierta, es posible diseñar nuevos módulos que cumplan dicho estándar creando un repositorio disponible para cualquier desarrollador en el área. Como prueba del concepto, en el artículo se ha presentado el diseño y desarrollo de la ECU DC MR-PLD de Daimler AC a partir de una plataforma modular.

A continuación, se va a abordar de qué modo se pretende que la propuesta presentada resuelva cada uno de tales problemas. A modo de resumen, la problemática expuesta puede dividirse de la siguiente manera:

- La forma de trabajo del sector condiciona la investigación en la automoción. Con esta propuesta se pretende dar una base de trabajo sobre la que desarrollar investigaciones desde un punto de vista distinto. Del mismo modo que el hardware libre en otras áreas ha revolucionado en gran medida la investigación tecnológica, el objetivo de la solución modular propuesta es ofrecer a los investigadores una alternativa flexible y funcional para llevar su actividad investigadora más allá de los enfoques clásicos del sector.
- Los vehículos se venden sin posibilidades reales de recibir actualizaciones, ni a nivel hardware ni software. Los vehículos desarrollados mediante el sistema modular

propuesto, sin embargo, gozan de una gran retrocompatibilidad. Esto permite que se puedan ir actualizando a nivel hardware y software de modo que con el paso de los años los vehículos dispongan de la capacidad de adaptarse a las nuevas tecnologías según vayan apareciendo.

- Las tecnologías que se implementarán en los vehículos futuros requieren un nivel de penetración lo más amplio posible. Dado que este sistema modular permite actualizar la tecnología del vehículo, es factible la adaptación de los vehículos ya vendidos fabricados mediante esta tecnología de electrónica modular. Esto permite minimizar la dificultad para hacer efectivos los avances tecnológicos en la carretera al evitar el problema de que, en el momento de la implantación inicial de la tecnología en la carretera, todo el grueso de la flota existente sea completamente incompatible con la misma.

Con el uso del diseño modular, se puede reutilizar el diseño de un modelo a otro. En la medida en que se aborden las preocupaciones de reserva de espacio y confiabilidad, la mayoría de los módulos pueden reutilizarse de manera efectiva lo que permite a los fabricantes entregar nuevos productos al mercado a tiempo. La industria del automóvil comprende una vasta red de proveedores y socios que trabajan juntos durante todas las facetas del desarrollo de productos, desde la ingeniería hasta la producción. A medida que cada integrante de la etapa de desarrollo aprovecha la reutilización, el ahorro en tiempo e inversión logrado ayuda a los fabricantes de automóviles a mantener una ventaja competitiva y permite que los proveedores mantengan su terreno como socios proporcionando soluciones rentables al proceso general de producción de vehículos. Esto hace que bajo esta plataforma sea relativamente sencillo generar nuevos prototipos.

En lo relativo a la economía de escala existe una tendencia natural a que la cantidad de producción de cada tipo de módulo sea superior o igual al de los distintos tipos de ECUs. Esto se debe a que las funciones específicas de cada ECU particular se pueden concentrar en módulos específicos, pero todas las funciones generalistas pueden ser llevadas a cabo mediante módulos más generalistas, y por tanto que estos puedan formar parte de múltiples ECUs diferenciadas. Esto permite lograr una mayor reducción de costes de fabricación de esos módulos generalistas que las ECUs fabricadas de forma no modular, gracias a que su producción puede llegar a ser mucho mayor.

En cuanto a la problemática asociada a la plataforma propuesta, se encuentra principalmente la creación de un nuevo sistema de instalación y verificación de las actualizaciones hardware. Esto compromete a los talleres a realizar estas operaciones cumpliendo celosamente las normativas, así como la implantación de sistemas tanto electrónicos como visuales para la verificación del cumplimiento de las normativas en lo referido a la actualización de módulos o unidades.

De cara al futuro, se planea hacer un análisis más exhaustivo en lo relativo a la selección y configuración del planificador. Sin embargo, se considera que, como una primera toma de contacto, los resultados obtenidos ya son relevantes, pues demuestran que la solución propuesta es técnicamente viable de cara a garantizar las exigencias en la ejecución de sistemas electrónicos en el sector del automóvil.

De este estudio se plantean dos vías por las que la plataforma modular propuesta puede encaminarse. Un primer

enfoque sigue la línea planteada de ejemplo en este artículo: se trata de usar el sistema de módulos de forma cableada para emplearse en investigación y prototipado dada la alta flexibilidad que ofrece este método.

El otro camino que se vislumbra es el del empleo de los módulos de la plataforma pasando por una definición de estandarización para la producción industrial. Aquí se encuentra una analogía en un sector que pasó por un cambio similar al que actualmente sufre la electrónica vehicular: al principio, los ordenadores domésticos eran también incompatibles y se seguía un bajo nivel de estandarización. Sin embargo, al pasar los años se acabó imponiendo un sistema de módulos estandarizados. Los mismos motivos de entonces podrían acabar siendo válidos en la electrónica vehicular de las próximas décadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo recibido mediante la resolución del 31/07/2014, publicada por la Universidad de Castilla-La Mancha, que establece las bases reguladoras de la convocatoria para contratos predoctorales con objeto de preparar nuevos investigadores bajo el Plan Propio de I+D+i. [2014/10340]

Referencias

- ACEA, 2017. ACEA Report: Vehicles in use Europe 2017. Avenue des Nerviens 85, Brussels.
- Arem, B., Driel, C.J.G., Visser, R., 2006. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems* 7(4), pp. 429-436. DOI: 10.1109/TITS.2006.884615
- Astarita, V., Guido, G., Mongelli, D., Giofre, V.P., 2015. A co-operative methodology to estimate car fuel consumption by using smartphone sensors. *Transport* 30(3), pp. 307-311. DOI: 10.3846/16484142.2015.1081280
- Barrachina, J., Garrido, P., Fogue, M., Martinez, F.J., Cano, J.C., Calafate, C.T., Manzoni, P., 2013. Road side unit deployment: a density-based approach, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 5(3), pp. 30-39. DOI: 10.1109/MITS.2013.2253159
- Bate, I., Burns, A., Davis, R.I., 2017. An enhanced bailout protocol for mixed criticality embedded software. *IEEE Transactions on Software Engineering* 43(4), pp. 298-320. DOI: 10.1109/TSE.2016.2592907
- Baur, M., Fullerton, M., Busch, F., 2010. Realizing an effective and flexible ITS evaluation strategy through modular and multi-scaled traffic simulation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 2(3), pp. 34-42. DOI: 10.1109/MITS.2010.939206
- Bifulco, G.N., Galante, F., Pariota L., Spena M.R., 2015. A linear model for the estimation of fuel consumption and the impact evaluation of advanced driving assistance systems. *Sustainability* 7(10), pp. 14326-14343. DOI:10.3390/su71014326
- Burns, A., Davis, R., Baruah, S.K., Bate, I., 2018. Robust Mixed-Criticality Systems. *IEEE Transactions on Computers* 67(10), pp. 1478 - 1491. DOI: 10.1109/TC.2018.2831227
- Burns, A., Davis, R.I., 2017. A survey of research into mixed criticality systems. *ACM Computing Surveys* 50(6), 82. DOI: 10.1145/3131347
- Burns, A., Baruah, S., 2017. Migrating Mixed Criticality Tasks Within a Cyclic Executive Framework. In: Bliederger J., Bader M. (eds) *Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10300. Springer, Cham, pp. 203-016. DOI: 10.1007/978-3-319-60588-3_13

- Cañas V.J., García A., Blanco J., de las Morenas J., 2016, the internet of things applied to the automotive sector: a unified intelligent transport system approach. In: Borangiu T, Thomas A, Trentesaux D, McFarlane D., editors. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing - Part II: Recent Advances in Control for Physical Internet and Interconnected Logistics. Springer International Publishing, pp. 53-60.
DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_5
- Chen, B., Cheng, H.H., 2010. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems* 11(2), pp. 485-497.
DOI: 10.1109/TITS.2010.2048313
- Chong, A., 2010. *Driving Asia : as automotive electronic transforms a region*. Infineon Technologies Asia Pacific Pte Ltd, Singapore.
- Christie, D., Koymans, A., Chanard, T., Lasgouttes, J.M., Kaufmann, V., 2016. Pioneering driverless electric vehicles in Europe: The City Automated Transport System (CATS). *Transportation Research Procedia* 13, pp. 30-39.
DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.004
- Dai X., Burns, A., 2017. Predicting Worst-Case Execution Time Trends in Long-Lived Real-Time Systems. In: Bliederger J., Bader M. (eds) *Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2017*. Ada-Europe 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10300. Springer, Cham, pp. 87-101.
DOI: 10.1007/978-3-319-60588-3_6
- De Grande, R.E., Boukerche, A., Guan, S., Aljeri, N., 2016. A modular distributed simulation-based architecture for intelligent transportation systems. *Concurrency and Computation-Practice & Experience* 28(12), pp. 3409-3426.
DOI: 10.1002/cpe.3801
- Dellios, K., Papanikas, D., Polemi, D., 2015. Information security compliance over Intelligent Transport Systems: Is IT possible?. *IEEE Security & Privacy* 13(3), pp. 9-15.
DOI: 10.1109/MSP.2015.59
- Deutschbein, C., Fleming, T., Burns, A., Baruah, S., 2017. Multi-core Cyclic Executives for Safety-Critical Systems. In: Larsen K., Sokolsky O., Wang J. (eds) *Dependable Software Engineering. Theories, Tools, and Applications. SETTA 2017*. Lecture Notes in Computer Science, vol 10606. Springer, Cham, pp. 94-109.
DOI: 10.1007/978-3-319-69483-2_6
- Doecke, S., Grant, A., Anderson R.W.G., 2015. The real-world safety potential of connected vehicle technology. *Traffic Injury Prevention* 16(1), pp. 31-35.
DOI: 10.1080/15389588.2015.1014551
- Festag, A., 2014. Cooperative intelligent transport systems standards in Europe. *IEEE Communications Magazine* 52(12), pp. 166-172.
DOI: 10.1109/MCOM.2014.6979970
- Fleming, T., Huang, H.-M., Burns, A., Gill, C., Baruah, S., Lu, C., 2017. Corrections to and discussion of "implementation and evaluation of mixed-criticality scheduling approaches for sporadic tasks". *ACM Transactions on Embedded Computing Systems* 16(3), 77.
DOI: 10.1145/2974020
- Flores, C., Milanés, V., Nashashibi, F., 2016. Using fractional calculus for cooperative car-following control. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 907-912.
DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795663
- Garrido, F., Gonzalez, D., Milanés, V., Perez, J., Nashashibi, F., 2016. Real-time planning for adjacent consecutive intersections. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1108-1113.
DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795695
- Godoy, J., Milanés, V., Perez, J., Villagra, J., Onieva, E., 2013. An auxiliary V2I network for road transport and dynamic environments. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies* 37, 145-156.
DOI: 10.1016/j.trc.2013.09.012
- Hafner, M.R., Cunningham, D., Caminiti, L., Del Vecchio, D., 2013. Cooperative collision avoidance at intersections: algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14(3), pp. 1162-1175.
DOI: 10.1109/TITS.2013.2252901
- Han, J.J., Tao, X., Zhu, D.K., Yang, L.T., 2017. Resource sharing in multicore mixed-criticality systems: utilization bound and blocking overhead. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 28(6), pp. 3626-3641.
DOI: 10.1109/TPDS.2017.2677442
- Kato, S., Tsugawa, S., Tokuda, K., Matsui, T., Fujii, H., 2002. Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 3(3), pp. 155-161.
DOI: 10.1109/TITS.2002.802929
- Kim, J., Moon, Y.J., Suh, I.S., 2015. Smart mobility strategy in Korea on sustainability, safety and efficiency toward 2025. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7(3), pp. 58-67.
DOI: 10.1109/MITS.2015.2474995
- Kliem, D., Voigt, S.O., 2014. scalability evaluation of an FPGA-based multi-core architecture with hardware-enforced domain partitioning. *Microprocessors and Microsystems* 38(8), pp. 845-859.
DOI: 10.1016/j.micpro.2014.02.006
- Kotb, A.O., Shen Y.C., Zhu, X., Huang, Y., 2016. iParker—a new smart car-parking system based on dynamic resource allocation and pricing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17(9), pp. 2637-2647.
DOI: 10.1109/TITS.2016.2531636
- Larue, G.S., Kim, I., Rakotonirainy, A., Haworth, N.L., Ferreira, L., 2015. Driver's behavioural changes with new intelligent transport system interventions at railway level crossings—A driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 81, pp. 74-85.
DOI: 10.1016/j.aap.2015.04.026
- Larue, G.S., Rakotonirainy, A., Haworth, N.L., Darvell, M., 2015. Assessing driver acceptance of Intelligent Transport Systems in the context of railway level crossings. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour* 30, pp. 1-13.
DOI: 10.1016/j.aap.2015.04.026
- Li, J., Ferry, D., Ahuja, S., Agrawal, K., Gill, C., Lu, C.Y., 2017. Mixed-criticality federated scheduling for parallel real-time tasks. *Real-time systems* 53(5), pp.760-811.
DOI: 10.1007/s11241-017-9281-8
- Lu, L., Feng, D.Q., Chu, J., 2013. Improving the real-time performance of Ethernet for plant automation (EPA) based industrial networks. *Journal of Zhejiang University-Science C-Computers & Electronics* 14(6), pp. 433-448.
DOI: 10.1631/jzus.C1200363
- Ott, J., Kutscher, D., 2006. A modular access gateway for managing intermittent connectivity in vehicular communications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 17(2), pp. 159-174.
DOI: 10.1002/ett.1098
- Poslad, S., Ma A., Wang Z., Mei, H., 2015. Using a Smart City IoT to incentivise and target shifts in mobility behaviour—is it a piece of pie?. *Sensors* 15(6), pp., 13069-13096.
DOI:10.3390/s150613069
- Reghenzani, F., Massari, G., Fornaciari, W., 2017. Mixed time-criticality process interferences characterization on a multicore Linux system. 2017 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), pp. 427-434.
DOI: 10.1109/DSD.2017.18
- Regulation (EU) No 165/2014 of the European Parliament and of the Council of 4 February 2014 on tachographs in road transport, repealing Council Regulation (EEC) No 3821/85 on recording equipment in road transport and amending Regulation (EC) No 561/2006 of the European Parliament and of the Council on the harmonisation of certain social legislation relating to road transport Text with EEA relevance. *OJ L 60*, 28.2.2014, p. 1–33 (BG, ES, CS, DA, DE, ET, EL, EN, FR, GA, HR, IT, LV, LT, HU, MT, NL, PL, PT, RO, SK, SL, FI, SV)
- Ross, E., 2016. Tesla feature lets cars come when called. *IEEE Spectrum*.
- Stübing, H., 2013. *Multilayered security and privacy protection in Car-to-X networks*. Springer Vieweg, Darmstadt, Germany.
DOI: 10.1007/978-3-658-02531-1
- Vahidi, A., Eskandarian, A., 2003. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 4(3), pp. 143-153.
DOI: 10.1109/TITS.2003.821292
- Wallmark, O., Nybacka, M., Malmquist, D., Burman, M., Wennhage, P., Georen, P., 2014. Design and implementation of an experimental research and concept demonstration vehicle. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)
DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007042
- Wang, Y., Liang, S., Yao, S., Shan, Y., Han, S., Peng, J., Luo, H., 2017. Reconfigurable processor for deep learning in autonomous vehicles. *ITU Journal: ICT Discoveries* 1.
- Woo, S., Jo, H.J., Lee, D.H., 2015. A practical wireless attack on the connected car and security protocol for in-vehicle CAN. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16(2), pp. 993-1006.
DOI: 10.1109/TITS.2014.2351612