

Impacto del vehículo autónomo y conectado en la explotación de los túneles de carretera



Impact of autonomous and connected vehicles on the operation of road tunnels

Grupo de Trabajo de Vehículos Conectados y Autónomos

Comité Técnico C5 "Túneles" de la ATC

Los túneles son los tramos de la red de carreteras con mayor densidad de equipamiento ITS ya que necesitan supervisar el comportamiento del tráfico en su área de influencia y activar las medidas de resolución o mitigación necesarias cuando ocurre una incidencia.

Partiendo de esta premisa, el presente artículo analiza el impacto que tendrá en la explotación de estas infraestructuras la circulación de los Vehículos Autónomos y/o Conectados (VAC), considerando aspectos como la evolución tecnológica en los campos de la automoción hacia la conducción autónoma; las telecomunicaciones, que facilitarán la conectividad, y por tanto la cooperación entre vehículos y entre éstos y las infraestructuras; la normativa para regular la circulación de esta nueva generación de vehículos; y especialmente las necesidades de despliegue o adecuación de los sistemas ITS y de seguridad del túnel para facilitar el intercambio de información entre ellos y los vehículos, que requerirán inversiones y proyectos de colaboración público privada que conduzcan a escenarios de circulación segura en el medio y largo plazo.

The Tunnels are the sections of the road network with the highest density of ITS equipment, as traffic behavior need to be monitored in their area of influence to develop and apply any mitigation or compensation measures that might be required whether any incident occurs.

Given the above, this paper analyzes the potential impact that travel of Autonomous and/or Connected Vehicles (VAC) through tunnels, could have on the operation of these infrastructures. This paper covers different aspects, including among others, the following: technological evolution, within the automotive market, towards autonomous driving; telecommunications, which will facilitate connectivity, and therefore cooperation between vehicles and between vehicles and infrastructures; required regulations to modulate the circulation of this new generation vehicles; and specially, the need to develop or reengineer the ITS and tunnel safety systems to facilitate the exchange of information between these and vehicles, which would require investments and public-private collaboration projects to ensure safest conditions in the medium and long term.

Prólogo

(Por Rafael López Guarga, presidente del Comité Técnico de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras)

En el marco actual, en el que el transporte y la movilidad van evolucionando hacia la transformación tecnológica que la demanda futura parece va a exigir, los vehículos automatizados, capaces de circular de forma autónoma, son ya una realidad. Tanto es así que los sistemas de ayuda a la conducción están ya completamente generalizados en las cadenas de fabricación. Ello va a implicar necesariamente desplegar una red de carreteras inteligente y digitalizada que cambiará la movilidad global.

Si este fenómeno afecta a las carreteras en general, mucho más lo hará a unas infraestructuras tan específicas como son los túneles que ya de por sí cuentan con un elevado grado de tecnificación por lo que deberán evolucionar hasta llegar a ser túneles “inteligentes”.

Se plantea un gran desafío que debe afrontarse y analizar qué servicios se deben desarrollar y con qué tecnología, asegurando la interoperabilidad. Ello implicará importantes cambios en la organización del explotador del túnel y de la propia carretera, debiendo garantizar en todo momento la seguridad y la protección de los datos.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo proporcionan grandes oportunidades para el explotador, no solo desde el punto de vista de la seguridad vial, obras en el túnel y en la carretera, información sobre el estado del tráfico y gestión de los recursos y de los proyectos, sino también en términos de coste beneficio. Además todo ello beneficiará a los usuarios que podrán aprovechar toda la información y datos disponibles.

Deberán desarrollarse proyectos piloto para a partir de allí, con la experiencia adquirida, redactar especificaciones técnicas que sirvan de base para proyectos futuros de mayor alcance.

1. Los Vehículos autónomos y conectados

La industria de la automoción lleva años trabajando en el desarrollo de sistemas de conducción autónoma, y en la actualidad existen en el mercado vehículos que los incorporan. En este artículo nos centraremos exclusivamente en los vehículos que circulan por las redes viarias, excluyendo a los que operan en entornos controlados, como las minas, que son completamente autónomos o teledirigidos.

Hay que tener en cuenta que existen diferentes actores con papeles específicos en el desarrollo y regulación de los sistemas de conducción autónoma: los fabricantes de vehículos, las Administraciones responsables tanto de las infraestructuras como de la seguridad vial, los encargados de la explotación de esas infraestructuras y por supuesto los usuarios de los vehículos.

Los “Vehículos Autónomos Conectados” (VAC), son vehículos equipados con tecnología avanzada que les permite circular con diferentes grados de autonomía, en función de su nivel de sensorización, y estar conectados a través de redes de comunicación con otros vehículos e infraestructuras para intercambiar información. Generalmente, estos sensores, que trabajan conjuntamente, son los que se reseñan a continuación:

- Cámaras de visión artificial: capturan imágenes del entorno del vehículo, detectando objetos, reconociendo señales de tráfico, le-

yendo marcas viales y analizando el comportamiento de otros vehículos y peatones.

- El LIDAR (Light Detection and Ranging): utiliza tecnología láser para medir distancias y generar mapas tridimensionales del entorno.
- Radar: mide la distancia, velocidad y dirección de los objetos en el entorno, es especialmente útil para detectar objetos en condiciones de baja visibilidad, como la lluvia o la niebla.
- Ultrasonido de alta frecuencia: para detectar objetos cercanos al vehículo, como el utilizado en el estacionamiento.
- GPS: sistema de posicionamiento global (GPS).

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) (1) ha definido seis niveles de autonomía de conducción de los vehículos (Tabla 1), según su capacidad de realizar de forma parcial o total la tarea de conducción dinámica (DDT). En esta clasificación no se han considerado los sistemas de seguridad activa, como el control electrónico de estabilidad (ESC) o el sistema de frenado de emergencia (AEB), que realizan intervenciones específicas y puntuales y no de manera continua. (Tabla 1)

El Dominio de Diseño Operacional (ODD, acrónimo en inglés de Operational Design Domain), concepto necesario conocer en este campo, se refiere a las condiciones y límites en los que un sistema de conducción autónoma está diseñado para operar de manera segura y eficiente. Es decir, es el entorno en el que un vehículo autónomo puede funcionar de manera confiable. Este concepto está desarrollado en el número 192 de la revista Rutas “Gestión de los Dominios de Diseño Operativo para los Vehículos Automatizados” (2).

Tabla 1. Niveles de conducción autónoma		
Nivel	Tipo de conducción	Nivel de autonomía
0	Sin capacidad de conducción autónoma	La conducción la realiza únicamente el conductor, aunque disponga del soporte de los sistemas de seguridad activa.
1	Conducción asistida	El vehículo incorpora sistemas de ayuda a la conducción que pueden actuar longitudinal o lateralmente, pero no de forma simultánea, debiendo el conductor mantener el control de la conducción.
2	Conducción autónoma parcial	En este nivel el vehículo incorpora sistemas que controlan el movimiento del vehículo longitudinal y lateralmente, aunque sigue requiriendo el control por parte del conductor.
3	Conducción autónoma condicionada	Aunque se sigue requiriendo la presencia del conductor, el vehículo incorpora sistemas que permiten automatizar más tareas además del control longitudinal y lateral como, el control de la dirección o la respuesta ante la detección de objetos.
4	Conducción autónoma alta	El vehículo es capaz de circular sin ningún tipo de intervención humana, incorporando todos los sistemas necesarios para la navegación y la seguridad de la conducción y los procedimientos para pasar el control al conductor cuando esto sea necesario.
5	Conducción autónoma completa	En este nivel los vehículos pueden circular de forma completamente autónoma, incluso prescindiendo de los elementos de control tradicionales como los pedales o el volante.

En los niveles de conducción de 1 a 4, se condiciona las situaciones en las que un vehículo que utiliza las funciones de conducción autónoma o asistida realiza la transferencia del control al conductor cuando sale de un tramo con un determinado ODD. Esta situación se mide con un parámetro conocido como “disengagement” que se utiliza para monitorizar y detectar las causas y situaciones por las que el vehículo no puede seguir en un determinado nivel de conducción autónoma, información valiosa para los fabricantes de los sistemas de conducción autónoma. Si esta información se gestionase de forma global, abierta y anónima, podría relacionarse con situaciones de tráfico, estado de las infraestructuras, condiciones medioambientales, entre otros, y reutilizarse para dar información a otros vehículos o a los responsables de la explotación y conservación de la red de carreteras. Actualmente, existe un debate sobre la factibilidad de hacer públicos estos datos.

La irrupción de los VAC está transformando, cada vez con mayor rapidez, el panorama de la movili-

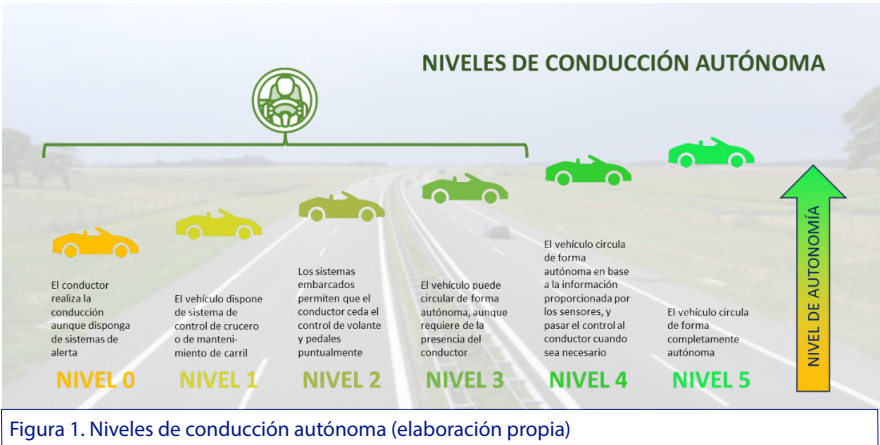


Figura 1. Niveles de conducción autónoma (elaboración propia)

dad a escala global y la tecnología avanza. Este avance tecnológico no sólo impacta en la forma en la que los conductores utilizan la carretera, sino que también lo hacen significativamente en la gestión de las infraestructuras viarias y de los túneles como parte de ellas.

Con relación a los túneles, los VAC pueden aportar importantes beneficios en términos de seguridad, eficiencia y gestión del tráfico.

En este artículo se trata de examinar, desde el punto de vista del Comité Nacional de túneles de la ATC, el impacto que los VAC pueden tener en la gestión de los túne-

les y los beneficios mutuos que pueden aportar a ambos, derivados del intercambio de información entre ellos, basándose, entre otras cuestiones, en identificar los cambios tecnológicos que sería necesario introducir en los sistemas de seguridad y control de los túneles para maximizar las sinergias con el objetivo de lograr una gestión del tráfico más eficiente y segura que la actual.

Los VAC pueden convertirse en un elemento más de los sistemas de seguridad del túnel ya que pueden proporcionar información en tiempo real sobre el estado de la infraestructura y el tráfico, a la vez que recibir

servicios telemáticos del túnel para mejorar su paso por él.

Además, se debe destacar la necesidad de establecer un marco regulatorio claro y coherente para garantizar la seguridad y la interoperabilidad de los VAC con los sistemas de túneles, que obligará a definir estándares y protocolos de comunicación, a la validación de los sistemas de los VAC y a la integración de éstos en los planes de gestión de emergencias.

En resumen, la llegada de los VAC está transformando la movilidad y su impacto en la gestión de túneles será significativo. Los VAC pueden aportar beneficios en términos de seguridad, eficiencia y comodidad en la circulación a través de los túneles, pero obligará a una evolución de los sistemas de control y seguridad de éstos, así como a una adaptación de los marcos regulatorios existentes.

2. El contexto de los sistemas cooperativos

Cuando se abordan los sistemas cooperativos entre los vehículos e

infraestructuras, así como entre los propios vehículos, aparece una gran cantidad de escenarios en los que sus características van a condicionar esta interacción.

En la actualidad, existen tecnologías maduras para soportar ciertos niveles de interacción, pero no existen escenarios consolidados que permitan una conducción autónoma.

En los últimos años, distintos organismos y entidades públicas, entre ellas la Unión Europea, han financiado proyectos de investigación y desarrollo tecnológico para definir las bases y los estándares que en el futuro deberían dar soporte a dicha conectividad.

Carreteras conectadas

Se está trabajando para clasificar las infraestructuras viarias en función de sus capacidades para soportar, en mayor o menor grado, la conducción autónoma. Si bien el escenario en el que todos los vehículos circulen de forma autónoma supondrá la necesidad de la digitalización de la red viaria y un cambio en su gestión, lo cierto es que dicho escenario tardará en alcan-

zarse y hasta entonces se dará una situación híbrida en la que deberán coexistir los vehículos de conducción manual y autónoma. En el Proyecto INFRAMIX (3), financiado por la Unión Europea, se realizó una propuesta de clasificación de las carreteras para soportar la conducción autónoma que se reconoce con las siglas ISAD (Infrastructure Support for Automated Driving), en la que se establecen cinco niveles en función del nivel de digitalización de las vías o sus tramos, que se muestran en la Tabla 2.

Muchos túneles ya disponen de sistemas que gestionan la información del tráfico, la infraestructura y los parámetros ambientales. El siguiente paso deberá ser el de llevarlos a los niveles más altos de la clasificación ISAD para facilitar la circulación de los Vehículos de Conducción Autónoma (VAC), enviándoles información sobre el estado de la infraestructura, de la presencia del personal de mantenimiento o de las limitaciones de velocidad, para que los vehículos puedan adaptar su conducción de forma autónoma y segura. Todo ello supondrá una mejora significativa en la seguridad vial y en la gestión del tráfico en los túneles.

Tabla 1. Niveles de conducción autónoma	
Tipo	Tipo de digitalización
ISAD E	Son las carreteras convencionales, sin datos digitales que puedan ofrecer soporte a la circulación de los vehículos autónomos y en las que éstos deben circular en base a la información que puedan captar sobre las condiciones de la vía y su señalización.
ISAD D	Son aquellas vías o tramos de los que se dispone un mapa en formato digital, con información de la sección de la vía y de la señalización horizontal y vertical fija, que puede ser descargado al vehículo con antelación a su tránsito por la vía. En este escenario, el vehículo seguirá necesitando detectar, por sus propios medios, situaciones dinámicas como el estado de los semáforos, la señalización variable, el estado del tráfico o las condiciones meteorológicas.
ISAD C	En este nivel, la vía o el tramo son capaces de ofrecer información digital dinámica, por ejemplo, la información de incidentes, condiciones meteorológicas, etc, para ser recibida por los vehículos, utilizando el estándar DATEX II (4).
ISAD B	En este nivel, la vía está suficientemente equipada para detectar y evaluar las condiciones del tráfico in situ, a nivel local, y transmitirlos a los vehículos. En este tipo de vías deben existir sistemas ITS suficientemente avanzados para permitir que la misma infraestructura pueda reaccionar y adaptarse a las condiciones del tráfico y a su vez transmitirlos a los vehículos a través de infraestructuras de comunicación infraestructura-vehículo (I2V), mediante protocolos estándar.
ISAD A	Es el nivel más avanzado de digitalización, en el que la infraestructura viaria es capaz de organizar y guiar el flujo de los vehículos. Para ello debe disponer de un catálogo de servicios avanzados y las infraestructuras de comunicación deben ser capaces de soportar el intercambio de información necesario.



Figura 2. Niveles ISAD de digitalización de las carreteras (elaboración propia)

Conectividad cooperativa

Las comunicaciones cooperativas son fundamentales para la conducción autónoma ya que permiten transmitir la información entre vehículos y entre éstos y la infraestructura. En el caso de la comunicación vehículo-vehículo, los vehículos pueden compartir información en tiempo real sobre su posición, velocidad, dirección y otros parámetros relevantes, lo que permite una conducción más coordinada y una mayor anticipación ante eventuales situaciones de peligro. Además, la comunicación vehículo-infraestructura puede proporcionar información sobre el estado de la vía, el tráfico, las condiciones meteorológicas y otros aspectos relevantes para la conducción autónoma. En este supuesto la conectividad y el intercambio de información son fundamentales para el desarrollo de sistemas de conducción autónoma más seguros y eficientes. Su implantación a gran escala dependerá de las instalaciones de las infraestructuras y de los sistemas de comunicaciones adecuados.

El desarrollo de las tecnologías de comunicación cooperativas ha progresado en dos direcciones distintas. Una utiliza tecnologías de

corto alcance, denominadas ITS-G5 o DSRC, mientras que otra, denominada C-V2X, utiliza la red celular de los operadores móviles para transmitir información entre los vehículos y la infraestructura.

C-V2X ofrece varias ventajas en comparación con DSRC/ITS-G5, una mayor flexibilidad en la gestión del espectro radioeléctrico y la capacidad de soportar una amplia gama de aplicaciones, incluyendo comunicaciones de seguridad, navegación y servicios de información en tiempo real, lo que facilita la conducción autónoma.

Aunque C-V2X se encuentra en una etapa de desarrollo relativamente temprana, su uso está creciendo rápidamente en todo el mundo, y algunos países, como China y Corea del Sur, han adoptado esta tecnología para las comunicaciones desde el vehículo a todo (V2X). Sin embargo, la tecnología DSRC/ITS-G5 puede seguirse aplicando en entornos confinados o sin cobertura de los operadores móviles, con lo que es probable que ambas tecnologías tengan que coexistir, por ahora, para dar soporte a la conducción autónoma.

La tecnología C-V2X realiza la comunicación vehículo a vehículo (V2V), vehículo infraestructura (V2I) y vehículo persona (V2P), utilizando comunicaciones directas (PC5) o mediante las bandas con licencia de los operadores de telefonía móvil (Uu).

En la Figura 3 se grafían los distintos canales de comunicación que se pueden establecer para cada tipo de servicio. Este abanico de posibilidades de conexión entre los diferentes actores responde a la heterogeneidad actual del tipo de tecnología cooperativa que desarrolla cada fabricante de automoción y de las tecnologías ITS que pueda desplegar cada Administración.

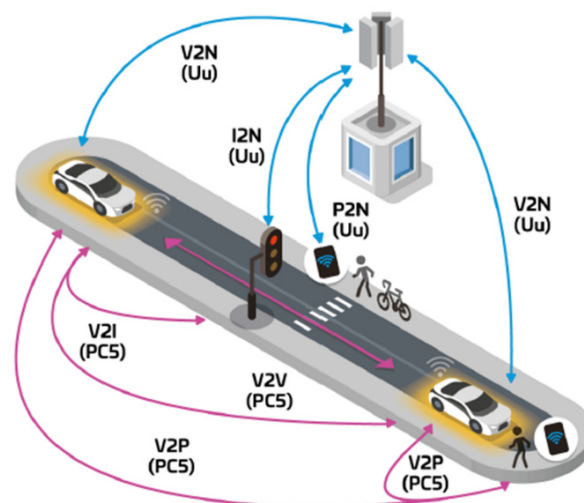


Figura 3. Canales de comunicación C-V2X (Fuente 5GAA)

Los fabricantes de vehículos se enfrentan a la disyuntiva de elegir entre una u otra tecnología. Por ejemplo, Volkswagen optó desde el principio por ITS-G5. Toyota y General Motors lanzarán coches con DSRC, aunque actualmente no tienen una posición clara. Otros fabricantes, como BMW, Daimler, Ford y Stellantis (FCA y Grupo PSA), se inclinan por C-V2X.

Además, las infraestructuras de gestión de tráfico deben adaptar su equipamiento y plataformas para facilitar la conectividad con los vehículos en los túneles, en los entornos interurbanos y en los urbanos. En los últimos años, diversos proyectos europeos financiados por los programas de la Unión Europea FP7 y H2020 han permitido el pre-despliegue de plataformas y estaciones C-ITS en varias ciudades y tramos de carreteras y autopistas. Los proyectos Drive C2X (5), Compass4D (6), C-Mobile (7) y los proyectos piloto promovidos por la plataforma C-ROADS (8) han hecho posible este despliegue, así como la prueba y evaluación de los beneficios de los servicios que se describen en el siguiente apartado.

En España, la participación en algunos de estos proyectos ha implicado ensayos piloto en diversos tramos de la red interurbana y a nivel urbano, en ciudades como Barcelona, Segovia, Talavera de la Reina, Bilbao o Vigo. Esta última ha sido la primera en incorporar de manera permanente a su infraestructura de gestión de tráfico una plataforma de servicios cooperativos que funciona de manera híbrida con tecnología celular 4G e ITS-G5, que incorpora una parte importante de los servicios Day 1 y Day 1.5 que se definen en el siguiente apartado.

Servicios C-ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativo)

Una vez establecidos los marcos en los que se clasifica el nivel de autonomía de los vehículos y la capacidad de las infraestructuras para soportar su circulación, es evidente que el nivel de digitalización de las infraestructuras viales es un factor clave para catalizar el proceso.

En este sentido, la Unión Europea ha impulsado la creación de la Plataforma C-ITS, en la que los diferentes actores relevantes han desarrollado modelos tecnológicos, operativos, económicos, legales, de seguridad etc, para dar soporte a un despliegue armonizado de los servicios C-ITS en Europa. Una de sus contribuciones es una nomenclatura unificada de éstos, según su nivel de madurez. Los servicios llamados Day 1, son aquellos que utilizan información proveniente de los sensores que incorpora el vehículo; los Day 2 ya introducen una componente de cooperación al ampliar el espectro de la percepción a información proveniente de otros vehículos o de la infraestructura, más allá de los propios sensores del vehículo y con capacidad también de

transmitir información de éstos hacia aquellos; y los servicios de Day 3 serán los que permitan la conducción completamente autónoma al aportar capacidades de negociación y cooperación. Actualmente se encuentran desarrollados los servicios Day 1 y Day 1.5 que se muestran en la Figura 4.

En 2016 se creó la C-ROADS Platform, una iniciativa de los diferentes estados miembros de la Comunidad Europea y concesionarios de infraestructuras para la prueba y el despliegue de servicios C-ITS, armonizando y normalizando su funcionamiento para que sean interoperables, llevando a cabo dos actividades básicas: 1) Coordinar foros de debate y trabajo en grupos estructurados para discusión técnica en seguridad, armonización, comunicación y comunicación híbrida; 2) Evaluación de servicios con proyectos piloto en 16 países, entre ellos el proyecto C-ROADS Spain.

Marco regulatorio

A nivel de la Unión Europea se ha definido un reglamento relativo a los requisitos técnicos de homologación de los sistemas de conducción auto-

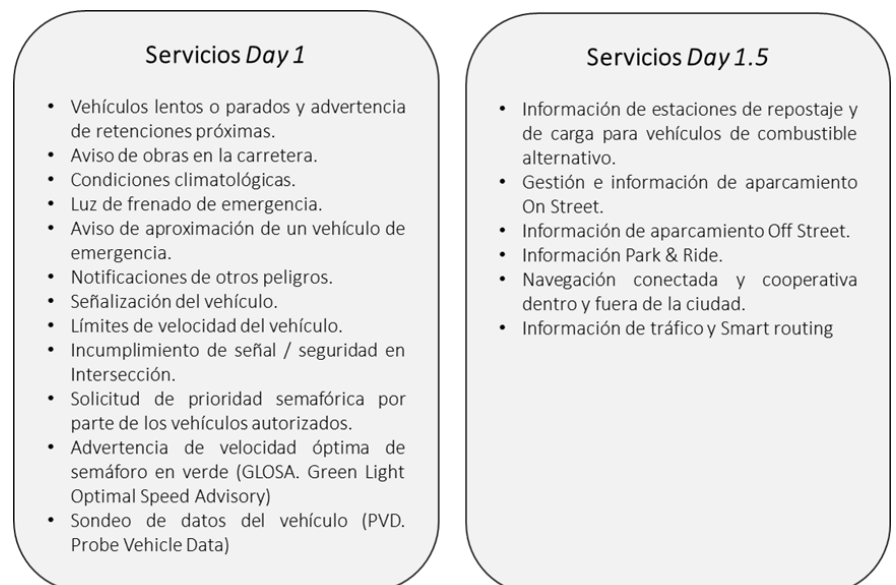


Figura 4. Servicios C-ITS Day 1 y 1.5 (elaboración propia)

matizada (ADS) (9), teniendo cada país Miembro la potestad para adecuar su legislación para establecer el marco y las condiciones con las que puedan circular los VAC. En concreto, en España, la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, ha sido modificada para establecer el marco competencial y el desarrollo normativo, incluyendo el concepto de ADS, el sistema para su registro, que está ligado al permiso de circulación, y la habilitación al Gobierno para regular los procedimientos para certificar que un vehículo con estos sistemas cumple con las normas de circulación.

3. Túneles cooperativos

Los túneles, son tramos de la red de carreteras especialmente sensibles que en la mayoría de los casos requieren equipamientos y sistemas de seguridad y control avanzados, de acuerdo con la normativa vigente, la Directiva 2004/54/CE, y en España el Real Decreto 635/2006 mencionado anteriormente. Estos equipamientos y sistemas ITS han de evolucionar para adaptarse a las necesidades de los túneles cooperativos, al objeto de que la infraestructura no solo ofrezca información

a los vehículos sino que también pueda recibirla de ellos para lograr una gestión más eficiente y segura del tráfico.

Información túnel – vehículo

Con el objeto de que los Centros de Control de los túneles de carretera puedan interactuar con los VAC será necesario identificar qué datos de los que gestionan son relevantes y útiles para los vehículos y en qué forma deben estructurarse para que éstos los puedan recibir y aprovechar, teniendo presente la necesidad de mantenerse en el marco operativo y regulatorio en el que deben moverse todos los actores implicados en el proceso de la conducción autónoma (fabricantes de vehículos, responsables de las infraestructuras, autoridades, proveedores de servicios).

Este proceso de identificación y normalización de datos es clave para garantizar una integración adecuada de los sistemas de gestión de túneles con los VAC y para maximizar los beneficios que pueden ofrecer en términos de seguridad, eficiencia y comodidad para los usuarios. La información para facilitar por los túneles deberá ser

la que los vehículos tengan capacidad de procesar. Hoy en día, esa información será la que pueda ser transmitida en el contexto de los servicios C-ITS, Day 1 y Day 1.5 que ya están aceptados. Obviamente, cuando se vayan definiendo nuevos servicios, los túneles los podrán ir incorporando a sus “librerías”.

En los túneles con cierto nivel de equipamiento ITS se dispone de un alto grado de sensorización, y si la infraestructura se encuentra monitorizada, los sistemas de gestión estarían en disposición de ofrecer:

- Información sobre la infraestructura, en forma de mapas digitales de alta definición con la descripción de la topología del túnel y de toda la información relativa al número de carriles, ubicación de salidas de emergencia, apartaderos, equipamientos de señalización y de seguridad, etc, que se podrá descargar por los vehículos que se aproximen al túnel y que será de utilidad en su trayectoria a lo largo de él. Esta información se proporcionará siguiendo la normativa MAPEM.
- Información dinámica, relacionada con el estado del tráfico en el túnel y en sus accesos, las condiciones meteorológicas en el interior y en el exterior del túnel y las alertas que afecten a la circulación.
- Ayuda a la conectividad y al posicionamiento de los vehículos.

Información dinámica

La Unión Europea en el ANEXO del Reglamento Delegado de la Comisión que complementa la Directiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, ya tiene en cuenta el uso de servicios de información infraestructura – vehículo (IVI) a través de Mensajes Infraestructura Vehículo (IVIM), en



Figura 5. Túneles cooperativos (elaboración propia)

lo que respecta a la implantación y el uso operativo de los sistemas de transporte inteligentes cooperativos. Textualmente dice que “Los IVIM apoyan la señalización vial de obligación y recomendación, como son las velocidades contextuales y las advertencias de obras en la calzada. Los IVIM facilitan información sobre las señales de circulación físicas como son las señales fijas o variables, las señales virtuales o las señales de obras en la calzada.”

Los sistemas ITS del túnel manejan en tiempo real este tipo de información, lo que permitirá difundirla a los vehículos que circulen por él a través de los canales de comunicación correspondientes.

Así mismo, siguiendo los protocolos de los servicios C-ITS, el túnel estará en disposición de transmitir información sobre alertas en tiempo real, por ejemplo:

- Accidentes: detectados por el sistema de vídeo vigilancia o por el DAI.
- Tráfico, su composición y velocidad: medibles por los sensores del túnel o por sus cámaras.
- Condiciones meteorológicas adversas a la salida del túnel: detectables por cámaras o estaciones meteorológicas (niebla, nieve, precipitaciones fuertes).
- Tráfico de mercancías peligrosas por el interior del túnel.
- Vehículo parado.
- Obras en el túnel.
- Carril cortado.
- Túnel cerrado.
- Peatones/trabajadores en el túnel.
- Incendio.
- Instrucciones de evacuación en caso de incendio u otro inciden-



Figura 6. Información de alertas de los servicios C-ITS (elaboración propia)

te en el que deban abandonar el vehículo, permitiendo además interactuar con los sistemas ITS tradicionales del túnel para facilitar el acceso a los vehículos de emergencia y/o intervención de forma que se reduzcan los tiempos de actuación y por tanto un aumento considerable de los niveles de seguridad e interoperabilidad del túnel.

Ayuda a la conectividad y al posicionamiento

Las señales de telecomunicaciones como las de posicionamiento por satélite no penetran en el interior de los túneles por cuyo motivo éstos deben estar dotados de las tecnologías necesarias para mantener la cobertura de ambos tipos de señales.

El aspecto de las telecomunicaciones está perfectamente resuelto a nivel técnico y depende del equipamiento de que disponga el túnel y de la cobertura existente en la zona.

Por otra parte, la ausencia de cobertura por satélite para el posicionamiento GPS en el interior del túnel hace que el posicionamiento

de los vehículos y la ubicación de eventos o alertas se tengan que solucionar utilizando la tecnología dual que tiene el C-V2X. Así con la instalación adecuada de unidades de borde de carretera C-V2X(PC5), más conocidas como RSU (Road Side Unit), se puede desplegar una malla de posiciones fijas GPS o puntos de referencia sobre las que por triangulación de las comunicaciones V2X entre vehículos conectados y otras RSU se ayuda al posicionamiento de vehículos con la suficiente exactitud como para interactuar con el resto de los sistemas ITS del túnel.

Se han realizado pruebas piloto de posicionamiento y seguimiento de vehículos en el interior de túneles, utilizando tecnología 5G y desplegando a lo largo de su recorrido túnel radiobalizas convenientemente distribuidas para replicar la señal del sistema de navegación GPS.

Información vehículo - túnel

Los VAC incorporan una serie de sensores para facilitar su circulación o convertirla en autónoma,

facultad ésta que los convierte a su vez en sensores dinámicos de las infraestructuras.

En la actualidad y con la excepción de pruebas piloto en algunos túneles, la información del vehículo es captada exclusivamente por los servidores de los distintos fabricantes de vehículos desde las unidades de a bordo (en inglés OBUs - On Board Units), instaladas en ellos y utilizadas, una vez clasificadas, para su uso restringido y ayuda a la navegación, sin que exista un retorno directo hacia las infraestructuras. De esta manera, los vehículos tienen la capacidad de funcionar de manera autónoma, independientemente de otra información que no sea la que capturen ellos mismos a través de sus sistemas de sensorización.

Una de las principales tecnologías que se utiliza para la sensorización en los vehículos es el análisis de video, “leyendo” las marcas viales y la señalización vertical, por lo que deberían establecerse mecanismos para asegurar que la información de los vehículos, tratada o en bruto, vuelva a realimentar los sistemas de gestión del túnel. Ese retorno podría realizarse, bien directamente entre la plataforma del fabricante del vehículo y la de gestión del túnel, o bien directamente entre el vehículo y la red RSU que tenga desplegada el túnel.

Un vehículo conectado o autónomo dispone de la capacidad de utilizar la unidad OBU para compartir con la infraestructura y otros vehículos información relativa a su desplazamiento, tanto sobre el itinerario como sobre la activación de sus diferentes sistemas de seguridad, lo que aporta información relevante a sus interlocutores. Esta información puede ser:

- Posición GPS;
- Velocidad;

- Aceleración;
- Tipo de vehículo;
- Tipo de propulsión;
- Frenada de emergencia;
- Accidente;
- Luces de advertencia;
- Pavimento deslizante;
- Atasco o retenciones;
- Condiciones de visibilidad;
- Vehículos con temperatura elevada.

Al mismo tiempo, proporciona datos de telemetría propios de la misma OBU que permiten evaluar el estado y fiabilidad de estos dispositivos, tales como:

- Nivel de cobertura o señal 3G/4G;
- Nivel de cobertura o señal V2X;
- Estado GPS y número de satélites;
- Estado de la unidad (Bluetooth, voltaje, etc.);
- Alarmas de funcionamiento;
- Estado de seguridad, PKI;
- Configuración de red;
- Alertas de temperatura elevada.

Adicionalmente, y en el caso de que pudiera hacerse uso de la información asociada a la desactivación de la conducción autónoma debido a la salida inesperada del ODD, ello también será un indicador muy útil para el gestor del túnel (por ejemplo, la pérdida de nitidez de las marcas viales).

Adecuación de la infraestructura tecnológica del túnel

Para poder realizar el intercambio de información entre el túnel y

los vehículos, tal y como ya se ha indicado, será necesario adecuar sus infraestructuras tecnológicas (sistemas y equipamientos ITS), principalmente el software de su SCADA o plataforma de gestión, para tener debidamente estructurada en formatos estándar la información topológica (MAPEM), la información estática y dinámica asociada a la información de circulación, los parámetros ambientales, etc., y el enrutamiento de las señales de telecomunicaciones y GPS para ayudar al posicionamiento, siendo también conveniente realizar un despliegue de unidades RSU que garantice la máxima cobertura en todo el trazado del túnel al objeto de intercambio de información túnel – vehículo.

Un aspecto importante para tener en cuenta a la hora de diseñar o adaptar las infraestructuras de conectividad de los túneles para que puedan interactuar con los VAC es el dimensionamiento de los sistemas para permitir establecer las comunicaciones con todos y cada uno de los vehículos que se encuentren en el túnel en un momento dado.

Este dimensionamiento debe estar preparado para soportar el proceso de intercambio de información que va a establecer el túnel con cada uno de los vehículos. Actualmente, en los proyectos piloto realizados, el número de VACs circulando por los túneles es muy limitado, siendo prácticamente un único vehículo. Sin embargo, cuando su número sea mayoritario respecto al resto de vehículos, la complejidad de la conexión simultánea con todos ellos requerirá un diseño específico u otro en función del tipo, la forma y la cantidad de información a intercambiar.

La adecuación de los túneles para soportar la circulación de los VAC requerirá probablemente un incremento de tecnologías ITS y de

sensorización, por lo que las soluciones desplegadas deberán ser escalables para poder evolucionar sin tener que renunciar a las inversiones previas.

4. Recomendaciones / consideraciones para la explotación

A nivel de la explotación del túnel, la mayor utilidad de la comunicación en tiempo real con el vehículo, a través del servidor de “V2X”, debería ser conocer sus características, no sólo parámetros físicos como velocidad, sino el tipo de vehículo y su energía de propulsión, estado mecánico (temperatura del motor), muy útil en el caso de los vehículos pesados..., así como la posibilidad de interacción con ellos, de forma que pudiesen recibir instrucciones de actuación para prevenir escenarios de peligro.

Sería interesante su aplicación a los vehículos de:

- emergencias,
- conservación y mantenimiento,
- asistencia en carretera,
- transporte,
- furgonetas de transporte de productos médicos, entre los que puede haber material radiactivo.

La comunicación vehículo túnel no debe ser únicamente en el sentido de información y actuación “pa-

siva” del túnel, activando sistemas de señalización o cierre ante determinados escenarios, como congestión o tráfico muy denso, sino que también debería tomar medidas “activas”, ordenando al vehículo conectado a realizar determinadas acciones entre las que puede estar la de detenerse.

En la fase intermedia, con vehículos únicamente “conectados”, enviar un aviso al vehículo es importante pero esta comunicación debería realizarse acompañada, de forma clara y concisa, de las recomendaciones y obligaciones sobre las acciones a tomar por parte del conductor.

Gracias a estos servicios podrá disponerse de datos como la posición en tiempo real de los vehículos que circulan por el túnel, que permitirá al operador gestionar la seguridad y señalización de forma más eficiente.

Para ofrecer servicios al resto de vehículos no conectados que seguirán circulando durante un periodo de transición, la emisión de mensajes y señales bluetooth de baja energía a dispositivos móviles cercanos a través de balizas BLE (Bluetooth Low Energy) puede ser una solución que permita obtener tiempos de recorrido de la mayoría de ellos.

En todo caso, debe resaltarse la responsabilidad que adquirirá el explotador y el titular del túnel por decisiones adoptadas y/o por posi-

bles fallos o mal funcionamiento de los sistemas instalados.

Si bien se sale del ámbito de este artículo, no deben obviarse las posibles consecuencias legales de esta nueva responsabilidad, lo que conlleva:

- Formación más exhaustiva de los operadores y del personal de mantenimiento, que deberán tener una mayor preparación técnica.
- Definición de las necesidades de mantenimiento. Dado que las instalaciones en los túneles y su gestión son cada vez más sofisticadas, es necesario replantear los perfiles profesionales de quienes realizarán estas tareas.

Consideraciones sobre el mantenimiento de las instalaciones existentes en los túneles con el tránsito de vehículos conectados y autónomos

El Informe Litman sobre la estimación de la penetración de los vehículos autónomos en el mercado prevé una saturación del vehículo autónomo en la década de los 70 de este siglo, pero no predice hasta cuando seguirán circulando los vehículos tradicionales. Esto significa que las infraestructuras viales deberán evolucionar hacia modelos de gestión que consideren la coexistencia de todas las opciones. (Tabla 3)

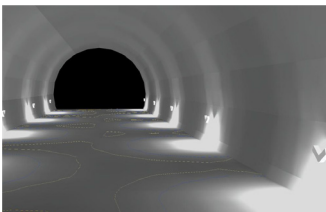
Tabla 3. Informe Litman: estimación de la penetración de los vehículos autónomos en el mercado.				
Estado	Década	Nuevas ventas	Flotas	Transporte
Desarrollo y pruebas	2020	0%	0%	0%
Disponibile con un precio elevado en gamas altas	2030	2-5%	1-2%	1-4%
Disponibile con un precio moderado en gamas altas	2040	20-40%	10-20%	10-30%
Disponibile con un precio mínimo en gamas altas	2050	40-60%	20-40%	30-50%
Funcionalidad estándar incluida en la mayoría de los vehículos	2060	80-100%	40-60%	50-80%
Saturación (asequible para quien lo desee)	2070	?	?	?
Requisito para todos los vehículos nuevos y en funcionamiento	?	100%	100%	100%

Esta evolución debe pasar tanto por la completa digitalización de los sistemas de gestión del túnel como por la adecuación de las infraestructuras, tanto las de conectividad como las de los sistemas de seguridad, para facilitar el tránsito de los VAC en cualquiera de sus niveles tecnológicos pero manteniendo las condiciones de seguridad en la conducción humana.

Ello se traduce en consideraciones específicas para algunos de los sistemas del túnel.

Iluminación

La gestión de la iluminación es un aspecto clave para garantizar la seguridad en la conducción de cualquier tipo de vehículo, por ello es importante mantener una iluminación y limpieza adecuadas en el túnel.

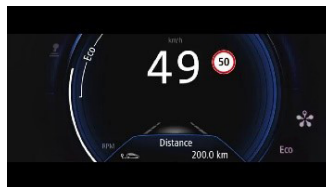


En el caso de las luminarias de emergencia a baja altura, su mantenimiento seguirá siendo crítico para garantizar la visibilidad en caso de necesidad de evacuación a pie, incluso más exigente a medida que la automatización de los vehículos aumente y la iluminación normal pierda relevancia.

Señalización

Los elementos de señalización fija vertical y horizontal, regulados en España por las Normas 8.1-IC y 8.2-IC respectivamente, resultan indispensables para mejorar la seguridad del paso de vehículos independientemente de su grado de automatización, con objeto de delimitar correctamente los carriles

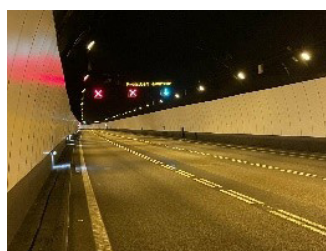
para mantenerse en ellos o realizar cambios de carril con seguridad, interpretar correctamente de forma automática las señales verticales como pueden ser las de limitación de velocidad, etc. Será por tanto necesario fomentar entre los explotadores la necesidad e importancia de mantener de forma adecuada y limpia tanto la señalización fija horizontal (marcas viales, señales pintadas en calzada) como la vertical.



En cuanto a la señalización variable, disponible en gran número de túneles, con semáforos, paneles de mensaje variable (PMV), señales de afectación de carril y otros, habría que verificar la capacidad de los sensores de los vehículos para reconocer los mensajes de este tipo de elementos.



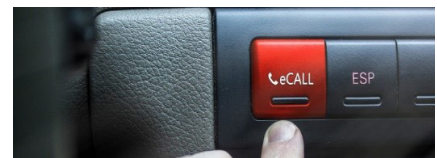
Como caso particular se podría mencionar la gestión de carriles reversibles con balizas led, como la existente en el túnel de Vallvidrera en Barcelona, para conocer si los coches automatizados pueden in-



terpretar el código de colores de forma similar a los semáforos, sistema también habitual en los carriles reservados para autobuses y vehículos de alta ocupación (BUS-VAO).

Cobertura de telefonía móvil

La cobertura de telefonía móvil no es un sistema exigido en túneles de carretera, incluso a veces es un tema controvertido, sin embargo suele implantarse por interés de las compañías. Debe tenerse en cuenta que dicha cobertura es necesaria para alguno de los servicios cooperativos ya existentes en la actualidad, como el sistema eCall de obligada implantación en Europa, desde el mes de abril de 2018, para los vehículos ligeros.



En caso de accidente, este sistema permite el aviso automático al centro de coordinación de emergencias más cercano, emitiendo un mensaje, mediante la red de telefonía móvil, con los datos básicos de localización del vehículo y hora del suceso. Los túneles disponen habitualmente de una infraestructura de telefonía móvil que da cobertura en su interior, aspecto crucial que permite esta funcionalidad. Este sistema complementa la detección de accidentes en túneles que disponen de sistemas de vigilancia y de detección automática de incidentes (DAI), siendo relevante en túneles más cortos que no disponen de este sistema, normalmente interurbanos de longitud inferior a 500 metros.

Por tanto, se considera importante supervisar por parte de los explotadores el mantenimiento que realizan sobre esta instalación los

operadores de telefonía, así como la realización de pruebas que garantice su funcionamiento en el interior del túnel, pruebas que en la actualidad no se realizan.

Aprovechamiento de la información y conectividad de los vehículos para la gestión del túnel

Los vehículos puede ser fuente de información relevante para la gestión de la seguridad de un túnel de carretera. Si la conectividad de los vehículos avanza en el ámbito de los sistemas cooperativos como se espera, y se dan las circunstancias de regulación necesarias, similar a lo normalizado para el sistema eCall en el ámbito comunitario, las posibilidades de mejora de la seguridad de los túneles son evidentes por ejemplo para detectar el paso de:

- Vehículos con mercancías peligrosas (MMPP): existen sistemas de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) que permiten detectar de forma automática vehículos con mercancías peligrosas y de propulsión eléctrica, si bien su uso no está extendido en los túneles. Un ejemplo es el sistema previsto instalar en el nuevo túnel de Ole-

sa (1,8 km) en la B-40 de Barcelona en el que no se permitirá el paso de MMPP.

- Vehículos especiales: este tipo de vehículos necesitan autorización previa y ésta podría ser gestionada por el Centro de Control.
- Vehículos con posibilidad de elevado peligro de incendio: se podrían detectar con antelación a la entrada del túnel.

5. Conclusiones

Los “Vehículos Autónomos Conectados” (VAC) han revolucionado la industria del transporte en superficie, pero ¿qué ocurre cuando se trata la singularidad de una infraestructura crítica como son los túneles de carretera?. Éstos plantean desafíos únicos para la conducción autónoma y en este artículo se ha expuesto cómo se están abordando.

Sensores específicos para los túneles de carretera: Los túneles carecen de señales GPS y en ocasiones tienen una iluminación deficiente. Por ello los vehículos autónomos en túneles dependerán en gran medida de sensores específicos, como LIDAR y cámaras infrarrojas, para navegar de manera segura.

Comunicación con la infraestructura (RSU's): La instalación de sistemas de comunicación vehículo a infraestructura (V2I) en los túneles permite a los vehículos autónomos recibir información en tiempo real sobre el tráfico, las condiciones climáticas y los cierres de túnel. Asimismo, los VAC pueden proporcionar información valiosa en tiempo real detectada por sus sensores y transmitirla a la infraestructura de control del túnel, generándose así alertas de eventos relevantes para otros conductores/VAC y para la gestión segura y efi-

ciente del propio túnel.

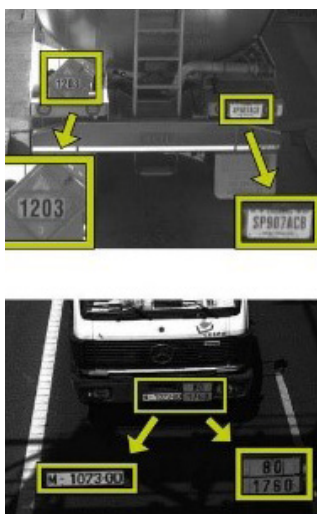
Seguridad en caso de emergencia: Los vehículos autónomos deberán estar equipados con sistemas de seguridad que les permitan reaccionar ante situaciones de emergencia, como incendios o accidentes en el interior del túnel.

Posicionamiento y localización precisos: La creación de mapas 3D detallados de los túneles es esencial para la navegación autónoma. Los vehículos autónomos utilizarían estos mapas para determinar su posición precisa en el túnel.

Regulación y normativas: La regulación de los vehículos autónomos en túneles es un desafío importante. Los gobiernos y las autoridades deberían establecer normativas claras para garantizar la seguridad y la interoperabilidad.

Beneficios potenciales: La automatización de vehículos en túneles puede mejorar la seguridad al reducir el riesgo de accidentes debidos a errores humanos y aumentar la eficiencia en su explotación, sin olvidar que una buena formación de los operadores es fundamental para alcanzar los estándares de seguridad que se buscan. Este objetivo se alcanzará gracias a la labor humana sumada a la tecnología.

Investigación y desarrollo continuo: Dado que nos encontramos ante una tecnología emergente y en plena evolución, la investigación y el desarrollo continuo son fundamentales para superar los desafíos técnicos y garantizar que los vehículos autónomos puedan funcionar de manera segura y efectiva en este tipo de infraestructuras. En este sentido, debe valorarse como gestionarlas y su movilidad, considerando periodos de transición en los que los vehículos autónomos y conectados debe coexistan con los convencionales.



En resumen, los vehículos autónomos representan un emocionante avance tecnológico que tiene el potencial de mejorar la eficiencia y la seguridad en el entorno de los túneles. Ello implica cambios de paradigmas importantes en la concepción y diseño de sus sistemas de control y seguridad, la capacitación de sus operadores y de los equipos de intervención y su relación con el resto de los actores y de las infraestructuras viales, requiriendo asimismo una inversión continua en investigación, desarrollo y regulación para hacer realidad esta visión y aprovechar al máximo los beneficios de la cooperación entre los VAC y los túneles de carretera.

6. Glosario de términos.

5GAA: Asociación de Automoción 5G (5G Automotive Association)

ADS: Sistema de Detección y Asistencia al Conductor (Advanced Driver Assistance System)

AEB: Sistema de Frenado de Emergencia (Advanced Emergency Braking)

ATC: Asociación Técnica de la Carretera

BLE: Balizas Bluetooth de Bajo Consumo (Beacon Bluetooth Low Energy)

BUS-VAO: Carril de Vehículos de Alta Ocupación (High-Occupancy Vehicle Lane)

C-V2X: Comunicaciones Vehículo a Todo (Cellular Vehicle-to-Everything)

DAI: Detección Automática de Incidentes

DDT: Tarea de Conducción Dinámica (Dynamic Driving Task)

DSRC: Comunicaciones de Corto Alcance (Dedicated Short Range Communications)

ESC: Control Electrónico de Estabilidad (Electronic Stability Control)

H2020: Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea

FP7: Séptimo Programa Marco de la Unión Europea

GLOSA: Recomendación de Velocidad en función del tiempo de verde en los semáforos (Green Light Optimal Speed Advisory)

GPS: Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)

I2V: Comunicación infraestructura-vehículo (Infrastructure-to-Vehicle Communication)

ITS-G5: Sistemas de Transporte Inteligente basados en la norma IEEE 802.11p (Intelligent Transport Systems - IEEE 802.11p-based)

OCR: Reconocimiento Óptico de Caracteres (Optical Character Recognition)

ISAD: Soporte de Infraestructura para la Conducción Automatizada (Infrastructure Support for Automated Driving)

ITS: Sistemas Inteligentes de Transporte (Intelligent Transport Systems)

IVI: Información Infraestructura-Vehículo (Infrastructure-Vehicle Information)

IVIM: Mensajes Infraestructura-Vehículo (Infrastructure-Vehicle Messages)

LIDAR: Detección y Medición por Láser (Light Detection and Ranging)

MAPEM: Terminología topológica para el intercambio de información vehículo-infraestructura, según especificación ETSI TS 103 301 V1.3.1 (2020-02) (MAP (topology) Extended Message)

MMPP: Mercancías Peligrosas

OBU: Unidad embarcada (On Board Unit)

ODD: Dominio de Diseño Operacional (Operational Design Domain)

PC5: Comunicaciones directas entre el Vehículo y la Infraestructura (Vehicle-to-Infrastructure Communications)

PKI: Infraestructura de Clave Pública (Public Key Infrastructure)

PMV: Panel de Mensaje Variable

PVD: Vehículos sensorizados para adquisición de datos (Probe Vehicle Data)

RSU: Unidad al Borde de la Carretera (Road-Side Unit)

SAE: Sociedad de Ingenieros de Automoción (Society of Automotive Engineers)

SCADA:	Supervisión y Adquisición de Datos en Tiempo Real (Supervisory Control and Data Acquisition)
Uu:	Interfaz Aérea licenciada de telefonía móvil (Air Interface)
V2I:	Comunicaciones del Vehículo a la Infraestructura (Vehicle-to-Infrastructure Communications)
V2P:	Comunicaciones del Vehículo a Persona (Vehicle-to-Pedestrian Communications)
V2V:	Comunicaciones del Vehículo a Vehículo (Vehicle-to-Vehicle Communications)
V2X:	Comunicaciones del Vehículo a Todo (Vehicle-to-Everything Communications)
VAC:	Vehículo Autónomo y Conectado según SAE

7. Referencias y bibliografía

- [1] SAE (2021) Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (J3016_202104). SAE International. US <https://www.sae.org/>.
- [2] Gestión de los Dominios de Diseño Operativo para los Vehículos Automatizados. García, A. Camacho, FJ. Llópiz, D. Rutas Técnica nº 192. ATC. 2022
- [3] D.5.4 Infrastructure Classification Scheme. Proyecto INFRAMIX (Road INFRAstructure ready for MIXed vehicle traffic flows). Programa H2020 UE. 2019 <https://www.inframix.eu/>.
- [4] UNE-CEN/TS 16157. Especificaciones DATEX II de intercambio de datos para la gestión del tráfico y la información vial. UNE <https://www.datex2.eu/>.
- [5] DRIVE C2X\ndRIVING implementation and Evaluation of C2X communication technology in Europe. Programa FP7. UE. 2011-2014 <https://cordis.europa.eu/project/id/270410/es>.
- [6] Compass4D. Programa FP7. UE. 2013-2015 <https://trimis.ec.europa.eu/project/compass4d>.
- [7] C-MOBILE (Accelerating C-ITS Mobility Innovation and deployment in Europe). Programa H2020 UE. 2021 <https://c-mobile-project.eu/>.
- [8] C-ROADS - THE PLATFORM OF HARMONISED C-ITS DEPLOYMENT IN EUROPE. UE 2018. <https://www.c-roads.es/>.
- [9] Reglamento de Ejecución (UE) 2022/1426 de la Comisión de 5 de agosto de 2022, por el que se establecen las normas para la aplicación del Reglamento (UE) 2019/2144 del Parlamento Europeo y del Consejo en cuanto a los procedimientos uniformes y especificaciones técnicas para la homologación de tipo del sistema de conducción automatizada (ADS) de los vehículos totalmente automatizados.

8. Autores

Este artículo ha sido elaborado por el Grupo de Trabajo de Vehículos Conectados y Autónomos del Comité Técnico C5 “Túneles” de la Asociación Técnica de Carreteras, habiendo colaborado en su redacción: Alberto Abella Suárez, Fernando Garrido Pérez-Villamil, Iván Ricondo Zaldívar, José Manuel Martínez Oliveira, José Manuel Portilla Saiz, Koldo Berasategui Ordeñana, Oscar Borobia Cuesta, Ramón Morera Fauquier y Vicente Sebastián Alapont. ❖