XXV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Santander, 10-13 junio 2025
Universidad de Cantabria
IFToMM

Análisis y mitigación de fallos potenciales en el funcionamiento de un vehículo altamente automatizado

Felipe Jiménez, José Eugenio Naranjo

Instituto Universitario de Investigación del Automóvil. Universidad Politécnica de Madrid, felipe.jimenez@upm.es; joseeugenio.narnajo@upm.es

Los vehículos tienen cada vez mayores sistemas de asistencia cuya integración coordinada conducen a niveles de automatización crecientes con lo que pueden abordar tareas de mayor dificultad. Sin embargo, cuando se plantean sistemas de nivel SAE 4 en escenarios complejos, todavía aparecen numerosas incertidumbres en cómo pueden abordar ciertas tareas de conducción asumiendo que el trasvase inmediato del control al conductor no es una alternativa viable. Por ello, en este trabajo se plantea un estudio sistemático de riesgos de las diferentes capas de la arquitectura de un vehículo automatizado. En este análisis se incluyen tanto causas de fallo internas del propio sistema como externas del escenario, y se valora qué medidas debe adoptar el vehículo para detectar de forma automática esos comportamientos anómalos y cómo reaccionar en consecuencia.

Este análisis de riesgos tiene implicaciones claras en la certificación de estos vehículos para su circulación en vías abiertas al tráfico según lo requerido en la Instrucción VEH 2022/07 para la autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general publicada por la Dirección General de Tráfico.

Así, ante un trasvase de la responsabilidad del conductor al sistema, resulta clave la definición concreta de la respuesta de fallback y la maniobra de riesgo mínimo en cada situación, concepto genérico que debe materializarse en decisiones concretas por parte del sistema. De esta forma, se pretende dar un paso adicional sobre el planteamiento de pruebas básicas estandarizadas para certificación que se especifican en la normativa vigente que mantienen todavía una fuerte dependencia de la responsabilidad última que recae en el operador.

Estos análisis conceptuales de riesgos se han aplicado sobre diferentes tipologías de vehículos como vehículos de transporte colectivo en entornos restringidos y urbanos, o vehículos destinados a servicios urbanos (por ejemplo, limpieza). Así, se han implementado las medidas de detección de fallos y maniobras de riesgo mínimo en la arquitectura de decisión del vehículo, y se han definido y ejecutado las pruebas con el fin de verificar su correcto (seguro) funcionamiento en condiciones adversas y así certificar que pueden circular interactuando con tráfico real. De igual forma, se analiza un caso particular no explicitado hasta la fecha en la normativa actual como es la función de teleguiado, complementando la de monitorización remota, sí contemplada, pero de forma genérica. Como conclusión, se ha comprobado cómo, sobre los análisis de riesgos, se pueden plantear e implementar soluciones de decisión y actuación seguras, cuyo funcionamiento es demostrado de forma práctica.

1. Introducción

Los vehículos tienen cada vez mayores sistemas de asistencia cuya integración coordinada conducen a niveles de automatización crecientes con lo que pueden abordar tareas de mayor dificultad. El reciente barómetro de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) [1] muestra que, con la superposición de sistemas de asistencia, el nivel de automatización disponible en los vehículos basado en la clasificación publicada por SAE [2] es aún mayor que el permitido actualmente por la normativa, además de los desarrollos experimentales que se vienen llevando a cabo en muchos países a lo largo de la última década. La conducción autónoma y conectada propone soluciones para paliar los efectos negativos del transporte por carretera, como los accidentes, además de ayudar a reducir los atascos y la energía consumida y las emisiones. Asimismo, democratiza el uso de este modo de transporte entre colectivos de personas que, hasta la fecha, han tenido dificultades para acceder a él por diversos motivos, como capacidades limitadas o edad avanzada.

Sin embargo, el despliegue real de vehículos con altas capacidades de automatización y conectividad todavía presenta incertidumbres en varios planos, no solo en el tecnológico, sino en aspectos legales, económicos, éticos o sociales, sobre todo cuando se desea alcanzar el nivel 4 en el que el conductor no hace falta que intervenga mientras se mantenga la circulación bajo ciertas condiciones.

Por tanto, avanzar hacia mayores niveles de automatización redunda en mayores beneficios, aunque los pasos tecnológicos, sociales y legales deben ser graduales, cubriendo las limitaciones actuales.

Antes de poder poner un vehículo automatizado a circular debe comprobarse que su comportamiento es suficientemente seguro y fiable. En este sentido, el hecho de que un vehículo autónomo deba afrontar una situación en la que no sea capaz de seguir realizando correctamente sus funciones puede deberse a diferentes causas. por lo tanto, no sólo se debe estudiar la acción de mitigación, sino también cómo detectar cuando se va a desencadenar.

En este trabajo se plantea un estudio sistemático de riesgos de las diferentes capas de la arquitectura de un vehículo automatizado. En este análisis se incluyen tanto causas de fallo internas del propio sistema como externas del escenario, y se valora qué medidas debe adoptar el vehículo para detectar de forma automática esos comportamientos anómalos y cómo reaccionar en consecuencia.

2. Definiciones

Mientras un vehículo automatizado no pueda gestionar cualquier escenario y situación de conducción, es preciso definir los ámbitos en los puede funcionar correctamente, qué tareas puede desempeñar en tal caso y cómo debe reaccionar si se saliese de dicho ámbito. De esta forma, es relevante definir los siguientes conceptos:

Operational Design Domain (ODD): Condiciones de funcionamiento bajo las cuales un sistema de automatización de conducción determinado o una característica del mismo está diseñado específicamente para funcionar, incluidas, entre otras, restricciones ambientales, geográficas y de hora del día, y/o el requisito de presencia o ausencia de ciertas características del tráfico o la carretera.

Dynamic driving task (DDT): Conjunto de funciones operativas y tácticas en tiempo real necesarias para operar un vehículo en el tráfico en carretera, excluidas las funciones estratégicas como la programación de viajes y la elección de destinos y puntos de referencia, e incluyen, entre otras, las siguientes subtareas:

- Control del movimiento lateral del vehículo mediante la dirección.
- Control del movimiento longitudinal del vehículo a través de la aceleración.
- Monitorización del entorno de conducción mediante la detección de objetos y eventos, reconocimiento, clasificación y preparación de respuesta.
- Planificación de maniobras.

DDT Fallback: Respuesta del usuario o de una SDS para realizar la DDT o lograr una condición de riesgo mínimo después de la ocurrencia de un fallo del sistema relevante para el desempeño del DDT o al salir de ODD.

Una salida del ODD puede deberse a causas internas (p. ej., fallos del subsistema o funcionamiento degradado) o causas externas (p. ej., características de la infraestructura, iluminación y condiciones climáticas). En tales casos, en vehículos autónomos de nivel 3 o inferior, el conductor debe dar la respuesta para mitigar esta situación [3, 4].

3. Fallback ante errores del sistema y salidas del ODD

Los crecientes niveles de automatización están condicionados en gran medida por las situaciones que el vehículo puede afrontar sin la intervención del conductor y por cómo se produce la transición entre el modo automático y manual, es decir, el grado de atención a la tarea de conducción que el conductor debe prestar para garantizar la seguridad.

De acuerdo con los niveles de automatización SAE, en sistemas por debajo del Nivel 3, las acciones de fallback cuando los vehículos entran en condiciones que no fueron contempladas u ocurren fallos son realizadas por conductores humanos. Sin embargo, en el caso de alta automatización (Nivel 4) y automatización completa (Nivel 5), las funciones de fallback ya no pueden ser atendidas por conductores humanos, sino por el propio sistema, lo que significa que no habrá ningún controlador que asuma el control cuando ocurren fallos o ante condiciones operativas bajo las cuales un determinado sistema no está diseñado específicamente para funcionar, es decir, al salir del dominio de diseño operativo (ODD). Por lo tanto, es necesario definir una estrategia de emergencia para el nivel 4+ que ayude a mantener el vehículo en condiciones de mínimo riesgo.

Hay dos elementos fundamentales que forman parte del sistema fallback: por un lado, el sistema de monitorización, que puede supervisar el ODD y detectar situaciones de mal funcionamiento; por otro lado, el sistema de control y actuación, que es capaz de tomar el control del vehículo para conducirlo a una condición de mínimo riesgo. Así, los posibles fallos del DDT pueden ocurrir en la percepción, la decisión o la acción, lo que lleva a una salida del ODD [5].

Los elementos clave para lograr un sistema de percepción confiable y robusto son: un sistema de sensores redundante, robusto, preciso y multimodal que proporcione una cobertura de 360° del entorno del vehículo [6]. Para una percepción sólida, se debe garantizar la redundancia no sólo a nivel algorítmico, sino también a nivel de sensor, con diferentes tipos de sensores que proporcionen información geométrica, semántica y multimodal. Este tipo de sistemas de detección suele estar equipado con cámaras que pueden proporcionar una cobertura de 360° y LiDAR para detección 3D [7].

La detección de fallos relacionadas con sensores se puede clasificar en dos categorías. La primera es la detección de fallas en el hardware del sensor. Esta tarea normalmente no la resuelven los fabricantes, siendo responsabilidad del sistema de conducción autónoma detectar un posible fallo parcial de lectura en los sensores generadores de percepción. La tarea basa su complejidad en el funcionamiento parcial del sensor, dando datos falsos de correcto funcionamiento al supervisor de estado del automóvil. La segunda categoría es el error en el análisis de los eventos de percepción debido a la contradicción de los sensores. La fusión más común y desarrollada es entre cámara y LiDAR, pero en los últimos años se han introducido la fusión de cámara y radar y sistemas que fusionan los tres sensores de percepción. Los cálculos de probabilidad e incertidumbre relacionados con el uso y análisis de estos sensores y la fusión correspondiente se utilizan para determinar la confianza y el uso en la detección prematura de fallos [8]. Las características de detección mejoradas muestran los fundamentos clave para analizar la detección prematura de fallos [9]. Si tras la fusión estos aspectos no mejoran el resultado obtenido individualmente para cada sensor, se establece el origen de un posible fallo y su evolución. Actualmente, la redundancia en los sistemas de sensado es costosa computacionalmente [10].

En cuanto a las actuaciones en caso de fallo, en [3] se presenta el diseño de una estrategia de emergencia para el Nivel 4+, que contiene tres niveles degradados en 7 escenarios diferentes, utilizando una máquina de estados en una simulación muy básica. Sin embargo, aunque la casuística a la que nos podemos enfrentar por situaciones de fallo del ADS es muy amplia, por lo general se trata de detener automáticamente el vehículo en su trayectoria actual, o de realizar una maniobra encaminada a sacar el vehículo del carril de circulación [11].

En [12] se presenta un sistema en el que los vehículos tienen una estrategia adicional de fallback diseñada para detener el vehículo de forma controlada dondequiera que se encuentre. Por otra parte, pueden darse situaciones en las que las características de la carretera hagan peligroso cualquier intento de frenar, siendo necesario emplear otras estrategias. El trabajo de [13] propone una estrategia de emergencia en caso de fallo del sistema de percepción y parada progresiva. Otro trabajo relacionado con la emergencia en caso de fallo del sistema de percepción es el de [14], en el que se propone una parada controlada, y su estrategia ha sido validada en un sistema virtual en dos escenarios de conducción, seguimiento del automóvil. y cambio de carril. Sin embargo, por lo general, estos enfoques conllevan un enfoque un tanto simplista, ya que, el fallback no cuenta con ninguna estrategia de detección, y no hay toma de decisiones para seleccionar la maniobra de mitigación más adecuada, sino que siempre se utiliza la misma operación predefinida.

4. Alternativas a los ensayos en tráfico abierto

Durante el desarrollo de soluciones de automatización, la comprobación de su correcto funcionamiento es crucial. El estado final comprende ensayos reales en tráfico abierto, pero éstos plantean numerosas incertidumbre, variables no controladas y riesgos para el propio vehículo y otros usuarios. Por esta razón, se plantean otras alternativas:

- Pruebas en pista (como primera alternativa más citada), incluyendo situaciones comunes de circulación, interacción con otros usuarios o la valoración ante escenarios de emergencia (que imiten entornos urbanos, vías convencionales y vías de alta capacidad).
- Recogida de datos y ensayos en tráfico abierto bajo diferentes condiciones y escenarios, persiguiendo la mayor distancia recorrida para acumular posibles situaciones de fallo. Esto incluye:

    - Pilotos controlados bajo condiciones controladas y supervisadas, registrando datos sobre las prestaciones del sistema en situaciones reales, orientados a identificar y corregir problemas que no se detectan en simulaciones o pistas de prueba.
    - Monitorización continua de los vehículos durante las pruebas en carretera para evaluar el rendimiento en tiempo real y ajustar los algoritmos según sea necesario.
    - Funcionamiento del sistema autónomo en modo de monitorización pasivo (sin control del vehículo) mientras un conductor humano está al mando, lo que permite comparar las decisiones del sistema con las del conductor humano en tiempo real y ajustar los algoritmos.
- Simulaciones o gemelos digitales, incluyendo entornos virtuales complejos, interacciones con otros usuarios humanos o escenarios altamente improbables y que no podrían ser verificados por otras vías. Esto permite evaluar las prestaciones del sistema en situaciones que serían peligrosas o impracticables de replicar en el mundo real. En este ámbito se incluyen:
    - Simulación de escenarios complejos con simuladores avanzados para recrear una variedad de escenarios de tráfico, condiciones climáticas y situaciones de emergencia.
    - Pruebas de Hardware-in-the-Loop (HIL) y Software-in-the-Loop (SIL) para evaluar la interacción entre los componentes físicos y el software del vehículo en un entorno controlado.
    - Generación de datos sintéticos para crear grandes volúmenes de datos sintéticos para entrenar y probar los algoritmos de Inteligencia Artificial del sistema, asegurando que sean robustos frente a una amplia gama de escenarios.

Sin embargo, a pesar del potencial de las anteriores alternativas, los ensayos en condiciones reales son imprescindibles para comprobar que el vehículo es capaz de garantizar el nivel de automatización declarado y reaccionar de forma adecuada ante las salidas del ODD o ante fallos en función de tal nivel, Adicionalmente, este tipo de ensayos permiten valorar aspectos que las demás alternativas no permitirían como pueden se los aspectos sociales de aceptación y nivel de riesgo percibido [15], no solo de otros conductores sino de usuarios de la misma infraestructura, o la integración con el tráfico de vehículos conducidos por usuarios humanos. La aceptación de los usuarios de los vehículos automatizados se ha estudiado desde varias perspectivas, aunque se pueden agrupar en el empleo de las siguientes herramientas (no excluyentes): ensayos (en vía abierta o en pista o simulación) y encuestas. Los primeros se enfocan sobre todo a la percepción del riesgo, la facilidad de uso y acceso intuitivo a la tecnología, mientras que el segundo bloque amplia más la perspectiva de factores implicados, aunque tiene la desventaja de que pueden resultar más cualitativos y subjetivos. Por ello, también es común encontrar enfoques que combinan ambas herramientas de análisis. Así, a diferencia de trabajos como [16, 17], en [18] se presentan ensayos en vías abiertas al tráfico con escenarios menos estructurados, con una velocidad máxima de 50 km/h, en una periurbana e interurbana. Los ensayos fueron complementados con cuestionarios en los que se permitía gran margen de libertad en las respuestas para apreciar las percepciones de los usuarios. En [19] también se presentan conclusiones de ensayos con un vehículo autónomo nivel 3 en entorno abierto. Se pedía identificar el riesgo percibido ante un conjunto de maniobras como giros, aproximaciones a una intersección, etc.

5. Normativa para circulación en pruebas

Resulta clara la necesidad de regular el marco normativo tanto para la comercialización como para la circulación de los vehículos autónomos, aunque se observa que pueden quedar retos técnicos que pueden tener implicaciones sobre la regulación posteriormente.

En la actualidad, la normativa de homologación trata de verificar que los vehículos que se comercializan son suficientemente seguros. Para ello, se han establecido ensayos concretos sobre los diferentes sistemas. Sin embargo, la mayor parte de estos ensayos tienen una base mecánica. En el caso de los vehículos autónomos, más allá de las actuaciones sobre los mandos de conducción, se identifican las fases de percepción y toma de decisiones, que son muy dependientes del escenario concreto. Si bien es posible establecer requisitos técnicos para los sensores, la evaluación de los algoritmos encargados de gestionar los datos capturados, y utilizarlos en la toma de decisiones requiere un enfoque más complejo. Esta valoración solo podría realizarse sobre escenarios concretos y mediante la verificación de la respuesta final del sistema, comprobando que los algoritmos sean capaces de generalizar de forma adecuada ante escenarios no explícitamente contemplados en su diseño.

Cada vez es mayor la necesidad de regular la circulación de vehículos altamente automatizados ante los niveles crecientes que permite la tecnología actual. Así, varios países, incluido España, están trabajando en esta línea [20]. A pesar de ello, las perspectivas de contar con vehículos de nivel SAE 4 para entornos complejos está todavía lejana, no así para escenarios más estructurados.

La aprobación del Reglamento (EU) 2019/2144 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2019 [21], introdujo los primeros requisitos específicos para la homologación y circulación de vehículos a nivel

europeo, y estableciendo definiciones claras en relación con la clasificación de los distintos niveles de automatización. Posteriormente, el nuevo Reglamento (UE) 2022/1426 [22], sobre procedimientos y especificaciones técnicas para la homologación de sistemas de conducción automatizada (ADS) de los vehículos totalmente automatizados, complementa dichos requisitos garantizando la operatividad y la seguridad de sobre dichos sistemas en tráfico real.

Sin embargo, lo que sí resulta una realidad es el despliegue de pruebas y pilotos que, para verificar su operatividad real pasan por circular en entornos abiertos al tráfico y, a ser posible, con excesivas restricciones. Estas pruebas resultan, por lo general, más ambiciosas que las funcionalidades que inicialmente se plantean implantar de nivel SAE 4. Por otra parte, las pruebas no suponen un producto comercializable y se pueden considerar premisas que garanticen la seguridad del tráfico, aunque no sigan de forma estricta las definiciones de niveles SAE y el reparto de tareas y responsabilidades que éstas implicas. Por ello, en 2015, DGT publicó la Instrucción 15/V-113 [23] que ha sido modificada por la Instrucción 2022/07 [24] para dar cabida a cierta tipología de vehículos especiales que, por sus condiciones particulares de funcionamiento (por lo general, su limitación de velocidad máxima en modo autónomo) no podían cumplir las pruebas genéricas y debían ser adaptadas. Esta Instrucción comprende una revisión documental del vehículo, el entorno de circulación y funcionalidades del modo autónomo, así como una serie de pruebas dinámicas que comprenden la operación manual, el control autónomo longitudinal y lateral, y las funciones de override de las órdenes del sistema autónomo por parte del operador ya que es el conductor humano el que mantiene la responsabilidad en caso de incidente.

Sin embargo, aunque la primera versión de la instrucción se enfocaba a una tipología de vehículo autónomo concreta (muy orientada a turismos y en entornos mayormente interurbanos), su evolución posterior sí permitió vehículos y escenarios más complejos y particulares. Sin embargo, ha quedado patente que se requiere un análisis caso a caso que debe acometer el Centro de Reconocimiento Tecnológico. La aplicación de este análisis ha permitido identificar puntos clave en la mejora de la regulación de los vehículos autónomos, tanto para su circulación en pruebas como para su comercialización.

6. Evaluación de riesgos

El estudio de riesgos se realiza sobre las diferentes capas de la arquitectura del vehículo autónomo que incluyen la recolección de información (posicionamiento y percepción), toma de decisiones incluyendo la formación de la conciencia situacional y actuación. A continuación, se incluye una revisión de posibles errores con carácter general, que deben ser concretados para cada vehículo en función de los sistemas embarcados, las estrategias de guiado y los mandos de actuación.

6.1. Posicionamiento

El posicionamiento del vehículo se puede realizar por diferentes medios como sistemas globales por satélite, sistemas inerciales o sistemas de percepción. Por lo general, se tienden a complementar, aunque cada opción tiene mayor o menor peso en función de la aplicación y entorno concretos. Por otra parte, el mapa digital se toma como sensor secundario para aportar mayor información, pero también puede sufrir inexactitudes o falta de actualización. La Tabla 1 muestra los errores que pueden surgir en este posicionamiento.

Tabla 1: Errores en el posicionamiento

Error	**Detección del error**	**Medidas de mitigación y /o fallback**
	Posicionamiento GNSS	
No hay señal	Se identifica al no recibir una trama válida de datos de posicionamiento (no entraña dificultad)	Basar posicionamiento en otras fuentes. En función de la robustez de esas fuentes, puede ser necesario degradar sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Escasa calidad en la señal	En modo absoluto, la robustez relativa se valora mediante comparación con otros medios de posicionamiento.	Fusionar la señal con otras fuentes de posicionamiento, primando la relevancia de cada una en función de una estimación de su fiabilidad y robustez. Niveles bajos de robustez pueden conllevar la degradación de los sistemas autónomos.
	En modo diferencial (situación excepcional en conducción real), se dispone de una estimación del error máximo.	
	Sistemas inerciales INS	
Error acumulativo	Siempre está presente en este sistema de posicionamiento.	Se puede tener estimación por lo que se deduce la distancia máxima que se puede recorrer para tener la seguridad de no sobrepasar una tolerancia en función de la aplicación autónoma si resulta la única fuente viable de posicionamiento. Por encima de esa tolerancia, se debe degradar los sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente.

	Sensores de percepción	
Mala detección de los elementos de referencia	Con elementos de referencia discretos, no detección de suficiente número de elementos.	No es posible el posicionamiento por esta vía. En función de la duración continuada de esta situación, se debe degradar los sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente.
	Con elementos de referencia continuos, estimación inestable de una extrapolación del elemento o pérdida de uno de los elementos cuando existen varios redundantes.	Algoritmos confiables para reducir inestabilidades o reducción de capacidades autónomas o nivel de automatización.
Error acumulativo de la odometría visual	Siempre está presente en este sistema de posicionamiento.	Se puede tener estimación por lo que se deduce la distancia máxima que se puede recorrer para tener la seguridad de no sobrepasar una tolerancia en función de la aplicación autónoma si resulta la única fuente viable de posicionamiento. Por encima de esa tolerancia, se debe degradar los sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente.
	Mapa digital	
Inconsistencia con percepción o posicionamiento	Extracción de características del entorno con sensores de percepción y comprobación de consistencia con información del mapa.	En función de la duración continuada de esta situación, se debe degradar los sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente. Mayor peso al guiado mediante sistemas de percepción (si se comprueba su robustez) con sus limitaciones intrínsecas.
Error en map-matching	Reducción de la fiabilidad en la función de map-matching.	Ídem al caso anterior.

6.2. Percepción del entorno

La detección del entorno se puede realizar empleando diferentes sensores como radar, visión artificial o LiDAR. Cada uno de ellos presenta unas ventajas y limitaciones [25] por lo que la fusión sensorial constituye una solución para aprovechar sinergias, si bien también puede ser fuente de incertidumbre. Así, la fusión de sensores se utiliza para mejorar los sistemas de detección, clasificación e identificación de elementos viales para una correcta navegación basados en cámaras, LiDAR y radar donde el fallo más común es que uno de los sensores detecta un obstáculo y otro no. Se debe gestionar la información contradictoria de los sensores para evitar fallas sistémicas en la conducción. La Tabla 2 incluye la identificación de estos errores.

Tabla 2: Errores en la percepción

Error	**Detección del error**	**Medidas de mitigación y /o fallback**
Sensor inoperativo o información totalmente errónea	No se recibe señal correcta	Valorar si el resto de los sensores puede suplir la información que no proporciona ese sensor, valorar si la fiabilidad se mantiene en caso de que sea posible suplirlo. En caso de no ser posible, se debe degradar los sistemas autónomos, eliminar algunas funciones, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Información con errores	Datos no consistentes en parte de la detección (una zona del campo de visión o de forma dispersa en todo el campo sin eliminar totalmente la percepción del entorno real).	Técnicas para identificar datos incorrectos o con ruido. Técnicas de filtrado de datos. Valorar si la información disponible es suficiente. Identificación de zonas de datos incorrectos de datos y valoración de su relevancia para la formación de la conciencia situacional.
Pérdida de información de elementos de referencia	No se identifican datos que constituyen la referencia para el guiado (líneas de carril, señales de tráfico, etc)	Si no se dispone de otras fuentes complementarias para el guiado válidas puede ser necesario degradar sistemas autónomos, nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Falsos positivos / negativos	Obstáculos u elementos percibidos que aparecen o desparecen del ROI de forma abrupta.	Analizar la robustez de cada fuente de información. Algoritmos de aplicabilidad de falsos positivos / negativos. Analizar el tiempo continuado con la falsa detección. A partir de una tolerancia (vinculada generalmente a TTC), se debe degradar los sistemas autónomos, eliminar algunas funciones, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.
	Inconsistencia entre las percepciones de varios sensores	

Conclusiones contradictorias de la fusión sensorial	Inconsistencias en la fusión de alto nivel	Ídem al caso anterior
	Inconsistencias en la fusión de bajo nivel	Técnicas de filtrado de datos. Identificación de zonas de inconsistencias de datos y valoración de su relevancia para la formación de la conciencia situacional. En caso de incertidumbres relevantes y continuadas, se debe degradar los sistemas autónomos, eliminar algunas funciones, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.

6.3. Toma de decisiones

La toma de decisiones se deriva la formación de la conciencia situacional, por lo que las incertidumbres ocasionadas por el posicionamiento y la percepción tienen su reflejo en esta fase. Adicionalmente, el sistema debe realizar un autodiagnóstico de su funcionamiento. La Tabla 3 muestra las consideraciones a tener en cuenta en la fase de toma de decisiones.

Tabla 3: Errores en la toma de decisiones

Error	**Detección del error**	**Medidas de mitigación y /o fallback**
Mal funcionamiento del HW-SW	Detección de la no generación de órdenes de actuación.	Imprescindible eliminar funciones no operativas, devolver el control, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Incertidumbre ante falsos positivos / negativos	Error detectado en fase de percepción.	Valoración de riesgos ante falsas detecciones – valoración de incertidumbre – cálculo de TTC. Mantenimiento de margen de seguridad.
Inconsistencias en la detección (por ej. elementos de referencia)	Error detectado en fase de percepción.	Valoración de funciones que pueden seguir funcionando. Es posible la necesidad de eliminar funciones no operativas, devolver el control, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Escenario no contemplado	Comparación de conciencia situacional con ODD del sistema.	Imprescindible eliminar funciones no operativas, devolver el control, degradar el nivel de automatización o desactivarlo completamente.
Escenario dinámico con alta incertidumbre (por ejemplo, ante usuarios vulnerables)	Conocimiento a partir de la conciencia situacional.	Valoración de riesgos ante falsas detecciones – valoración de incertidumbre – cálculo de TTC. Mantenimiento de margen de seguridad.
Falta de explicabilidad de toma de decisiones	Necesario establecer algoritmos para su valoración continua.	Técnicas de explicabilidad de IA.
Maniobras no naturales del sistema autónomo	Parámetros de las maniobras (físicos, generalmente) alejados de los usuales de conducción.	Comparación de actuales de sistemas con bases de datos o patrones de conducción. Adaptación de las respuestas manteniendo el margen de seguridad de la actuación inicialmente concebida por el sistema.

6.4. Actuación

El sistema autónomo provoca acciones sobre los mismos mandos a los que tiene acceso el conductor humano, es decir, dirección, pedales, marcha engranada, etc. Las órdenes provenientes del módulo de toma de decisiones deben ser reproducidas sobre los actuadores del vehículo. La Tabla 4 identifica los errores que se pueden presentar.

Tabla 4: Errores en la actuación

Error	**Detección del error**	**Medidas de mitigación y /o fallback**
Fallo en el sistema de envío de órdenes	El sistema no recibe órdenes o señal de estar activo el procesamiento de forma continua.	Desconexión del sistema autónomo y detención del vehículo por puenteo externo al sistema de control.
No activación del modo autónomo al requerirlo el operador	Observación por parte del operador	No actuación si el vehículo no está en marcha. Continuar modo manual si está el vehículo en movimiento (aviso al operador)
No desactivación del modo autónomo cuando se requiera	Observación por parte del operador	Desconexión del sistema autónomo y detención del vehículo por puenteo externo al sistema de control si no hay actuación del operador.

Desactivación indeseada del modo autónomo	Observación por parte del operador	Toma de control por parte del operador y reactivación del modo autónomo, si es posible.
Activación indeseada del modo autónomo	Observación por parte del operador	Desconexión del sistema autónomo y detención del vehículo por puenteo externo al sistema de control si no hay actuación del operador.
Aceleración indeseada	Se detectan errores significativos entre la velocidad real y la objetivo, siendo la primera superior.	Verificación de la medida de la velocidad media mediante varios sensores embarcados. Desconexión de órdenes de aceleración y detención del vehículo.
Deceleración indeseada	Se detectan errores significativos entre la velocidad real y la objetivo, siendo la primera inferior sin causa que lo motive (presencia de obstáculos).	Verificación de la medida de la velocidad media mediante varios sensores embarcados. Verificación del motivo de la reducción de la velocidad. Si no se detecta causa, alerta al operador y detención del vehículo.
Giro indeseado	Se incrementan los errores de la posición del vehículo respecto a la trayectoria prevista	Intento de recuperar la trayectoria o detención del vehículo si no resulta posible en un periodo corto o sin colisionar con ningún elemento.

En los casos en los que el control del vehículo se puede realizar de forma remota (teleguiado) o el operador de seguridad esté fuera del vehículo, es necesario tener en cuenta, de forma adicional, condicionantes sobre la comunicación. Así, esta solución de emergencia requiere comunicaciones móviles confiables de área amplia, como la telefonía móvil (4G, 5G), que proporcionen suficiente ancho de banda sin puntos muertos a lo largo de las carreteras [26]. Por ello, es necesario definir con precisión protocolos para el caso de que el operador a distancia no responda. Además, dado que el operador a distancia se considera parte del concepto de seguridad, debería incluir además de sistemas de visión, sistemas de audio y comunicación con los ocupantes dentro y fuera del vehículo, permitiendo una interacción con todos los agentes implicados y aumentando la confiabilidad en el sistema. Debe tenerse en cuenta que el teleguiado impone condicionamientos más estrictos que en el caso del telecontrol en caso de override donde la actuación sea una frenada de emergencia, si bien en ambos casos se requiere el mantenimiento de la comunicación y la transmisión de datos con una latencia limitada. La Tabla 5 identifica estos errores.

Tabla 5: Errores en la operación remota

Error	**Detección del error**	**Medidas de mitigación y /o fallback**
Se corta la comunicación entre vehículo y operador remoto.	El sistema no recibe órdenes o señal de estar activo el procesamiento de forma continua.	Desconexión del sistema autónomo y detención del vehículo por puenteo externo al sistema de control.
Bajas condiciones en las comunicaciones.	Medida de latencia y ancho de banda	Reducción de la velocidad hasta los niveles en los que el telecontrol es posible con las características disponibles de la conexión (con posibilidad de detención del vehículo si no es viable el control).

7. Aplicaciones particulares

A continuación, se presenta el estudio de riesgos realizado sobre 3 tipologías de vehículos con características particulares que implican la adaptación de las pruebas normalizadas de verificación establecidas por la Instrucción y el estudio de riesgos.

7.1. Autobús urbano automatizado para su operación en cocheras

Aunque la circulación en modo autónomo de los autobuses urbanos en entornos reales puede encontrar numerosas dificultades en el momento actual (tecnológicos al ser escenarios de elevada complejidad, sociales en cuanto a su aceptación por parte de los usuarios, legales ante una normativa de circulación cambiante en estos momentos), sí se han identificado mejoras potenciales en la operación de estos vehículos en la zona de cocheras y talleres de forma que los vehículos puedan dirigirse de forma autónoma a diferentes puntos de aparcamiento, talleres o repostaje, dentro de la instalaciones de la compañía. Con este fin, desde INSIA-UPM se realizó la automatización de dos vehículos Gulliver LR U 520 ESP (Figura 1), incluyendo sensorización con GPS y LiDAR. El vehículo cuenta con conexión wifi con el centro de control en las instalaciones con el fin de recibir órdenes de punto de destino y para teleguiado en caso necesario.

Figura 1: Autobús urbano eléctrico automatizado

La validación del funcionamiento del vehículo incluye tanto la circulación con operador dentro del vehículo, el cual debe poder realizar override sobre todos los mandos del vehículo, como en con el operador en puesto remoto.

7.2. Vehículo tipo shuttle autónomo

El vehículo tipo shuttle analizado es propiedad de CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia). Se trata de un vehículo capaz de transportar 12 personas y su velocidad máxima es de 25 km/h (Figura 2).

Figura 2: Vehículo tipo shuttle autónomo

El vehículo cuenta con sistemas de percepción LiDAR y posicionamiento GPS para su navegación. El puesto del operador no cuenta con los mandos de operación usuales ya que está dotado de un joystick y un pedal de freno, además de ya que se plantea su funcionamiento en manual únicamente de forma puntual en zonas en las que el modo autónomo no pueda ser viable. De esta forma, se requiere la adaptación de pruebas de override de la Instrucción ya que el control del operador sobre el vehículo es limitado por lo que muchas de las respuestas ante fallos o salidas de ODD se abordan desde una reducción de velocidad o la detención del vehículo con diferentes intensidades de frenada.

Este vehículo fue el primero en España en superar las pruebas recogidas en la Instrucción 2022/07 para su circulación en vías abiertas al tráfico, sin contar con la certificación previa en otros países de la Unión Europea.

7.3. Maquina de limpieza vial automatizada

La limpieza viaria mecanizada exige la utilización y desarrollo continuo de máquinas de alto coste y mejorables en rendimiento, dentro de la infraestructura urbana y del mobiliario instalado. La posible aplicación de los sistemas de conducción autónoma a recorridos de limpieza viaria e incluso de recolección de residuos, abre un campo de gran interés técnico y seguramente económico, pudiendo abaratar los servicios además de conseguir en los mismos un mayor rendimiento y calidad e incluso y muy posiblemente mejorar la seguridad actual.

Actualmente se dispone en el servicio de barrido mecanizado de las denominadas barredoras compactas, es decir, sin chasis, autopropulsadas y dotadas de implementos y sistemas de adaptación al medio de trabajo. Se plantean varias formas de funcionamiento: con un solo operario, en este caso conductor o bien con dicho conductor en cabina y hasta tres operarios delante de la máquina, atendiendo a la captación de residuos en la vía que sitúan delante de la máquina (Figura 3).

Sobre estos equipos, una nueva generación ha llegado recientemente, con un alto potencial de impacto en el sector. Por un lado, se ha añadido, a la función de barrido, la función de baldeo, incorporando un depósito de agua y los útiles adecuados para el baldeo municipal. A este tipo de equipo se le denomina barredora dual.

Figura 3: Modo de operación con operario en cabina y en labores de limpieza

El funcionamiento previsto para la máquina de limpieza autónoma es el siguiente:

- La barredora seguirá una ruta predefinida por un conjunto de waypoints sobre una cartografía digital detallada en escenarios urbanos de muy diferente tipología.
- La máquina será capaz de detectar obstáculos en la ruta mediante sensores LiDAR y llevar a cabo maniobras de evitación de colisiones (frenado o esquiva, si es posible en la zona transitable).
- La navegación combinará posicionamiento mediante GPS, sistemas inerciales y sistemas de percepción (LiDAR en concreto). Para ello, se implementarán algoritmos de SLAM que permitan construir la cartografía digital y el posicionamiento sobre ella.
- Algunos tramos de ruta con una estructuración concreta permitirán el guiado mediante elementos de referencia precargados.
- La máquina nunca podrá superar al operario mientras siga la ruta.
- En los casos en los que no sea viable el guiado autónomo, se podrá activar el modo de seguimiento de la trayectoria del operario.
- El sistema contará con un dispositivo para el control remoto de la máquina que podrá llevar el usuario que supervise su funcionamiento. Con dicho mando, podrá controlar el guiado de la máquina, así como los auxiliares de limpieza de la misma.
- El operario-conductor puede controlar en remoto la máquina, para no depender de continuas entradas y salidas de la cabina y mantendrá siempre la capacidad de la última actuación.
- Las actuaciones de automatización de la máquina no impedirán la conducción manual de la máquina.

En este caso, aunque la máquina mantiene operativos los mandos de conducción, el operador se encuentra fuera de la cabina con un dispositivo para el control de los mandos de conducción y de elementos de limpieza. Por ello, sobre el análisis de fallos, debe contemplarse el aseguramiento de la conexión entre el sistema embarcado y el sistema remoto. En ese sentido, se introduce la condición de detención del vehículo si se pierde la señal continua de conectividad. Adicionalmente, la función follow-me no se encuentra recogida en el esquema general de análisis de riesgos y tiene influencia sobre el control longitudinal (para no sobrepasar al operador) y lateral (cuando le debe seguir en vez de tener una ruta prefijada). En tal situación, se fija la condición de detención de la máquina ante una no percepción el operario tras un tiempo tal que supondría la superación de la última ubicación detectada. En cuanto a la situación en la que el vehículo sigue la trayectoria del operario, se debe verificar el mantenimiento de la ruta dentro de un margen de error contenido por debajo de un límite admisible que permitiese recuperar la ruta objetivo. De igual forma, resulta necesario adaptar las condiciones de ensayo por la velocidad máxima limitada en operación autónoma que debe estar alrededor de 5 km/h.

8. Discusión

8.1. Consideraciones generales

A pesar de los avances regulatorios, la implementación de la conducción autónoma enfrenta desafíos importantes, debido a los múltiples escenarios de diferente complejidad. Uno de ellos es la necesidad de establecer criterios que abarquen las deficiencias en la detección y respuesta a fallos en los vehículos autónomos. Actualmente, la normativa se centra en los niveles 3-4 de autonomía. En este sentido, las condiciones de ODD son establecidas por los fabricantes, los cuales deben incluir las condiciones de fallo y las respuestas a los mismos, activando protocolos de override, donde el operador a bordo o a distancia intervenga, o permitir que el vehículo autónomo autodiagnostique y resuelva el fallo mediante una maniobra de riesgo mínimo.

En la instrucción para circulación de vehículos autónomos en pruebas no se establecen pruebas específicas de fallback en condiciones críticas, centrándose en la evaluación del override por parte del operador en condiciones nominales de funcionamiento con el fin de que tengan predominancia los controles manuales respecto a los del sistema autónomo. Sin embargo, estas actuaciones de override pueden entrar en conflicto con las medidas de fallback que se puedan implementar al vehículo.

8.2. Teleoperador y teleguiado

El concepto de teleoperación queda al margen de regulación actual, lo que representa un vacío importante en la normativa relacionada con los vehículos autónomos, a pesar de que se contempla que el operador de seguridad puede estar a bordo o fuera del vehículo. De igual forma, mientras que la situación de override permite que un operador remoto o a distancia tome el control del vehículo en casos de emergencia o fallos del sistema, la teleoperación se presenta como una modalidad distinta de funcionamiento. En este modo, los mandos de control, o al menos parte de ellos, son manejados por un operador sin que el sistema entre en modo de fallo. Este enfoque se emplea para llevar a cabo tareas complejas que no están contempladas en el dominio de diseño operativo (ODD), como servicios especializados en vehículos industriales o situaciones que requieran una intervención humana específica y en tiempo real. Sin embargo, la ausencia de una regulación específica para la teleoperación plantea desafíos importantes en términos de responsabilidad, seguridad y coordinación entre el operador y el sistema autónomo, así como aspectos técnicos que deben verificarse vinculados con las comunicaciones, muy dependientes del entorno en el que circule el vehículo y donde se ubique el teleoperador.

8.3. Influencia de la infraestructura

Las características de la infraestructura como su geometría, marcas viales, señales de tránsito y estado del pavimento, entre otras, tienen una clara influencia en la ocurrencia de desconexiones del modo autónomo [27-30]. Trabajos anteriores han analizado alternativas desde el punto de vista de la infraestructura para garantizar un riesgo mínimo en situaciones en las que el vehículo sale del ODD [31].

Por otra parte, las comunicaciones y los sistemas cooperativos también se perciben como una herramienta para proporcionar información adicional para aumentar las capacidades y el ODD de los vehículos autónomos [32]. Aunque los primeros niveles de C-ITS se centran en los sistemas de asistencia, para impactar la conducción autónoma es necesario implementar servicios del Día 2 para mejorar la calidad de la operación y compartir información de percepción y concientización [33][34]. Dentro de los servicios del Día 2 se puede incorporar información proveniente de la infraestructura en todos los dominios, que el vehículo debe interpretar para decidir si es posible mantener su ODD actual [35]. Así, en el marco del proyecto Inframix (www.inframix.eu) [36], se definieron 5 niveles de soporte digital de la instalación viaria para albergar la automatización [37], partiendo de un Nivel E de infraestructura Convencional y evolucionando hacia un Nivel A de conducción cooperativa, en el que la infraestructura pueda percibir, procesar y enviar información de guía microscópica a los vehículos, para optimizar el flujo de tráfico general. En la misma línea, [38] propone Niveles Viales Inteligentes (SRL).

De esta forma, parece clara que la valoración de riesgos de un vehículo automatizado no puede estar al margen de las características de la infraestructura, tanto por la complejidad o dificultades que ésta pueda implicar, como por el soporte que podría proveer.

9. Conclusiones

El desarrollo de pruebas de vehículos automatizados en condiciones reales resulta esencial para la evolución de la tecnología. Sin embargo, esa operación no está exenta de riesgos, que deben minimizarse, tanto para el propio vehículo autónomo como para el resto de los usuarios que comparten con él la vía. En ese sentido, se hace necesario la definición de una normativa que permita verificar la seguridad y robustez de los sistemas, la cual debe ser completa pero flexible. Por ello, sobre la aplicación a casos concretos de la normativa actual se ha estudiado las limitaciones y puntos de mejora y concreción de esta reglamentación con el fin de complementar las iniciativas que se están realizando a nivel nacional e internacional.

En cuanto a la detección de errores y situaciones críticas, la normativa actual aborda de una forma muy amplia y poco específica cómo detectarse elementos que puedan desencadenar situaciones críticas, cuya presencia repentina pueda dar lugar a la aparición de peatones en la vía. Esta falta de precisión puede comprometer la seguridad del sistema, especialmente en entornos dinámicos y cambiantes, como zonas de esparcimiento o áreas con una alta densidad de peatones. Por otra parte, la normativa debe ser lo suficientemente flexible para permitir el avance tecnológico.

Por último, la normativa actual se centra fundamentalmente en el concepto de vehículo autónomo, pero no tanto en el concepto más avanzado y global de conducción autónoma, conectada y cooperativa con implicaciones particulares, tanto a nivel tecnológico como en su influencia para la circulación, aun cuando los vehículos no sean autónomos sino simplemente cuenten con funcionalidades cooperativas.

10. Agradecimientos

Los resultados de este artículo forman parte del proyecto PID2022-140554OB-C31 financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033/ y FEDER 'Una manera de hacer Europa' y de los trabajos desarrollados en el marco de la Cátedra Universidad-Empresa de Transición Energética de la Fundación Repsol con la Universidad Politécnica de Madrid.

11. Referencias

[1] ANFAC, *Barómetro Vehículo Autónomo y Conectado*. (2024).

[2] SAE. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE International, On-Road Automated Driving (ORAD) Committee (2021).

[3] Yu, J., Luo, F. "Fallback Strategy for Level 4+ Automated Driving System", *Actas del IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 156-162, (2019)

[4] Parekh, D., Poddar, N., Rajpurkar, A., Chahal, M., Kumar, N., Joshi, G. P., Cho, W. "A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges" *Electronics* **11(14)**, 2162, (2022)

[5] Colwell, I. "Runtime Restriction of the Operational Design Domain: A Safety Concept for Automated Vehicles", PhD Thesis, UWSpace. (2018)

[6] Chen, C., Liu, Z., Wan, S., Luan, J., Pei, Q. "Traffic flow prediction based on deep learning in Internet of Vehicles". *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, **22(6).** (2020)

[7] Petrovai, A., Nedevschi, S. "Semantic Cameras for 360-Degree Environment Perception in Automated Urban Driving". *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, **23(10)**. (2022)

[8] Feng, D., Harakeh, A., Waslander, S. L., Dietmayer, K. "A Review and Comparative Study on Probabilistic Object Detection in Autonomous Driving", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23(8)**, 9961-9980. (2022)

[9] Abid, A., Khan, M. T., de Silva, C. W. "Fault detection in mobile robots using sensor fusion", *Actas del 10th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, Cambridge, UK, 8-13, (2015)

[10] Frolik, J., Abdelrahman, M., Kandasamy, P. "A confidence-based approach to the self-validation, fusion and reconstruction of quasi-redundant sensor data". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **50(6)**, 1761-1769, (2001)

[11] Thorn, E., Kimmel, S., Chaka, M. *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*, DOT HS 812 623, US Department of Transportation. (2018)

[12] Reschka, A. "Safety Concept for Autonomous Vehicles". In: Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B., Winner, H. (eds) *Autonomous Driving*. Springer, Berlin, Heidelberg. (2016).

[13] Emzivat *et al*, "Dynamic Driving Task Fallback for an Automated Driving System whose Ability to Monitor the Driving Environment has been Compromised". *Actas del IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* Redondo Beach, California, USA (2017)

[14] Xue, W. *et al.* "An adaptive model predictive approach for automated vehicle control in fallback procedure based on virtual vehicle scheme", *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, **2(2)**, 67-77, (2019)

[15] Pérez-Moreno E. *et al*. "Perceived risk and acceptance of automated vehicles users to unexpected hazard situations in real driving conditions". *Behaviour & Information Technology*. Pendiente de publicación

[16] Xu, Z. *et al*. "What drives people to accept automated vehicles? Findings from a field experiment". *Transportation Research Part C* **95**, 320–334, (2018)

[17] Liu, P. *et al*. "Road tests of self-driving vehicles: Affective and cognitive pathways in acceptance formation". *Transportation Research Part A* **124**, 354–369, (2019)

[18] Molina, N. *et al*. "Impressions after an automated mobility experience: An acceptance study". *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour* **81**, 27–40, (2021)

[19] Pascale, M. T. *et al*. "Passengers' acceptance and perceptions of risk while riding in an automated vehicle on open, public roads". *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour* **83**, 274–290, (2021)

[20] Real Decreto XXX/YYY, de XX de YY, por el que se modifican el Reglamento General de Circulación, aprobado por Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre y el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, en materia de conducción automatizada. Borrador de 2024

[21] Reglamento (UE) 2019/2144 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2019, relativo a los requisitos de homologación de tipo de los vehículos de motor y de sus remolques, así como de los sistemas, componentes y unidades técnicas independientes destinados a esos vehículos, en lo que respecta a su seguridad general y a la protección de los ocupantes de los vehículos y de los usuarios vulnerables de la vía pública, por el que se modifica el Reglamento (UE) 2018/858 del Parlamento Europeo y del Consejo (2019)

[22] Reglamento (UE) 2022/1426 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de agosto de 2022, en cuanto a los procedimientos uniforme y las especificaciones técnicas para la homologación de tipo del sistema de conduccion automatizada (ADS) de los vehículos totalmente automatizados. Diario Oficial de la Unión Europea, L 221, 1-64. (2022)

[23] Dirección General de Tráfico. "Instrucción VEH 15/V-113. Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general". Ministerio del Interior, Madrid. (2015).

[24] Dirección General de Tráfico. Instrucción VEH 2022/07. "Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general". Ministerio del Interior, Madrid. (2022).

[25] Fuerstenberg, K.Ch., Baraud, P., Caporaletti, G., Citelli, S., Eitan, Z., Lages, U., Lavergne, C., "Development of a pre-crash sensorial system – the CHAMELEON project". *Actas del VDI/VW Congress Vehicle Concepts for the 2nd Century of Automotive Technology*, Wolfsburg, Germany, (2001).

[26] Acharya, S. *et al.* "Network Emulation For Tele-driving Application Development". *Actas del International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, Bangalore, India, 109-110. (2021)

[27] Garcia, A., Llopis-Castello, D., Camacho-Torregrosa, F. "Influence of the design of crest vertical curves on automated driving experience". *Actas del Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Washington, DC, USA, (2019)

[28] García, A., Camacho-Torregrosa, F.J., Baez, P.V.P. "Examining the effect of road horizontal alignment on the speed of semi-automated vehicles". *Accident Analysis & Prevention*, **146**, 105732. (2020)

[29] Marr, J., Benjamin, S., Zhang, A. *Implications of pavement markings for machine vision*. Austroads, Ltd., Sidney, Australia. (2020).

[30] Ye, X., Wang, X., Liu, S., Tarko, A.P. "Feasibility study of highway alignment design controls for autonomous vehicles". *Accident Analysis & Prevention*, **159**, 106252. (2021).

[31] García, A., Camacho-Torregrosa, F. J., Llopis-Castelló, D. "Minimal Risk Conditions for High-Level Connected and Automated Vehicles". *Actas del 6th International Symposium on Highway Geometric Design*. Amsterdam, The Netherlands. (2022)

[32] C-ITS Platform. *Final report Phase II*. (2017)

[33] Elhenawy, M., Bond, A., Rakotonirainy, A. "C-ITS Safety Evaluation Methodology based on Cooperative Awareness Messages", *Actas del 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA. (2018)

[34] Vantomme, J. "Cooperative, Connected and Automated Mobility. Quo Vadis?, Challenges for the automotive industry", *Actas del ACEA, PZPM Conference*, Warsaw, (2018).

[35] Linget, T. *C-V2X Use Cases and Service Level Requirements Volume II*, 5GAA Automotive Association, Technical Report. (2021)

[36] Proyecto Inframix (www.inframix.eu)

[37] Carreras, A., Daura, X., Erhart, J., Ruehrup, S. (2018). "Road infrastructure support levels for automated driving". *Actas del 25th ITS World Congress*. Copenhagen, Dinamarca, (2018)

[38] García, A., Camacho-Torregrosa, F. J., Llopis-Castelló, D., Monserrat, J. F. *Smart Roads Classification. Special Project*. World Road Association – PIARC. Paris. (2021)