

Características de la infraestructura que pueden favorecer la conducción asistida y automatizada

Infrastructure Characteristics that Can Facilitate Assisted and Automated Driving

Jesús María Leal Bermejo^{1*}

Resumen

En este artículo se van a exponer las características y equipamientos que debe poseer la carretera para favorecer las funciones de conducción asistida e incluso para posibilitar la conducción automatizada. Para ello se comienza describiendo los sensores de los que disponen los vehículos para llevar a cabo las funciones de conducción automatizada. Después se pasa a enumerar los factores de la infraestructura que influyen en el buen funcionamiento de los sistemas de asistencia al conductor, principalmente los aspectos relativos a las marcas viales y a las señales verticales, exponiendo luego los niveles de prestaciones que deberían alcanzar estos equipamientos, así como ciertas características que deberían poseer para potenciar la conducción autónoma. Por último, se exponen algunas tendencias futuras sobre la manera en que puede afectar la existencia de vehículos automatizados al tráfico y a la seguridad vial, esbozando algunas actuaciones sobre la infraestructura para tratar de solucionar los problemas que podrían surgir.

Palabras clave: vehículo autónomo, vehículo conectado, conducción automatizada, conducción asistida, ADAS, ITS .

Abstract

This article deals with the characteristics and equipment that roads must have in order to facilitate assisted driving functions and, even, to enable automated driving. With this aim, it starts by describing which sensors are available to vehicles to perform automated driving functions. Then, infrastructure factors that have an influence on the appropriate performance of driver assistance systems are listed, mainly the aspects related to road marking and traffic signs. After that, it explains the performance standards that this equipment should achieve, as well as certain characteristics that pavement markings and road signs should have in order to enhance autonomous driving. Finally, some future trends are presented on how automated vehicles can affect traffic and road safety, outlining some infrastructure measures to solve the problems that could arise.

Keywords: autonomous vehicle, connected vehicle, automated driving, assisted driving, ADAS, ITS.

INTRODUCCIÓN

Parece claro que la mayor parte de los vehículos nuevos van a estar equipados en los próximos años con dispositivos que se pueden englobar dentro de lo que se denomina como **sistemas avanzados de ayuda al conductor**, más conocidos por sus siglas en inglés **ADAS** (*Advanced Driver Assistance Systems*), que entre otras funciones de muy diverso tipo (información de tráfico, aviso de colisión, adaptación inteligente de velocidad, aviso de salida de carril, visión nocturna), pueden captar e interpretar las marcas viales y las señales verticales.

Estos sistemas ADAS o de “conducción asistida” constituyen un paso previo hacia la “conducción automatizada”, que permitirá que el vehículo, ya sea conectado o de forma autónoma, pueda moverse por la red viaria sin la acción del conductor humano.

En este proceso hacia la consecución de los niveles más altos de automatización, se ha de tener en cuenta que las características de la infraestructura juegan un papel relevante de cara a la implantación efectiva de estas tecnologías. De hecho, parece que ciertas características o condiciones de la carretera y sus equipamientos pueden constituir un cierto obstáculo a la implementación de los sistemas de conducción automatizada, en el sentido de que la combinación de una conservación inadecuada de la red viaria junto con las diferencias en las regulaciones nacionales para algunos equipamientos como las marcas viales y las señales verticales de tráfico, que son fundamentales para estas funciones, están retrasando en cierto modo una aplicación más amplia de estos sistemas. Por ello, es preciso abordar estas cuestiones con el objetivo de facilitar, desde la parte de la infraestructura, la automatización de la circulación.

Esto se debe a que estos sistemas actuales de ayuda al conductor y de conducción parcialmente automatizada llevan a cabo su función “leyendo” las señales verticales y las marcas viales, así como recibiendo información del tráfico y de las condiciones en la carretera a través de sistemas de información del tráfico basados en las redes de telefonía móvil.

* Mail: Jesus.Leal@cedex.es

¹ Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

Se ha identificado que la adopción completa de los sistemas de conducción automatizada se deberá realizar a través de:

- La legibilidad de la infraestructura física, especialmente de las señales verticales y las marcas viales
- Una infraestructura digital, incluyendo la cobertura de la red de telefonía móvil
- La disposición de unos datos clave de tipo operacional y de explotación.

Este artículo pretende proporcionar una serie de indicaciones sobre las características que debería tener la infraestructura para que los sensores a bordo de los vehículos puedan interpretarla correctamente con el objetivo de posibilitar una conducción automatizada. Para ello, se describirán los sensores que llevan incorporados los vehículos automatizados, y se explicará cómo afectan las diferentes características de las marcas viales y las señales verticales a las funciones de conducción automatizada.

1. NIVELES Y FUNCIONES DE AUTOMATIZACIÓN EN LOS VEHÍCULOS

En el proceso de desarrollo entre los vehículos convencionales, en los cuales todas las tareas de conducción recaen sobre el conductor humano, y el vehículo totalmente automatizado, que no necesitará la presencia de un conductor, existen una serie de fases o niveles intermedios de automatización parcial, que son los que aparecen descritos en la tabla 1, elaborada por la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE).

Tabla 1. Niveles de automatización de los vehículos

Nivel	Grado de automatización	Descripción
1	Asistencia al conductor	El vehículo controla la velocidad o la dirección mientras que el conductor humano realiza todos los aspectos restantes de la tarea de conducción, vigilando el tráfico y controlando el vehículo en cualquier situación
2	Automatización parcial	El vehículo controla la velocidad y la dirección mientras que el conductor humano realiza todos los aspectos restantes de la tarea de conducción, vigilando el tráfico y controlando el vehículo en cualquier situación
3	Automatización condicionada	El sistema toma el control longitudinal y lateral del movimiento del coche, pero el conductor humano tiene que vigilar permanentemente el entorno y el sistema, para poder retomar el control del vehículo en cualquier situación
4	Automatización alta	El sistema toma el control longitudinal y lateral del movimiento del coche en una situación predefinida y ya no es necesario que el conductor humano supervise permanentemente el sistema. En caso necesario, el conductor recibirá el aviso para retomar el control del vehículo con suficiente margen de tiempo
5	Automatización completa	El sistema toma el control longitudinal y lateral del movimiento del coche en todas las situaciones, y no es necesario que el conductor humano supervise el entorno o el sistema ni que retome el control del vehículo

Fuente: Jiménez Alonso, F. (2017). Retos tecnológicos en el desarrollo e implantación del vehículo autónomo y conectado, *Carreteras*, nº 173.

Como se puede ver en la tabla 1, según se va subiendo de nivel, el vehículo tiene unas mayores capacidades de automatización, hasta llegar a la automatización completa. Además de los niveles expuestos, a veces se incluye también el “nivel 0”, para denotar a los vehículos que no llevan ninguna función de automatización, que incluiría a los vehículos convencionales. En cada uno de los niveles, existe una serie de funciones características de automatización o de asistencia o ayuda a la conducción, algunas plenamente operativas en la actualidad, entre las cuales podemos citar:

- **Sistemas de aviso de salida de carril (LDW -Lane Departure Warning-) y de ayuda al mantenimiento en el carril (LKA -Lane Keeping Assistance-).** El primero de estos sistemas puede leer las marcas viales de la carretera y dar un aviso visual (véase la foto 1), acústico o táctil si el vehículo cruza las marcas viales sin haberlo señalado (es decir, sin dar el intermitente). En ese caso, el conductor siente como si estuviera conduciendo sobre una banda sonora, aunque esta banda no exista. El sistema de Ayuda al mantenimiento en el carril, además del aviso, proporciona al conductor algún apoyo o asistencia sobre la dirección del vehículo.

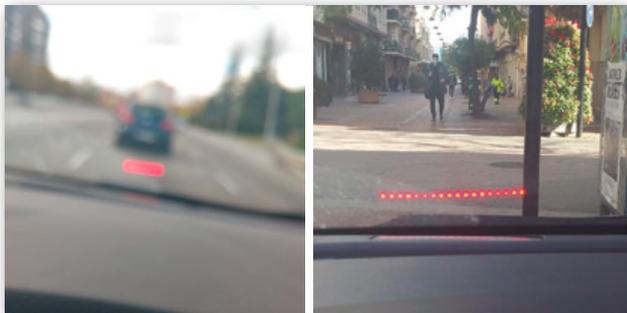


Fotos 1 y 2. Sistemas de aviso de salida de carril y de reconocimiento de señales de circulación, que aparecen en el centro del velocímetro del automóvil. El aviso del sistema de salida de carril muestra la figura del coche entre dos líneas, que representan las marcas viales de carril, que cambian de color si el vehículo se aproxima a las marcas viales que lo delimitan.

- **Reconocimiento de las señales verticales de circulación (TSR -Traffic Sign Recognition).** Se trata de sistemas a bordo de los vehículos que pueden leer e interpretar un cierto abanico de señales verticales de tráfico, incluyendo las de límites de velocidad (véanse las fotos 1 y 2).
- **Sistema de asistencia de pre-colisión.** Consiste en que si el vehículo se aproxima rápidamente a otro vehículo parado, a un vehículo que circula en la misma dirección a menor velocidad o a una persona que se cruza en su trayectoria, el sistema está diseñado para proporcionar (dependiendo de los niveles programados de funcionamiento) un aviso (véanse las fotos 3 y 4), una asistencia a la frenada o, directamente, un frenado activo.

Hay que decir que los sistemas que se acaban de describir, que ya vienen de serie en muchos de los vehículos nuevos, se situarían entre el nivel 2 y el 3 de automatización (por ejemplo, el sistema de ayuda al mantenimiento de

carril entraría dentro del nivel 3, pues ya asume el control de la dirección del vehículo cuando éste cruza las marcas viales que delimitan los carriles). Estos sistemas constituyen un complemento a los ojos del conductor, advirtiéndole y guiándole, haciendo la tarea de la conducción más cómoda y segura.



Fotos 3 y 4. Sistema de aviso de pre-colisión, que proporciona al conductor una alarma visual consistente en una o varias luces rojas que se proyectan sobre el parabrisas del vehículo (para que el conductor no tenga que desviar la mirada de la carretera) cuando se detecta un vehículo o un obstáculo situado muy cerca.

2. SISTEMAS DE LOS QUE DISPONE EL VEHÍCULO PARA CONOCER SU ENTORNO

2.1. Datos que necesitan las funciones de conducción automatizada

Cuando los seres humanos conducen, perciben continuamente los límites de la carretera, las marcas viales y la textura del pavimento, entre otras muchas cosas. Los límites de la calzada están diseñados para ser visibles por los conductores humanos en todas las condiciones de conducción. Por tanto, parece razonable que los sistemas de visión de los vehículos se beneficien de considerar las mismas pistas perceptibles que los humanos.

En una encuesta realizada por Austroads a los fabricantes de la industria de la automoción sobre qué datos y características de la infraestructura física de la carretera eran más importantes para la conducción asistida (*hands-on*) y para la conducción automatizada (*hands-off*), las respuestas fueron:

Para la conducción asistida, los datos clave incluían:

- El marcado vial, incluyendo los tipos de línea, la calidad de las líneas y los radios de las curvas.
- Las posiciones y los tipos de las señales verticales de tráfico.

Para la conducción automatizada, se ampliaron los datos clave para incluir:

- los mapas de alta definición
- la conectividad de datos (telefonía móvil, comunicaciones dedicadas de onda corta -DSRC-)

En efecto, según estudios realizados sobre este tema, los vehículos altamente automatizados deberán utilizar datos tanto de los mapas digitales como de los sensores. Sin embargo, algunos vehículos con unos niveles bajos de

automatización (N1 y N2, según la sociedad de ingenieros de automoción (SAE)) puede que usen sólo datos de los sensores.

Se utilizan sensores de diferentes tipos en la conducción asistida y automatizada. Los encargados de los desarrollos trabajan sobre un amplio abanico de tecnologías para asegurar que las limitaciones de un cierto tipo de sensor sean cubiertas por un sensor de otra tecnología. Esto proporciona también un nivel de seguridad contra cualquier interferencia maliciosa sobre el vehículo.

En general, se puede decir que los datos de los sensores a bordo de los vehículos provienen de una combinación de **sensores de visión artificial, radar y LiDAR**. También pueden provenir a través de otra red sensorística extendida: los datos de otros vehículos conectados C-ITS (datos V2V -vehículo a vehículo-) y datos de la carretera (datos I2V). Esta información de los sensores se procesa a bordo del vehículo mediante unos programas que elaboran un plan y una actuación sobre, por ejemplo, dónde está la marca vial de carril, la posición de un peatón o la fase actual de un semáforo.

Hay que resaltar que existe una diferencia importante en el empleo de los datos de los sensores entre la conducción automatizada y la conducción asistida. En la **conducción automatizada**, el vehículo busca generalmente construir un modelo de percepción único, completo e integral de su entorno. Sin embargo, en la **conducción asistida**, las funciones pueden operar de forma independiente. Esto significa que, por ejemplo, un sistema de reconocimiento de señales verticales basado en el tratamiento de imágenes provenientes de cámaras puede funcionar de forma completamente independiente de un sistema de ayuda al mantenimiento en el carril basado también en cámaras.

2.2. Tecnologías a bordo del vehículo para el guiado de carril

A continuación, se presentan varias de las tecnologías más comunes de las que disponen los diferentes fabricantes para abordar funciones como el guiado de carril y el mantenimiento en el carril.

Se puede decir que la visión artificial es el área más importante de investigación para las funciones basadas en el aprendizaje automatizado para el guiado de carril, pues las señales verticales y las marcas viales están hechas para la visión humana. Los sensores de visión artificial proporcionan una estimación de la posición correcta del vehículo sobre la carretera sin necesidad de otros sistemas de sensores. Sin embargo, hay situaciones en las que los sensores de visión no pueden funcionar bien, tales como las condiciones meteorológicas extremas o cuando se conduce fuera de una carretera, en las que para conseguir una mejor estimación del posicionamiento se puede utilizar una fusión de los sensores de visión con otros sensores o sistemas.

Entre estos se pueden citar el LiDAR (*LASER Imaging Detection and Ranging*) y la correspondencia por mapa digital (*Map Matching*), que constituyen unos complementos para lograr unos modos de conducción altamente automatizada. El aspecto más crítico actualmente, que ningún fabricante ha superado (con un *hardware* que sea rentable), es el impacto del “deslumbramiento” que se produce cuando una fuente de luz fuerte y directa inunda el sensor (al igual que ocurre con cualquier ser humano).



Foto 5. Vista de la cámara del sistema de visión artificial instalada en la parrilla delantera del vehículo.

2.2.1. Visión artificial

Se considera que la visión artificial es la capacidad de una máquina (por medio de sensores y de un subsiguiente procesamiento matemático por ordenador) para obtener información sobre el entorno circundante para un ulterior tratamiento analítico.

Mientras que el LiDAR y el radar son utilizados principalmente para detección de obstáculos, la visión artificial se utiliza en su mayor parte para la detección de las marcas viales del pavimento, lo que permite proporcionar una posición coherente en el carril. La visión artificial registra, procesa e interpreta las imágenes para obtener una información que pueda utilizar el vehículo.

Los sistemas de tratamiento de imágenes procesan una gran cantidad de información en tiempo real. Normalmente comienzan recortando el área disponible, quedándose sólo con el “área de interés”, que se establece en función de la velocidad del vehículo. Esta imagen es descompuesta en matrices, a la que se aplican diversos algoritmos para tratar de distinguir dónde se encuentran los bordes de las diferentes texturas, comparando píxeles adyacentes. A continuación, se debe realizar un filtrado y una formación de clusters según la intensidad luminosa reflejada, para detectar una marca vial aunque no esté muy bien conservada o zonas de sombra. A partir de la imagen visualizada, se suele emplear una restitución cónica inversa que permite representar en un plano la imagen captada por la cámara. Es sobre esta imagen, sobre la que trabajan diversos algoritmos para distinguir la información de los bordes de las marcas viales.

La detección del carril (o posicionamiento a nivel de carril) es crucial para las aplicaciones de asistencia en el mantenimiento en el carril, y también ayuda en la conducción automatizada en general. Los sistemas actuales de guiado de carril utilizan la visión artificial debido a su relativamente barata instalación y prevalencia. Por otro lado, parece que los fabricantes de los vehículos están desarrollando sus aplicaciones de ayuda al mantenimiento en el carril ajustándose a los estándares actuales de marcado vial.

Limitaciones de la visión artificial. Es importante resaltar que las funciones de ayuda al mantenimiento de carril se hacen para conseguir una conducción más segura, no para sustituir a un conductor humano desatento. La visión artificial que posibilita la función de ayuda al mantenimiento en el carril se ve afectada por:

- la visibilidad de las marcas viales
- los radios de curva pequeños

- las velocidades bajas
- una fuerte precipitación
- la iluminación
- el marcado vial temporal en zonas de obras
- un contraste reducido entre la superficie del pavimento y las marcas viales.

A la inversa, las condiciones ideales que permitirían identificar con un alto nivel de confianza (cerca del 100 %) las marcas viales que se ajustan a las normas serían:

- carretera abierta con clara visibilidad de la carretera que tiene por delante
- sol alto directo con niebla despreciable
- condiciones meteorológicas ideales, sin nubes y carretera seca, sin lámina de agua o de nieve
- condiciones ideales de la superficie del pavimento, sin escombros o marcas viales antiguas que puedan engañar al sistema de visión artificial.

2.2.2 Radar

El radar utiliza la energía de microondas, que es focalizada hacia un área de la carretera para detectar los obstáculos (frecuentemente otros vehículos). Cuando un obstáculo se interpone en el haz de ondas emitido, la energía es reflejada de vuelta a una unidad sensora (antena) con una frecuencia diferente. El detector capta esta variación de la frecuencia, que, basándose en el efecto Doppler, permite inferir la existencia de ese obstáculo.

Actualmente, los sensores de radar son muy utilizados en los vehículos automatizados (véase la figura 1), como complemento a las cámaras de visión artificial para la detección de obstáculos. Su campo de percepción es largo pero estrecho.



Figura 1. Detección de obstáculos mediante radar (Fuente: Shutterstock).



Foto 6. Vista del sensor de radar de un vehículo, situado arriba a la derecha de la matrícula.



Foto 7. Sistema de detección y aviso de un vehículo situado en el ángulo muerto, proyectándose en el espejo retrovisor la figura esquemática de los dos vehículos (arriba en el centro) que se acercan.

2.2.3. *LiDAR-Laser Imaging Detection and Ranging- (Detección y medición mediante láser)*

El LiDAR es una modalidad que ha sido ampliamente utilizada para desarrollar vehículos altamente automatizados para propósitos de investigación. Esta técnica mide el entorno que rodea al vehículo en tres dimensiones. El LiDAR es un sistema que emite impulsos luminosos y mide el tiempo que tardan en volver. Se trata por tanto de una fuente activa de luz, y, a diferencia de la visión artificial, no depende de una fuerte iluminación natural.

Los sensores LiDAR se comportan bien en ciertas situaciones, por ejemplo, para detectar los límites de la carretera en zonas interurbanas, pero no se ajustan bien para la detección de las marcas viales de carril, sobre todo en vías de varios carriles sin datos de visión artificial. El LiDAR crea mapas tridimensionales de puntos y pueden tener dificultades en detectar con rapidez las marcas viales del pavimento.

Un inconveniente significativo de esta tecnología es que los sensores son todavía muy caros, por lo que no está muy extendido su uso en los vehículos normales.

2.3. Infraestructura digital: comunicaciones y mapas

Con los sensores embarcados anteriormente descritos, el horizonte visual del vehículo vendrá limitado por el campo de percepción de esos sensores, que aunque en algunos casos pueden mejorar algo la percepción del conductor (por ejemplo, para la detección de ángulos muertos), en otros está más limitado que el alcance visual del propio conductor.

Por ello, cuando el vehículo dispone de funciones que tienden a una conducción automatizada, es necesario el empleo del posicionamiento y de mapas digitales como sensor secundario, además de los sensores embarcados en el vehículo.

Comunicaciones de datos. Mediante la transmisión de datos, tanto con otros vehículos como con la infraestructura, cada vehículo puede conocer la posición de todos los demás, así como ciertas características o eventos relativos a la carretera (presencia de accidentes, congestiones, obras, etc). Si se pretende que el vehículo pueda reaccionar en tiempo real ante cualquier circunstancia, es deseable que haya una comunicación continua de datos de nivel 4G o superior, y para soportar la conducción automatizada será necesario disponer del nivel 5G.

Para la conducción asistida, habría una mayor tolerancia de cobertura intermitente. Existe un cierto interés en que se desplieguen unidades de comunicación en el entorno de la carretera para proporcionar cobertura a los servicios basados en C-ITS (sistemas cooperativos).

Mapas digitales. Son cada vez más precisos y detallados, con prestaciones que van más allá de las destinadas únicamente a la navegación. Además, estos mapas tienen unas exigencias cada vez más altas, pues deben permitir posicionar al vehículo al nivel de carril y soportar también funciones de seguridad.

El desafío actual es que todavía no se dispone de una cobertura completa con estos mapas digitales de alta definición, sobre todo en carreteras con bajo volumen de tráfico. Por otro lado, existe el problema de la dificultad de realizar la actualización continua del mapa a las condiciones reales, que van cambiando con elevada frecuencia.

Acceso a los datos de la administración de carreteras. Algunos de estos datos, normalmente de tipo operacional y de explotación viaria, tienen gran importancia, y pueden ser proporcionados por los operadores de las carreteras o por los suministradores de mapas. Los datos más

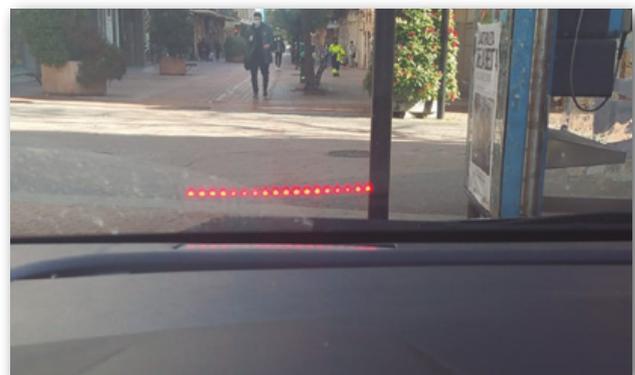


Foto 8. Sistema de aviso de salida de carril y de reconocimiento de señales (en este caso se muestran una señal de prohibido adelantar y otra de velocidad máxima permitida de 90 km/h).

buscados suelen ser principalmente los relativos a condiciones temporales o variables, tales como los límites de velocidad variables, los riesgos de la carretera o los vehículos de emergencia u obras en la vía.

3. INFLUENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA EN LA CONDUCCIÓN ASISTIDA Y EN LA CONDUCCIÓN AUTOMATIZADA

En este epígrafe se van a exponer cuáles son las características de la infraestructura, principalmente de las marcas viales y de las señales verticales, que pueden ayudar y/o favorecer un rendimiento adecuado de los sistemas de ayuda al conductor y de los de conducción automatizada.

Para ello, es preciso explicar las características que definen la visibilidad de las marcas viales y de las señales verticales para el observador (conductor) humano, pues los sistemas de visión artificial a bordo de los vehículos automatizados utilizan esas mismas características para “leer” esos elementos en la carretera.

3.1. Visibilidad de las marcas viales para un observador humano

En la Norma Europea UNE-EN 1436 “Materiales para señalización horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada y métodos de ensayo”, se especifican las prestaciones que proporcionan a los usuarios de la carretera las marcas viales blancas y amarillas a través de las siguientes características:

- su reflexión bajo iluminación diurna o alumbrado público, que expresa cuánto se resalta la marca vial respecto a la carretera
- su retrorreflexión bajo iluminación de los faros de un vehículo, que indica la cantidad de luz proveniente de los faros que es reflejada de vuelta al conductor
- su color y
- su resistencia al deslizamiento.

En esta norma se especifican unos requisitos, expresados por diferentes parámetros, que representan los diversos aspectos del comportamiento de las marcas viales durante su vida útil.

Cuando un vehículo circula con luz diurna, se considera que lo hace con una luz difusa, pues los rayos luminosos provienen de todas las direcciones y al incidir sobre el pavimento o sobre las marcas viales se reflejan también en todas las direcciones, que es lo que percibe el conductor.

Para denotar la visibilidad de una marca vial en estas condiciones diurnas, se utiliza el coeficiente de luminancia en iluminación difusa Q_d , que en función de la clase de la marca vial, debe alcanzar a lo largo de su vida útil los valores que se reflejan en la tabla 2. Como se puede ver, se establecen una serie de clases diferentes en función del tipo de pavimento (bituminoso o de hormigón) en que está instalada la marca, pues la visibilidad diurna de una marca vial depende de la relación de contraste entre la marca vial y el pavimento que la rodea.

Tabla 2. Norma UNE-EN 1436. Clases y valores mínimos del coeficiente de luminancia en iluminación difusa Q_d para marcas viales de color blanco en seco

Tipo de pavimento	Clase	Valor mínimo de Q_d (mcd·m ² ·lux ⁻¹)
Asfáltico	Q0	Valor no requerido
	Q2	$Q_d \geq 100$
	Q3	$Q_d \geq 130$
	Q4	$Q_d \geq 160$
	Q5	$Q_d \geq 200$
Hormigón de cemento	Q0	Valor no requerido
	Q3	$Q_d \geq 130$
	Q4	$Q_d \geq 160$
	Q5	$Q_d \geq 200$

Para la medida de la retrorreflexión bajo iluminación de los faros de un vehículo, que son las condiciones en las que percibe la marca vial un conductor cuando circula de noche por una carretera interurbana sin alumbrado público, se emplea el coeficiente de luminancia retrorreflejada R_L medido en la dirección del tráfico, debiendo ajustarse las marcas viales a los valores especificados en la tabla 3 para marcas viales en seco y en la tabla 4 para marcas viales en condiciones de humedad.

Tabla 3. Norma UNE-EN 1436. Clases y valores mínimos del coeficiente de luminancia retrorreflejada R_L para marcas viales permanentes de color blanco en seco

Color	Clase	Valor mínimo de R_L (mcd·m ² ·lux ⁻¹)
Blanco	R0	Valor no requerido
	R2	$R_L \geq 100$
	R3	$R_L \geq 150$
	R4	$R_L \geq 200$
	R5	$R_L \geq 300$

Tabla 4. Norma UNE-EN 1436. Clases y valores mínimos del coeficiente de luminancia retrorreflejada R_L para marcas viales en condiciones de humedad

Condiciones de humedad	Clase	Valor mínimo de R_L (mcd·m ² ·lux ⁻¹)
Se alcanzan tras verter agua sobre la superficie y se deja transcurrir 1 min	RW0	Valor no requerido
	RW1	$R_L \geq 25$
	RW2	$R_L \geq 35$
	RW3	$R_L \geq 50$
	RW4	$R_L \geq 75$
	RW5	$R_L \geq 100$
	RW6	$R_L \geq 150$

Para que sirva como referencia, el nivel de comportamiento mínimo que se exige para las marcas viales en la Red de Carreteras del Estado, de acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), Parte 7ª. “Señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos”, es el siguiente:

Visibilidad diurna

- la clase Q2 en pavimentos bituminosos
- la clase Q3 en pavimentos de hormigón

Visibilidad nocturna

- en seco: clase R3
- en húmedo: clase RW2

3.2. Estudios internacionales sobre la influencia de la infraestructura en la conducción asistida y en la conducción automatizada

La publicación básica y ampliamente reconocida en este campo es un informe realizado en 2013 por **EuroRAP** (*European Road Assessment Programme*) y **EuroNCAP** (*European New Car Assessment Programme*), titulado “**Roads that Cars Can Read**” (“Carreteras que los coches pueden leer”), que fue actualizado en 2018. Este informe se basa en un proceso consultivo que comenzó varios años antes.

En el citado informe se consideran tanto las marcas viales como las señales verticales. No obstante, las recomendaciones para marcas viales son mucho más específicas y claras que para las señales verticales.

Los objetivos del estudio que se acometió para realizar este informe fueron:

- Investigar cuál sería la mejor configuración y mantenimiento de las marcas viales longitudinales y de delimitación de los carriles para asegurar su mejor vida de servicio.
- Determinar el nivel de mantenimiento requerido para respaldar las funciones de visión artificial y de guiado de carril.

3.2.1. Influencia de la señalización horizontal

Durante el proceso consultivo, los fabricantes de los vehículos identificaron y priorizaron los factores que, con un impacto alto, medio y bajo, podrían afectar de forma adversa al funcionamiento y resultados de los sistemas de guiado de carril. Esta identificación de los factores de alto impacto explica el fuerte enfoque del informe en establecer un estándar de prestaciones para la calidad del marcado vial.

- **Factores con impacto alto:** el estado de la superficie varía, por ejemplo, si está mojada o con hielo; marcas desgastadas, múltiples marcas viales confusas. antiguas marcas viales no borradas completamente.
- **Factores con impacto medio:** pendiente de la calzada, curvatura, límites entre varios carriles.
- **Factores con impacto bajo:** la anchura de carril, esto es, demasiado estrecho o demasiado ancho; la visibilidad, por ejemplo, la niebla.

Aunque estos son los resultados que aparecen en el informe *Roads that Cars Can Read*, el estándar de calidad del marcado vial fue determinado por la Federación Europea de Carreteras (European Road Federation -ERF-) y está en la línea de ciertos niveles especificados en la Norma Europea de EN 1436. De hecho, la ERF declara que, dado que esos requisitos ya están vigentes en algunos países de la UE, su propuesta es “realista, viable técnicamente y rentable”.

Los requisitos establecidos por la ERF para un nivel mínimo de funcionamiento son:

- En condiciones de pavimento seco, **150 mcd·m²·lux⁻¹** (equivalente a la clase R₃ de la norma EN 1436), con una **anchura mínima de línea de 150 mm** para todas las carreteras

- En condiciones de pavimento húmedo, **35 mcd·m²·lux⁻¹** (equivalente a la clase RW₂ de la norma EN 1436)

Aparte de estos procesos consultivos, se han realizado varios en ensayos de campo sobre los efectos las características de las marcas viales en los sistemas de visión artificial. En un ensayo (Davis, 2017) se observó que:

- Los sistemas de visión artificial realizaban un escaneo de la superficie del pavimento en una longitud de entre 7 y 20 m por delante del vehículo, incrementándose esta distancia según la velocidad del automóvil, pero no se incrementaba esta distancia en función de las condiciones del firme (por ejemplo, en tiempo húmedo o cuando existía una visibilidad baja) ni en función de la hora del día (si era de día o de noche).
- Durante la noche, la retrorreflexión de la marca vial era el factor más importante. La razón del contraste de luminancias (de la marca respecto al pavimento) en condiciones nocturnas no era un factor significativo, pues la retrorreflexión del pavimento es muy pequeña en todos los casos.
- Durante el día, la retrorreflexión tenía poca influencia en el funcionamiento de la visión artificial, siendo la razón de contraste de luminancias el factor más importante.
- La anchura de la marca vial importaba en condiciones nocturnas (por ejemplo, una línea de 150 mm con una reflectividad más baja superó en prestaciones a una línea de 100 mm con una reflexión ligeramente mayor).

En general se puede decir que, en ensayos de campo de sistemas de visión artificial, lo que importa más para el reconocimiento de la marca vial en condiciones de iluminación diurna es la razón de contraste de las luminancias entre marca y pavimento, y para condiciones nocturnas es la retrorreflexión. Por tanto, se puede concluir que en los sistemas de visión artificial influyen las mismas variables que en la visión humana.

En Estados Unidos, se están realizando investigaciones en el marco del programa NCHRP del Consejo de Investigación del Transporte (TRB), como la del proyecto 20-102 que abarca una serie de iniciativas sobre los vehículos conectados y autónomos. La Tarea 6 está dedicada a las “Marcas viales para visión artificial” y su objetivo es obtener información sobre las características de funcionamiento de las marcas viales que afectan a la capacidad de los sistemas de visión artificial para reconocerlas.

Algunos hallazgos preliminares sobre los efectos de las marcas viales en la visión artificial son:

- Las marcas de borde de calzada y las marcas de carril tienen el mismo rendimiento
- El alumbrado público tiene un impacto mínimo en el rendimiento nocturno
- La detección de las marcas en condiciones diurnas es más difícil que en condiciones nocturnas, especialmente en un día húmedo, debido al deslumbramiento ocasionado por la reflexión

- La velocidad (hasta unos 104 km/h) tiene un impacto mínimo
- Para condiciones diurnas en seco, parece apropiado un nivel de más de $100 \text{ mcd}\cdot\text{m}^2\cdot\text{lux}^{-1}$
- Los ensayos continúan en condiciones húmedas y se comparan las anchuras de línea de 100 mm y 150 mm.

Uno de los últimos resultados a los que se ha llegado en este proyecto americano es el de que parece suficiente una anchura de 10 cm para las marcas viales, lo que constituye la diferencia más llamativa con respecto al valor propuesto por EuroRAP. De acuerdo con estas investigaciones, la anchura de la marca juega un cierto papel en los sistemas de visión artificial que detectan los bordes de las líneas, aunque esta diferencia es pequeña entre las marcas viales de 100 mm y las de 150 mm de ancho, mientras que la diferencia es muy grande para líneas bastante más estrechas (de unos 50 mm) pero sólo para distancias mayores de unos 50 m.

Por otra parte, en Australia, aunque en su normativa de marcas viales se prescribe una anchura de línea de 100 mm de ancho para la separación entre carriles y de 125 mm para el borde de la calzada, tras los resultados del proyecto *East-Link*, llevado a cabo en 2017 en la zona de Melbourne, se ha cambiado la anchura de las líneas de separación de carril a los 125 mm, igual al de las líneas de borde, que en los ensayos llevados a cabo en este proyecto parecen ser suficientes. No obstante, la tendencia actual en Australia parece ser que la anchura de la marca de separación entre carriles sea de 150 mm, siguiendo las recomendaciones europeas. También se ha visto que los sistemas de visión artificial funcionan adecuadamente cuando la razón de contraste entre las marcas viales y el pavimento es al menos de 3 a 1 en la mayor parte de las condiciones meteorológicas.

Consideraciones por parte de la industria de la automoción

Después de realizar investigaciones básicas, Austroads implicó a empresas de la industria de la automoción en un taller-encuesta, para que manifestaran su parecer sobre los resultados a los que se había llegado, principalmente sobre qué atributos de la infraestructura física de la carretera eran más importantes para la conducción asistida y para la conducción automatizada.

Los fabricantes de la industria de la automoción manifestaron que preferían unas marcas viales altamente visibles y no ambiguas en ambos lados del carril. Consideraban que la visibilidad era importante no solo en buenas condiciones, sino también en zonas de sombra, cuando el sol estaba en un ángulo bajo y durante las precipitaciones.

Preguntados sobre lo que a su modo de ver deberían priorizar las administraciones de carreteras, los fabricantes manifestaron que, frente a la inversión en mejorar la calidad de un pequeño número de líneas (hasta alcanzar éstas una anchura de 150 mm a un nivel de $150 \text{ mcd}\cdot\text{m}^2\cdot\text{lux}^{-1}$, aconsejados por EuroRAP y EuroNCAP), preferían otros aspectos adicionales, como:

- que un mayor número de carreteras tuvieran al menos marcas viales aunque fueran de una calidad menor (por ejemplo de 100 mm de ancho a un nivel de $100 \text{ mcd}\cdot\text{m}^2\cdot\text{lux}^{-1}$)

- pintar líneas de borde donde no existiera ninguna
- centrarse en mejorar la coherencia de las marcas viales, por ejemplo, en los tratamientos existentes en las salidas de las carreteras o autopistas (no dejando el comienzo de la salida sin línea, como se hace en algunos países).

Hay que señalar que estas cuestiones preferidas por la industria de la automoción van en la misma línea que el conocimiento de los procesos de visión artificial.

Líneas de borde de calzada. Una de las áreas exploradas en la encuesta fue sobre cuál era la importancia de las líneas de borde para una buena detección del borde de la calzada, o alternativamente, en qué medida los sistemas de visión artificial podían determinar el borde de la carretera en ausencia de líneas de borde.

Las respuestas a esta última cuestión indicaron que solamente algunos sistemas podían detectar bordillos, arcén con grava y bordes con hierba o con vegetación, y, desde luego, con menos fiabilidad que para las marcas viales. Aunque se pusieron de manifiesto las mejoras en las cámaras de visión artificial, se consideraba que seguía siendo importante una línea o marca de borde. Eso sí, se consideraba que los vehículos de conducción automatizada eran más capaces de detectar el borde de la calzada sin basarse en líneas de borde.

También se preguntó sobre cuánta separación se requería entre la línea de borde y el borde del firme para tener en cuenta la fiabilidad (confianza) en el reconocimiento de las líneas o marcas viales. Hubo una cierta variabilidad en las respuestas, aunque se pudo concluir que las prestaciones de los vehículos de muchos fabricantes podrían ser superiores si al menos existiera una separación o retranqueo de la línea de borde de al menos 20 cm.

Con respecto a las líneas de borde de la calzada se han detectado unos casos claros de limitaciones de diseños viales pensados para la conducción humana: la **disposición de huecos sin marca vial discontinua longitudinal** en entradas y salidas a autopistas (véase la figura 2), y en aumentos o pérdidas de carril. Estos huecos sin marca vial obligan a los conductores de vehículos con sistemas semi-automatizados actuales a “retomar” la función de conducción, lo que limita claramente y de forma bastante repetida la conducción automatizada, y además en entornos de autopista o autovía, en los que no debería existir ningún problema para ella. Hay que resaltar que este problema ha **sido constatado y estudiado también en las carreteras españolas** en un estudio llevado a cabo en la Universidad Politécnica de Valencia (Alfredo García, 2017).

En el estudio mencionado, realizado en la autovía CV-35 en la provincia de Valencia, se ha visto que la longitud media de los huecos sin marcado vial que produjeron un evento de cesión de control al conductor en la autopista estudiada era de 38,8 m en las salidas y 43,6 m en las entradas, pero llegó a producirse esta cesión con unas longitudes mínimas de hueco de sólo 15,0 m en las salidas y 19,5 m en las entradas. En el tramo estudiado de la CV-35, que tenía 25 salidas y 27 entradas en ambos sentidos de circulación, se cedió el control al conductor en un 32 % de las salidas y en un 19 % de las entradas. Por tanto, parece que para los sistemas de conducción automatizada son más

limitativas las discontinuidades en las salidas. Se observó que las discontinuidades en las marcas viales en las que se producía más frecuentemente la cesión del control al conductor coincidían al mismo tiempo con localizaciones en curva o con acuerdo vertical convexo.

En vista de lo anterior, los autores del estudio propusieron efectuar unas modificaciones en la norma 8.2-IC *Marcas viales*, en el sentido de eliminar totalmente los huecos en esa marca vial (de hecho, muchos países no dejan ningún hueco en esas situaciones), con el fin de potenciar la continuidad del funcionamiento de los vehículos con conducción semiautónoma. Hay que señalar que esta propuesta parece haber tenido su consideración en el borrador de la nueva norma 8.2-IC, que recientemente ha sido sometida a información pública, pues en este borrador se propone que la marca vial discontinua de salida/entrada se comience a pintar en la cuña cuando la distancia al borde de calzada sea de sólo 10 cm (frente a los 1,5 m en la norma actualmente vigente).

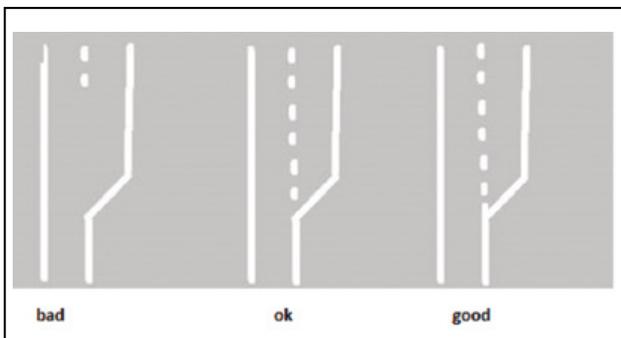


Figura 2. Esquemas de la disposición correcta (figura del centro y de izquierda) de las marcas viales de señalización de una salida de autopista y de la disposición incorrecta (a la izquierda). Fuente: AP-T347-19 Technical Report “Infrastructure Changes to Support Automated Vehicles on Rural and Metropolitan Highways and Freeways. Audit Specification”, Austroads, 2019.

3.2.2. Influencia de la señalización vertical

Aunque para evaluar la visibilidad humana de las señales verticales existe planteamiento similar al de las marcas viales, basado en la medición de la luminancia en condiciones diurnas y de la retrorreflexión en las nocturnas, las directrices del informe *Roads that Cars Can Read* elaborado por EURORAP en relación con su detección e interpretación por los sistemas de conducción asistida y automatizada son mucho menos específicas.

Igualmente, tras un proceso consultivo, hubo una evaluación de los factores que tenían un impacto alto, medio y bajo en el funcionamiento de los sistemas de conducción asistida y automatizada, que en este caso fueron:

- **Factores con impacto alto:** vandalismo/graffiti, posición de la señal, señales tapadas, por ejemplo, por las hojas de los árboles y arbustos.
- **Factores de impacto alto-medio:** confusión con señales verticales de carreteras inmediatamente adyacentes, señales ubicadas de forma equivocada, ángulo de la señal en relación con el conductor.
- **Factores con impacto medio:** calidad de la superficie de la señal, emplazamiento incoherente de la señal,

diferencias en fronteras nacionales en el color y la forma de la señal.

- **Factores con impacto medio-bajo:** confusión de múltiples señales en la misma localización, iluminación ambiente.

Como se puede deducir de la anterior enumeración, muchos problemas relativos a los factores de impacto alto tienen que ver con el posicionamiento de las señales en relación a la carretera y a otros elementos obstruyentes o confusos. Sin embargo, la calidad de la señal, su forma y las diferencias en el formato de la señal entre los distintos países no se califican como factores de alto impacto, sino como de impacto medio. Esto quizás ayuda a explicar por qué es más difícil que haya unas recomendaciones específicas para las señales.

Respecto a la señalización de mensaje variable, hay que decir que también es importante que los sistemas de visión artificial puedan soslayar el efecto de parpadeo (efecto “flicker”) de los LEDs que forman la señal, pues este efecto puede ocasionar que las cámaras de visión artificial no puedan captar ninguna imagen del mensaje proporcionado por la señal.

Por otra parte, en el estudio llevado a cabo por Austroads mediante un taller-encuesta con las empresas de fabricantes de automóviles, también se examinó el reconocimiento de las señales. La respuesta principal fue que la posición de la señal era un factor importante. Para la señalización de mensaje variable mediante límites electrónicos variables de velocidad, se comentó que era tan importante una adecuada provisión de datos como el reconocimiento directo de la señal mediante la visión artificial.

Codificación de las señales y marcas viales para visión artificial

Una empresa multinacional que tiene una gran cuota de mercado en la fabricación de materiales retrorreflectantes, tanto para señales verticales como para marcas viales, ha analizado y acometido actividades de desarrollo de productos en lo relativo a las oportunidades y amenazas de los vehículos conectados y automatizados.

Una de las oportunidades que han identificado es proporcionar a las señales verticales de circulación un código legible con máquina que sea visible para las cámaras infrarrojas (IR), pero no para el ojo humano, en una lámina que cubre la señal. Las máquinas pueden interpretar más fácilmente este código que la señal base y el código incorpora medidas para ayudar a la lectura incluso cuando esté tapado parcialmente. Este producto está siendo probado en algunos proyectos de carreteras inteligentes de Estados Unidos, aunque ha habido todavía poco o ningún compromiso de incorporarlo por parte de los fabricantes de automóviles, pues como el código utilizado se fabrica bajo patente, cualquier usuario debe pagar unas tasas por la licencia.

Cámaras con unos rangos dinámicos más amplios

Los resultados de los estudios indican que continúan los problemas en la detección de las marcas viales y señales en condiciones ambientales difíciles, como cuando hay poca luz o sombra. Unas cámaras con unos **rangos**

dinámicos (relación entre la parte más iluminada de la escena y la cantidad de luz mínima detectable de la parte más oscura de dicha escena) más amplios podrían mejorar el rendimiento en condiciones de baja luminosidad y realizar potencialmente un análisis visual en niveles más bajos y más altos que los apropiados para los ojos humanos. Aunque las cámaras térmicas o las infrarrojas (IR) han ofrecido algún rendimiento en estas condiciones, existe un cierto optimismo en el potencial de las cámaras de visión artificial con rangos dinámicos más amplios para proporcionar una resolución más alta a menores costes que las cámaras infrarrojas en algunas condiciones.

4. TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURAS

La tercera y, hasta la fecha, última actualización del informe de EuroRAP “Roads that Cars Can Read”, publicado en 2018, que tiene como subtítulo “Abordando la transición a los vehículos automatizados”, va más allá de prescribir unos ciertos niveles de retrorreflexión para las marcas viales y, partiendo de que en las próximas décadas van a coexistir los vehículos sin funciones de automatización con los ya parcialmente automatizados (o en un futuro algo más lejano, automatizados totalmente) en unas proporciones cada vez mayores de estos últimos, **prevé que van a**

cambiar los patrones de accidentalidad actuales, bajando la importancia de algunos tipos de accidentes muy comunes actualmente (por ejemplo, los accidentes por alcance) y, probablemente aparecerán otros nuevos, debidos a ciertas características de los vehículos automatizados. Como conclusión se comenta que la accidentalidad total en vías interurbanas podrá reducirse probablemente en un 25 % en unos 30 o 40 años.

En cuanto a la influencia de la infraestructura, se comenta que estos nuevos riesgos aparecerán probablemente donde la conservación y mantenimiento de la vía sea deficiente, por ejemplo, debido a marcas viales casi borradas, que no sean captadas por la tecnología de detección de los vehículos automatizados. También podrían surgir otro tipo de riesgos en la precepción del flujo del tráfico por parte del vehículo automatizado, como por ejemplo en la velocidad para incorporarse a la corriente del tráfico en sitios donde un vehículo convencional no lo haría.

Otro aspecto que deberá tenerse en cuenta es que en un futuro próximo los usuarios de la vía (tanto los conductores de los vehículos automatizados como los de los vehículos convencionales, los ciclistas e, incluso los peatones) **necesitarán ser capaces de anticipar las maniobras de los vehículos automatizados** con precisión, para conseguir que el flujo del tráfico sea seguro y sin perturbaciones.

Tabla 5. Patrones de accidente de los **vehículos automatizados (VA)**: cambios potenciales de riesgo e infraestructura necesaria según el tipo de accidente

Patrones de accidente	Cambio potencial en el riesgo	Ejemplo de infraestructura necesaria
VA contra vehículo convencional	Choque: mejor seguimiento del carril Intersección: mejora en la detección de presencia y en el posicionamiento en la carretera; aumento de la conectividad Alcance: mantenimiento de la distancia y mejora de un frenado temprano autónomo de emergencia Probabilidad menor de que el accidente sea grave debido al control de velocidad y al cumplimiento de los límites, pero puede incrementarse el que los coches convencionales golpeen a los vehículos autónomos	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y marcado vial • Barreras en medianas
VA contra VA	Similar a lo de arriba, pero con el riesgo reducido debido al mayor control de los VA y a la conectividad – por ejemplo, se eliminarán los accidentes por alcance	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y marcado vial • Conectividad con la infraestructura de la carretera (V2I) y con los vehículos (V2V)
VA contra Infraestructura	VA – mejor mantenimiento en el carril, ajuste de la velocidad en curva, se requieren barreras, pero menos frecuentemente (reducción de velocidad, amenaza reducida de los peligros del entorno de la carretera), conectividad V2I con el entorno de la vía e información del tráfico	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y marcado vial • Medidas en los márgenes tales como una revisión (modificación) de la política de contención de los accidentes en los márgenes de la vía (es decir, provisión de barreras). • Conectividad
VA contra motocicleta	Similar a los vehículos automatizados contra los vehículos convencionales, pero también dependiente de la capacidad del VA para detectar las motocicletas y del motorista para interpretar las maniobras de los coches y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y marcado vial • Barreras en medianas • Lo que sea mejor para los usuarios de la vía: ¿intersecciones reguladas por señales de prioridad de paso, glorietas o reguladas con semáforos? • Reconocimiento de la motocicleta por otros vehículos y por la infraestructura
VA contra bicicleta	Similar a los vehículos automatizados contra los vehículos convencionales, pero también dependiente de la capacidad del VA para detectar las bicicletas y del ciclista para interpretar las maniobras de los coches y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización y marcado vial • Barreras en medianas • Segregación cercana • ¿Intersecciones reguladas por señales de prioridad de paso, glorietas o reguladas con semáforos? • Reconocimiento de la bicicleta por otros vehículos y por la infraestructura
VA contra peatón	Capacidad del vehículo automatizado para detectar al peatón y del peatón para interpretar las maniobras del coche y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento del peatón por otros vehículos y por la infraestructura • Segregación cercana • Diseño de los cruces y prioridad

Fuente: “Roads that Cars Can Read”. Report III, EuroRAP, 2018.

Por otro lado, se propone establecer un sistema de puntuación de la infraestructura para los vehículos automatizados, similar al que ya existe para los vehículos convencionales. De esta forma, una carretera con un marcado vial excelente para cualquier condición meteorológica puede que reduzca el riesgo de salida de la vía casi a cero, pues existirían pocas condiciones previsibles bajo las cuales un vehículo automatizado no se mantendría en la carretera. Por eso, de acuerdo con el sistema de puntuación de la infraestructura propuesto, una cierta carretera que, de acuerdo con la clasificación por estrellas de EuroRAP, tuviera sólo una puntuación de 2 estrellas para un vehículo convencional, pero que dispusiera de un marcado vial de alta calidad acoplado con las funciones de mantenimiento de carril, es posible que pudiera tener una puntuación de 4 estrellas para un vehículo automatizado.

Asimismo, pueden llegar a ser más relevantes otros parámetros, como la penetración de la flota de vehículos parcialmente automatizados en el tiempo. Así, el beneficio de renovar un marcado vial puede que se incremente de forma significativa, pudiendo establecerse unas prioridades de inversión óptimas.

Será crítica la **elección de la ordenación y la regulación apropiadas de una intersección** teniendo en cuenta tanto su capacidad de circulación como la seguridad de paso de **todos los vehículos (automatizados y convencionales)**, así como la interacción peatón-vehículo automatizado. Se plantea el problema de que actualmente en muchas intersecciones, la seguridad y fluidez de la circulación se basa en el contacto visual entre los conductores de los vehículos para poder introducirse en la corriente del tráfico (por ejemplo, en el giro a la izquierda desde una vía secundaria a una principal, o en la entrada en una glorieta) y esto mismo ocurre en todo momento con el tráfico de motocicletas. Por otro lado, para los vehículos automatizados puede que sea más segura una intersección semaforizada que una glorieta, porque proporciona unos elementos de la maniobra parada-arranque más predecibles y da unas maniobras de giro más definidas y cerradas.

En la tabla 5 se proporciona un resumen de cómo cambiaría el riesgo en la interacción de los vehículos automatizados (VA) con los demás vehículos y la infraestructura, y el tipo de contramedida que debe poseer la carretera, que sería necesaria para reducir el riesgo.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados de investigaciones locales e internacionales, así como de estudios basados en opiniones manifestadas por expertos y actores implicados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La mayor parte de las investigaciones se centran principalmente en la capacidad de los vehículos de conducción asistida y de conducción automatizada para comprender la infraestructura a través de sensores de cámaras de visión artificial. Aunque existen otros tipos de sensores (LiDAR, radar, detectores infrarrojos, etc.) y fuentes de datos (mapas digitales, transmisión de datos por telefonía móvil), que ya son importantes y lo serán todavía más en el futuro, los sensores de cámaras son actualmente los más utilizados para identificar las marcas viales y señales verticales. Los sistemas de visión artificial se basan para “leer” la infraestructura en las mismas pistas que los conductores, que son el captar las marcas viales y las señales de tráfico. De ahí la importancia de este tipo de sensores.
2. Los factores relativos al **marcado vial** que tienen un impacto más alto en los sistemas de mantenimiento en el carril y en la conducción automatizada son la existencia o no de marcas viales, el estado de la superficie viaria y el estado y disposición de las marcas viales existentes.
3. En ensayos de campo, lo que parece importar más para el reconocimiento automatizado del marcado vial es la razón (cociente) de luminancias entre la marca vial y el pavimento para condiciones de iluminación diurna y la retroreflexión para condiciones de iluminación nocturna. Tanto en unas condiciones como en otras es también importante la anchura de la marca vial.
4. Los requisitos que debe cumplir el marcado vial están relacionados con su visión en condiciones de iluminación diurna (luz difusa) y nocturna (luz retroreflejada), y con el pavimento seco y húmedo. En este sentido, existe un cierto acuerdo en que las marcas viales deberían tener **un coeficiente de luminancia retroreflejada R_L de 150 mcd.m².lux⁻¹ y una anchura de línea de 150 mm**, aunque algunos estudios realizados en Estados Unidos indican que se puede reducir algo tanto la anchura de trazo de la línea a 100 mm como el coeficiente de luminancia retroreflejada a 100 mcd.m².lux⁻¹ sin gran menoscabo en las prestaciones. No obstante, no parece aconsejable tirar por lo bajo en estas magnitudes, porque los valores prescritos del coeficiente R_L se deben cumplir a lo largo de toda la vida de servicio de la marca vial (mínimo 2 años). En cuanto a la **visibilidad nocturna con el pavimento húmedo**, se establece el mínimo en servicio de **R_w en 35 mcd.m².lux⁻¹**. Conviene señalar que los valores prescritos tanto para el coeficiente R_L como para el coeficiente R_w se corresponden con los que ya venían especificados en el PG-3 para las marcas viales en general. Asimismo, la anchura de 150 mm es la que ya se viene utilizando en las marcas viales de separación entre carriles.
5. Por otro lado, en lo relativo a las señales verticales, no se ha podido proporcionar ninguna recomendación simple de prestaciones de calidad equivalente a las de las marcas viales, a pesar de que su funcionamiento se mide de una forma parecida. Ello se debe a que los factores que más influyen en el reconocimiento automatizado de una señal no tienen que ver con la calidad de su superficie, sino con aspectos tales como su ubicación correcta, que no esté tapada por hojas de árboles, o que no se confunda con otras señales adyacentes.
6. Para un correcto funcionamiento de los sistemas de conducción automatizada importa la calidad de las marcas viales, pero **es más importante aún el que éstas existan, al menos en los bordes de la calzada**, y también aspectos como la coherencia y la continuidad de las mismas, planteando problemas los diseños ac-

tualmente vigentes en España para las entradas y salidas a una carretera o autopista en que hay huecos frecuentes de 30 o 40 m de longitud en la línea discontinua que separa la calzada de la salida. Estos aspectos se podrían resolver fácilmente cambiando algunas disposiciones al respecto de la norma 8.2-IC, lo que parece que ya se ha efectuado en el borrador de esta norma sometido recientemente a información pública.

7. En el futuro parece que, con el aumento de la participación de los vehículos parcial o totalmente automatizados, cambiarán los patrones de accidentalidad existentes, disminuyendo las proporciones de algunos tipos de accidentes (por ejemplo, los choques por alcance de un vehículo a otro o las salidas de la vía), pudiendo aparecer algunos tipos nuevos de accidente, relacionados con la forma de moverse de los vehículos automatizados, que deberán prever los conductores de los vehículos convencionales. En general, se espera que pueda producirse una disminución de un 25 % del total de accidentes cuando se logre una alta penetración. También **podría ser necesario cambiar el tipo de ordenación y regulación de algunos tipos de intersecciones**, como puede ser sustituir algunas glorietas por intersecciones reguladas por semáforos, pues los vehículos automatizados pueden tener problemas para introducirse en la corriente de circulación de la glorieta.
8. Como conclusión final, podría decirse que puesto que existen muchos factores difíciles de controlar que pueden degradar la capacidad de los sistemas de visión artificial para detectar las marcas viales, una de las medidas más eficaces y baratas para favorecer la conducción automatizada sería mejorar los principios de diseño de las mismas y su nivel de conservación.

6. REFERENCIAS

Austroroads (2019). AP-T347-19 Technical Report. *Infrastructure Changes to Support Automated Vehicles on Rural and Metropolitan Highways and Freeways. Audit Specification (Module 1)*.

Austroroads (2020). AP-R633-20 Research Report. *Implications of Pavement Markings for Machine Vision*.

Austroroads (2020). AP-R627-20 Research Report. *Guidance and Readability Criteria for Traffic Sign Recognition Systems Reading Electronic Signs*.

Dirección General de Carreteras (DGC) (2015). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Parte 7ª. Señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. Ministerio de Fomento. BOE del 3 de enero de 2015.

EuroRAP – EuroNCAP (2013). *Roads that Cars Can Read. A Quality Standard for Road Markings and Traffic Signs on Major Rural Roads*.

EuroRAP – EuroNCAP (2018). *Roads that Cars Can Read. Tackling the Transition to Automated Vehicles*. Report III.

García García, A., et al. (2017). Mejoras en el diseño de marcas viales para aumentar la eficacia de los vehículos automatizados. *Rutas*, nº 173, pp. 5-12.

Jiménez Alonso, F. (2017). Retos tecnológicos en el desarrollo e implantación del vehículo autónomo y conectado, *Carreteras*, nº 216, pp. 8-16.

MITMA (2020). Borrador de la norma “8.2-IC Marcas viales”. Proyecto de Orden por la que se aprueba la norma “8.2-IC Marcas viales” de la Instrucción de carreteras. <https://www.mitma.es/el-ministerio/buscador-participacion-publica/82-ic-marcas-viales>

UNE-EN 1436 (2018). *Materiales para la señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada y métodos de ensayo*.