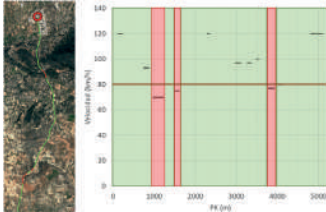


Gestión de los Dominios de Diseño Operativo para los Vehículos Automatizados



Management of Operational Design Domains for Automated Vehicles

Alfredo García

Catedrático

Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC)

Francisco Javier Camacho Torregrosa

Profesor Titular de Universidad

GIIC – Universitat Politècnica de València

David Llopis Castelló

Profesor Contratado Doctor

GIIC – Universitat Politècnica de València

Revisado por:

Comité Técnico de Planificación, Diseño y Tráfico

Asociación Técnica de Carreteras (ATC)

El Dominio de Diseño Operativo (ODD) de un vehículo automatizado se define como las condiciones específicas bajo las cuales un vehículo automatizado ha sido diseñado para poder funcionar de forma autónoma y segura a lo largo de una sección viaria. Así, en un tramo de carretera, cada vehículo automatizado puede atravesar diferentes secciones que se ajusten a sus ODDs, dando lugar a una gran variabilidad de ODDs entre modelos de vehículos. De aquí surge la necesidad de gestionar los ODDs de los distintos vehículos automatizados con el fin de conseguir una conducción más segura. Concretamente, la gestión de los ODDs abarca tres fases principales: (i) diseño, (ii) verificación y (iii) validación. Durante la conducción automatizada cobra especial importancia la manera en la que se produce la transferencia del control del vehículo al conductor cuando finaliza un ODD. En este contexto, las tareas dinámicas de conducción y las maniobras de riesgo mínimo juegan un papel esencial para garantizar la seguridad de la circulación. Todo este flujo de procesos es abordado y discutido a lo largo de este artículo, finalizando con un caso de estudio en el que se demuestra la gran variabilidad de ODDs que definen la operación de los actuales vehículos automatizados de nivel 2.

The Operational Design Domain of an Automated Vehicle can be defined as the specific conditions under which the vehicle has been designed to operate in an autonomous and safe way along a road section. Thus, on a road segment, each Automated Vehicle can pass through diverse sections that match its ODD, resulting in a large variability of ODDs among vehicle models. This fact leads to the need to manage the ODDs of different Automated Vehicles so as to achieve safer driving. Specifically, the management of ODDs encompasses three main stages: (i) design, (ii) verification, and (iii) validation. During automated driving, the way in which the vehicle transfer control to the driver is of great importance when finalizing an ODD. In this context, Dynamic Driving Tasks and Minimal Risk Maneuvers play a key role in ensuring traffic safety. This workflow is addressed and discussed throughout this article, ending with a case study that demonstrates the great variability of ODDs that define the operation of today's SAE Level 2 vehicles.

1. Introducción

Un vehículo automatizado de nivel 2 o superior está programado para mantener el control, tanto longitudinal como transversal, al circular por una sección de carretera si se dan unas determinadas condiciones. El conjunto de estas condiciones se denomina Dominio de Diseño Operativo (ODD, Operational Design Domain). Por tanto, un ODD se refiere a las condiciones específicas bajo las cuales un vehículo automatizado ha sido diseñado para poder funcionar de forma segura –manteniendo el control– a lo largo de una sección viaria.

Un ODD define, de forma individualizada y particular, cuándo, dónde y en qué condiciones un determinado vehículo automatizado puede funcionar de manera autónoma. Igualmente, también define, de forma complementaria, aquellas condiciones con las que no puede operar. Todo ello según el diseño de ese vehículo y su sistema de automatización.

Los factores que influyen en la localización y extensión de un ODD pueden ser, entre otros, el tipo de vía, el entorno, las características de la vía, el estado de las marcas viales, las condiciones del tráfico y el rango de velocidades del vehículo automatizado que le corresponda al ODD.

Las secciones viarias correspondientes a los dominios operativos pueden ser muy cortas (incluso de algunas decenas de metros) o realmente largas, abarcando todo un segmento o tramo de carretera. Dentro de un tramo de carretera, cada vehículo automatizado puede atravesar diferentes secciones que se ajusten a sus ODDs, es decir, diversas secciones de esa carretera que le permiten operar de forma automatizada. Estas estarán por lo general inconexas, separadas entre sí por zonas que no se ajustan al ODD del vehículo por cualquier factor limitante. En este contexto, se denomina desconexión al hecho de que el vehículo pase de operar de manera automatizada a solicitar el control humano. Como se puede observar en la Figura 1, las desconexiones y, por tanto, la finalización de los ODDs resultantes, se pueden deber a distintos factores limitantes, mostrándose solo algunos de los posibles.

Si se producen múltiples desconexiones, habrá muchas zonas cortas compatibles con el ODD, cediendo con bastante frecuencia el control al conductor. Estas cesiones siempre suponen un riesgo porque, aunque la presencia y la supervisión del conductor debe ser continua, se pueden producir demoras en la aplicación de las acciones necesarias, como, por ejemplo, girar el volante en una curva para que el vehículo no se salga del carril por donde circula.

Las primeras tecnologías de automatización están asociadas a un gran número de desconexiones, por lo que la tendencia natural de sus usuarios es a desconectar el sistema autónomo si resulta molesto. Por el contrario, sistemas tecnológicamente más avanzados presentarán ODDs más robustos y extensos, con cesiones de control mucho más esporádicas. Por una parte, esto fomentará que los conductores hagan uso de la automatización, pero por otra podría suponer una mayor lentitud de la respuesta –mayor tiempo de reacción– al ser esta más sorpresiva.

Por tanto, conforme se avance en las tecnologías y los niveles de automatización, se hace necesario disponer de información detallada que permita a los sistemas de conducción automatizada determinar dónde se localizan las finalizaciones de los ODDs para advertir al conductor con antelación suficiente que ha de recuperar el control. Esto se espera realizar a partir de mapas de alta definición dinámicos y asegurando la conectividad con el vehículo.

Todos los niveles de automatización, excepto el máximo –nivel 5–, presentan ODDs limitados por diversos factores o atributos. No obstante, los vehículos puramente autónomos –nivel 5– pueden verse también afectados, en un momento dado, por una avería mecánica o un fallo en su sistema de automatización (p. ej., por el



Figura 1. Zonas compatibles con el ODD del vehículo, en función de distintos factores limitantes.

fallo de un sensor). Por tanto, todos los sistemas con un nivel de automatización superior o igual a 3 han de estar diseñados para tomar las decisiones y las acciones dinámicas adecuadas en tres posibles situaciones: (i) cuando esté previsto que vaya a finalizar una zona compatible con su ODD; (ii) cuando finalice una zona compatible con su ODD sin que se disponga de esa información a bordo con antelación; y (iii) cuando una zona compatible con su ODD finalice antes de lo previsto debido a un evento que altere al menos uno de los factores que soporta ese ODD, o se haya producido una avería. Los dos primeros casos se dan para vehículos de nivel 4, mientras que el último se da para los niveles 4 y 5. Los vehículos de nivel 3 pueden también cubrir estas casuísticas, pero no están obligados a cubrir la totalidad de estas.

Por tanto, la gestión de los ODDs es fundamental para el funcionamiento seguro de un sistema automatizado; tanto en el número de ellos a lo largo de un segmento de carretera, como en sus localizaciones, su extensión y, sobre todo, en los procesos para su terminación que son los más críticos para garantizar un funcionamiento seguro del sistema automatizado. Esta gestión de los ODDs se centra en las acciones de advertencia al conductor para la toma de control y, en caso de no respuesta inmediata por su parte, de las maniobras automatizadas de riesgo mínimo para llevar al vehículo a una condición o localización de riesgo mínimo, es decir, lo más segura posible.

2. Utilidad de los ODDs

El objetivo principal del ODD es especificar con precisión el dominio en el que un vehículo automatizado o un sistema automatizado de conduc-

ción ha sido diseñado para operar de forma automatizada.

La gestión de los ODDs se inicia desde el diseño del propio vehículo con el sistema automatizado, y continúa en la circulación del mismo. Pueden distinguirse tres fases: (i) proceso de diseño, (ii) proceso de verificación y (iii) proceso de comprobación:

- En el proceso de diseño del sistema automatizado, la definición del ODD ayuda a identificar los escenarios para los que debe diseñarse el sistema, por lo que sirve de orientación a los desarrollos tecnológicos asociados.
- En el proceso de verificación, el ODD se debe comprobar mediante pruebas con diferentes niveles de detalle, en entornos viarios cerrados o abiertos, y en ocasiones también incluyendo simulación.
- En el proceso de comprobación, el ODD se puede validar durante el funcionamiento de los vehículos automatizados correspondientes, reportando las características de las desconexiones, como: identificación del vehículo, localización, tiempo, velocidad, etc.

3. Finalizaciones de los ODDs

Ante la problemática de las finalizaciones de los ODDs por sus desconexiones, debidas a algunos de los factores limitantes o a averías, se hace necesario que el sistema automatizado aplique dos principios fundamentales: (i) la monitorización continua de los factores del ODD del vehículo y (ii) la capacidad de autoadaptación.

Si se detecta una alteración que comporta un ODD potencialmente restringido, el vehículo debe ser capaz de adaptar dinámicamente su

comportamiento para permanecer dentro de este dominio. Un ejemplo es que el vehículo reduzca su velocidad. En cualquier caso, si no le fuera posible, se espera que los sistemas de mayor nivel de automatización funcionen de manera segura incluso en el caso de fallos del propio sistema o con condiciones externas peligrosas, como meteorología adversa (p.ej., lluvia intensa o niebla).

Pueden distinguirse dos tipos de maniobra que realiza automáticamente el vehículo en caso de requerir respuesta por parte del conductor y no encontrarla: detenciones de emergencia y detenciones seguras. Los sistemas automatizados de niveles 2 y 3 pueden estar programados con estrategias de mitigación en caso de no respuesta por parte del conductor, tras diversas acciones consecutivas de advertencia –visual, auditiva y háptica–, como la detención en el propio carril (SAE, 2021). Estas estrategias de mitigación suelen ser detenciones de emergencia, consistiendo estas en maniobras súbitas y bruscas que detienen el vehículo lo antes posible (Svensson et al., 2018).

Las detenciones seguras conllevan una tecnología y casuística más compleja, debiendo estar implementadas en la totalidad de situaciones que pueden acaecer a sistemas de nivel 4 y 5. De igual modo pueden también programarse para algunos casos de niveles inferiores (especialmente el 3). La diferencia fundamental con las detenciones de emergencia es que son maniobras mucho más suaves y planificadas, en las que el vehículo es capaz de funcionar de forma degradada con el objetivo de encontrar una condición o localización de riesgo mínimo, preferentemente fuera de los carriles de circulación e, incluso, sin usar los arcenes.

Esta condición o localización de riesgo mínimo, como apartarse y detenerse en el arcén derecho, debe ser

lograda por estos niveles cuando el sistema detecta cualquier problema con su propio funcionamiento o por condiciones externas que impidan una operación segura. Estas localizaciones de riesgo mínimo hay que entenderlas no solo para el vehículo automatizado implicado sino para el conjunto de la circulación. En el apartado siguiente se profundiza en su concepto, disposición y gestión.

Para que esta maniobra sea suave y segura, es importante que la cesión planificada del control cuente con el mayor tiempo disponible posible, de tal modo que el sistema pueda cerciorarse de las condiciones del tráfico y recuperar la atención del conductor desde una eventual tarea secundaria. Algunos ejemplos de avisos secuenciales para advertir al conductor incluyen señales visuales, auditivas y hápticas de alerta o, incluso, repentinos frenazos puntuales bruscos cuando el fin del ODD se encuentra muy cercano.

En el caso de llegar al fin del ODD y no haber obtenido respuesta por parte del conductor, los sistemas de nivel 4 son capaces de iniciar una tarea dinámica de conducción (DDT, Driving Dynamic Task) para lograr por sí mismos una condición y/o localización de riesgo mínimo (Figura 2). Esto incluye tanto decidir entre posibles localizaciones que puedan cumplir esta condición, como planificar la trayectoria hasta ellas. Un ejemplo de ello sería reducir significativamente la velocidad del vehículo sobre el carril para apartarlo del mismo al llegar a un punto seguro.

Otro ejemplo, para un vehículo de nivel 4, es en el caso de que las intersecciones incluidas en su ODD sean únicamente no semaforizadas. Cuando el vehículo se encuentre intersecciones semaforizadas, este no será capaz de operar. En este caso, si la supervisión continua del ODD determina que el vehículo ha sobrepasado

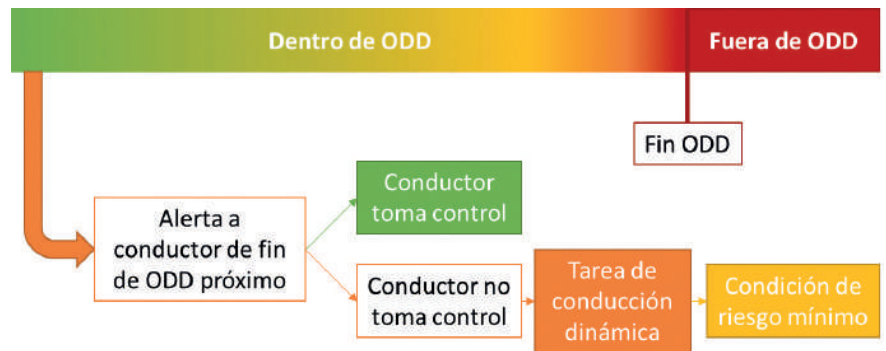


Figura 2. Finalización de ODDs en vehículos automatizados de nivel 4.

(o está a punto) los límites del ODD y no hay respuesta del conductor, el control debe ser cedido al conductor de forma planificada (Thatcham Research, 2019).

Como se ha indicado anteriormente, los sistemas de nivel 3, a priori, no tienen por qué ser capaces de desarrollar estas maniobras, si bien muchos de ellos van equipados con sistemas que mitigan el fallo (p. ej., llevando el vehículo a la detención en el propio carril tras unas señales fuertes de alerta). En algunos casos más avanzados de nivel 3, el sistema puede incluso realizar una maniobra de riesgo mínimo, similar al nivel 4. De hecho, para aumentar la seguridad en estas reacciones de los sistemas automatizados, se están incorporando elementos y procesamientos redundantes, como los relacionados con la frenada, el giro del volante y la detección de obstáculos.

En caso de que el conductor no retome el control, será el propio sistema el que tenga que ejecutar completamente una acción dinámica de retirada del vehículo para minimizar los riesgos. Por ejemplo, si un vehículo automatizado de nivel 5 se aproxima a una intersección en T desde una carretera secundaria para girar en ella, pero el radar de largo alcance orientado hacia los laterales falla antes de la intersección, el vehículo no debe entrar en ella y tendría que detenerse en una localización que comportara un riesgo mínimo.

El diseño de las trayectorias de detención segura suele comprender una maniobra en dos etapas para alcanzar la condición o localización de riesgo mínimo. En el primer paso, el vehículo reduce la velocidad en el carril para poder planificar una trayectoria de frenada completa dentro del rango de los sensores y el tiempo disponible (aproximadamente 30 km/h). En la segunda etapa, se planifica y ejecuta la trayectoria de frenada hasta el área más segura y accesible. Si no se puede llegar a ningún área fuera de los carriles de circulación, el vehículo puede detenerse en el carril activando las luces de emergencia o continuar a velocidad reducida hasta que dicha área esté disponible, según la gravedad del fallo detectado (Svensson et al., 2018).

El hecho de que gran parte de los factores que definen un ODD tienen que ver con la geometría de la carretera hace posible que teóricamente puedan georreferenciarse las zonas no compatibles con un determinado sistema. En este sentido, los casos más complejos se dan cuando la finalización de compatibilidad con el ODD se produce de forma repentina o no prevista. Dentro de este ámbito hay dos situaciones distintas: (i) que la causa sea interna, es decir, del propio vehículo o sistema automatizado, o (ii) que la causa sea externa.

Los fallos mecánicos o de los elementos del sistema automatizado (hardware y software) deberán ser monitorizados por el propio vehículo

y así la reacción ante la aparición del problema y la consiguiente salida del ODD podrá ser rápida.

La mayor dificultad aparece cuando se trata de causas externas, como una inclemencia meteorológica, un obstáculo en la calzada, un accidente, una obra o actuación en la calzada, etc. En este caso resulta de enorme ayuda una conectividad hacia el vehículo –I2V o V2V– para anticiparle el evento de cancelación de su ODD, a través de un mapa de alta definición dinámico.

Esto es especialmente útil para los niveles más altos de automatización (niveles 4 y 5), donde el conductor presumiblemente estará dedicando su tiempo a otras tareas secundarias y por ello el tiempo de retomar el control se presupone elevado. Los vehículos de nivel 2 no son tan dependientes de esta información, pues el sistema no puede garantizar su funcionamiento dentro de un ODD y de hecho el conductor tiene que estar en todo momento supervisando la tarea de conducción. Los vehículos de nivel 3 representan la situación más crítica, pues estos tampoco pueden garantizar la conducción automatizada dentro de sus ODDs, pero las desconexiones son menos frecuentes, lo que fomenta que los conductores pierdan atención en la monitorización del entorno. Es por ello que no está claro todavía que puedan ser suficientemente seguros ante estas situaciones repentinas de interrupción o salida de sus ODDs.

4. Condiciones de riesgo mínimo

Como se ha explicado, la necesidad de transición del control al conductor en vehículos de alto nivel de automatización supone, sea cual sea el motivo –fallo repentino del sistema automatizado; cambio súbito de

un factor ambiental o de entorno; o finalización del ODD–, el necesario desarrollo de una tarea dinámica de conducción (DDT) para la retirada del vehículo a una situación o localización que suponga un riesgo mínimo.

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE, 2018) propuso una definición para una Condición de Riesgo Mínimo (MRC): “una condición a la que un usuario o un sistema automatizado de conducción puede llevar un vehículo después de realizar las tareas dinámicas de conducción necesarias para reducir el riesgo de un accidente cuando un determinado viaje no puede o no debe completarse”.

La definición actualmente incluida en el Vocabulario de Vehículos Automatizados y Conectados (BSI, 2020) es: “condición estable y detenida a la que un conductor o un sistema de conducción automatizada lleva un vehículo después de realizar la tarea dinámica de conducción, para reducir el riesgo de un accidente cuando un viaje determinado no puede continuar”.

El concepto es sencillo, pero el problema radica en la forma práctica de establecer y habilitar esas condiciones de riesgo mínimo. Se hace hincapié en que son condiciones de riesgo “mínimo” y no “nulo”. Frente a la necesidad de alcanzar una de ellas, el vehículo evaluará diferentes opciones, inclinándose por aquella que suponga menor riesgo. Un ejemplo podría ser la disyuntiva entre detener el vehículo automatizado en el mismo carril por donde está circulando, activando las luces de emergencia, o llevar el mismo a zonas de aparcamiento seguro que se habiliten cada cierta distancia, fuera del ámbito de los arcones. Obviamente, la primera de las opciones presenta un riesgo importante y por ello el vehículo generalmente intentará optar por la segunda, salvo en casos

extremos como no poder alcanzar la zona segura, estando en un tramo sin arcones, en cuyo caso tendrá que verificar que la zona de detención sí presenta visibilidad suficiente hacia atrás.

La forma y localización de la MRC dependerá en gran medida de las características del ODD del vehículo automatizado, del motivo o causa que provoque la búsqueda de la MRC y de las condiciones de la infraestructura y operacionales en el lugar y momento del evento que activa la acción.

Por ejemplo, la MRC para un vehículo automatizado en una carretera con un fallo menor en un sensor puede ser maniobrar hacia el arcén derecho, decelerar suavemente hasta detenerse y activar las luces de emergencia. En cambio, la MRC para un autobús automatizado de baja velocidad que opera en un entorno urbano con un sistema LiDAR delantero dañado podría tratarse de la detención inmediata en el propio carril, activando las luces de emergencia.

Llegados a este punto, es importante destacar que la MRC es el objetivo a alcanzar, para lo que el vehículo también deberá ser capaz de encontrar una maniobra de riesgo mínimo (MRM). De este modo, el sistema automatizado ha de ser capaz, en primer lugar, de analizar y decidir la mejor opción para alcanzar una MRC entre todas las posibles en cada lugar y momento, en función de la causa, de las características de la sección de carretera y de las condiciones operacionales y ambientales. Una vez adoptada la decisión de qué MRC se va a alcanzar, se deben analizar las distintas maniobras de riesgo mínimo (MRM) para optar por las más seguras. MRMs muy complejas podrían incluso afectar a la decisión de qué MRC utilizar.

Por tanto, se trata de un balance global para minimizar los riesgos, tan-

to de las maniobras (MRM) como de la situación o condición final (MRC). En todo este proceso, el marco regulador de la circulación desempeña un papel clave, ya que puede establecer la prohibición de determinadas maniobras o detenciones en la vía. Estas situaciones no tienen realmente sentido ya que la estricta observancia de las normas de tráfico no siempre es coherente con la seguridad. Las autoridades de tráfico deberían, ya sea explícita o implícitamente, aceptar la suspensión temporal del cumplimiento de algunas normas de tráfico con el fin de garantizar una respuesta segura a eventos en las carreteras como los que les ocurren a los vehículos automatizados. Un vehículo automatizado, en su funcionamiento normal dentro de sus ODDs, cumpliría, por definición, con las leyes de seguridad vial, excepto en los casos en que el cumplimiento estricto normativo resultara en riesgos mayores para la seguridad.

Ante tanta incertidumbre, tanto tecnológica como técnica y regulatoria, se sigue avanzando en los estudios y desarrollos, así como en las discusiones entre los diversos agentes o partes interesadas. A los fabricantes de vehículos automatizados se les debe pedir una descripción de cómo está diseñado el vehículo para reaccionar cuando cedan el control, tanto de forma planeada como no planeada. Esto supone una descripción de cómo operarán los vehículos de alta automatización de manera segura, en caso de un fallo tecnológico (World Economic Forum, 2020).

Otro de los elementos que está en discusión está muy relacionado con la configuración y diseño de las carreteras. Se trata de las zonas donde poder acoger los vehículos automatizados fuera de servicio con seguridad. Hasta ahora, se han planteado diversas alternativas para las zonas de detención segura. Estas son, de menor a mayor seguridad, pero de

mayor a menor proximidad respecto a la localización del vehículo en el momento de la activación de la causa, las siguientes: (i) el uso del arcén exterior, (ii) la disposición de apartaderos de emergencia y (iii) el desarrollo de nuevas zonas de detención segura fuera de la plataforma viaria (Transport Systems Catapult, 2017; SAE, 2018; Liu et al., 2019).

5. Caso de Estudio

Para que se comprenda mejor cómo gestionar los Dominios de Diseño Operativo de diversos vehículos automatizados, se ha llevado a cabo un estudio basado en observaciones de recorridos a lo largo de un tramo de carretera convencional rural de dos carriles de 5,25 km de desarrollo (Figura 3). Se trata de un tramo de la CV-50, situado entre los municipios de Cheste y Villamarchante (Valencia).

El tramo de carretera presenta un trazado en planta con una velocidad de diseño de 80 km/h, un perfil longitudinal ondulado con acuerdos convexos suaves y una sección transversal

sal 7/10. El límite de velocidad está establecido en 90 km/h. El estado de las marcas viales era adecuado para la detección de las líneas de borde de los carriles y no presentaban discontinuidades. Igualmente, el estado del pavimento era bueno.

Se llevaron a cabo observaciones a través de múltiples recorridos mediante tres vehículos distintos con un sistema automatizado de conducción de nivel 2, es decir, con control longitudinal mediante sistema de control de velocidad adaptativo (ACC) y control lateral mediante sistemas de detección y mantenimiento en el carril (LKA y LCA). Concretamente, se emplearon los siguientes vehículos: (i) BMW serie 5 equipado con el paquete Driving Assistant Plus, de 2017; (ii) Volkswagen Tiguan con el paquete Driving Assistance, de 2020; y (iii) Audi Q2 con Driving Assistance Pack, de 2019. De todos estos vehículos no se disponía de la información del fabricante respecto a sus ODDs, como es habitual hasta ahora.

Todos los coches experimentales se equiparon con una cámara HD, dotada de un GPS, montada en la parte superior del asiento del con-

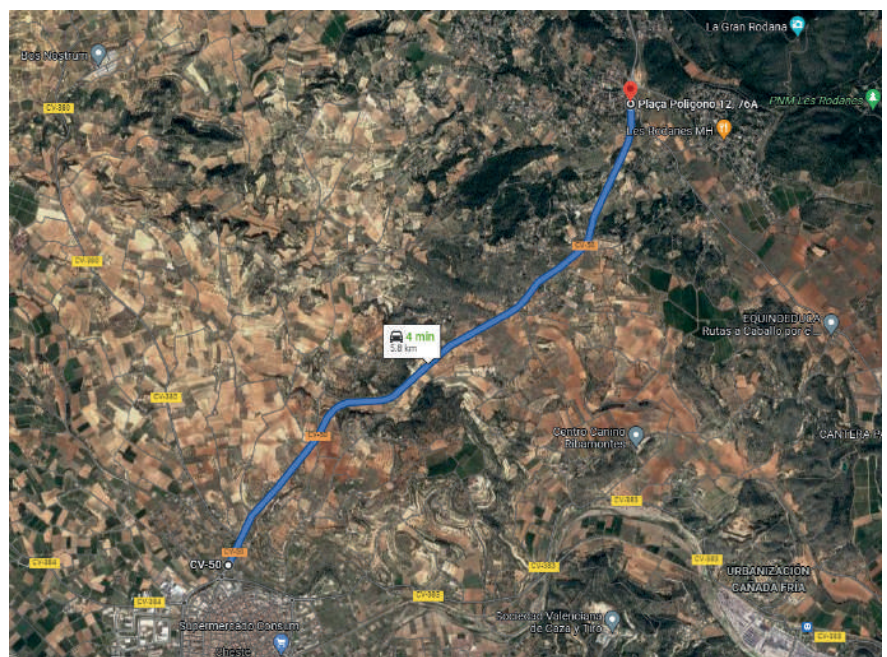


Figura 3. Tramo de carretera de estudio. Fuente: Google Maps.

ductor sobre un soporte lateral, de tal forma que el encuadre de la imagen tuviera una vista muy parecida a la del conductor, quedando registrada la escena de la carretera, las indicaciones en el cuadro de instrumentos (velocidad instantánea e información del funcionamiento del control lateral en el carril a través del color de las marcas viales de borde representadas), la pantalla del navegador con el mapa para disponer de la referencia visual de la localización y el audio de ciertas indicaciones del conductor. Toda esta información permitía su tratamiento posterior para determinar las variables objeto del estudio que se explican a continuación.

Lo primero que se determinó para cada curva, a través de diversos recorridos, fue la velocidad máxima a la que cada sistema fue capaz de funcionar sin ceder el control al conductor y, por tanto, sin salirse del carril. Este nuevo concepto, la velocidad automatizada, fue propuesto y publicado internacionalmente por el GIIC-UPV (García et al., 2020), estando directamente relacionada con el radio o curvatura de la curva. La Tabla 1 presenta las diversas velocidades automatizadas en función del radio de cada curva para cada vehículo.

Posteriormente, se realizaron recorridos a velocidad constante con cada uno de los coches, empleando como velocidades de referencia 70, 80 y 90 km/h. De esta forma, se comprobó experimentalmente si cada uno de los vehículos sufría alguna desconexión, cediendo el control al conductor, registrando su localización o punto kilométrico (PK). Durante una cierta distancia posterior a cada desconexión, se mantenía el control manual hasta que el sistema automatizado recobraba el control, quedando igualmente registrada esa localización.

De este modo, para cada vehículo automatizado se registraron las zonas

Tabla 1. Velocidad automatizada observada en curvas.

Radio (m)	BMW 5	VW Tiguan	AUDI Q2
254	75	83	90
260	77	90	95
300	70	90	90
317	97	93	93
402	80	93	100
459	97	100	105
550	100	100	105
606	93	100	105
662	120	120	120
725	120	120	120
2.057	120	120	120

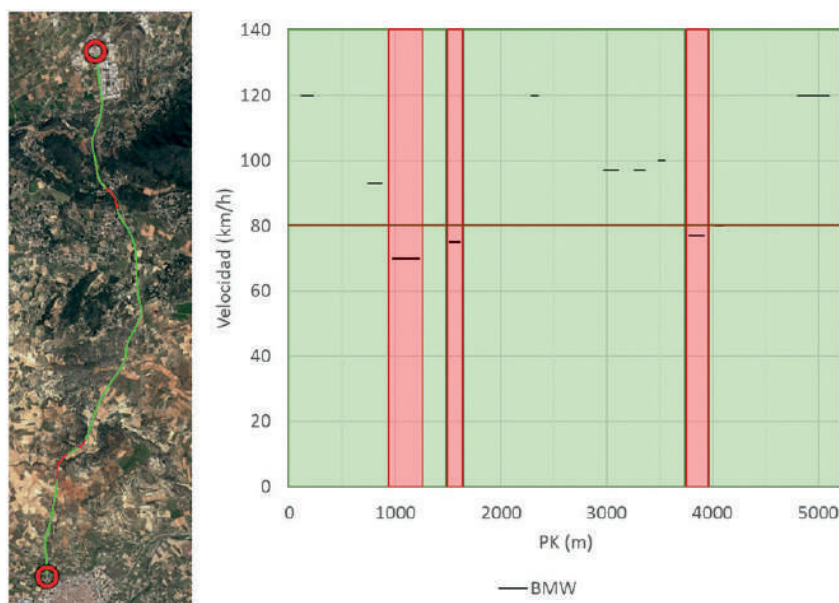


Figura 4. Zonas compatibles con el ODD para el BMW circulando a 80 km/h.

compatibles con sus ODDs, desde el punto donde el sistema automatizado recupera el control hasta el siguiente punto de desconexión. Entre los sucesivos ODDs aparecen zonas de no automatización o control manual del conductor. Para una velocidad de 70 km/h, ninguno de los vehículos sufrió desconexiones, por lo que todos ellos presentaron un único ODD, abarcando todo el tramo. En cambio, desarrollando una velocidad de 80 km/h, sí aparecieron algunas desconexiones, asociadas a las curvas con una velocidad automatizada inferior a la

velocidad constante de 80 km/h. De esta forma, para el BMW se registraron cuatro zonas compatibles con su ODD, mientras que el VW y el Audi no sufrieron desconexiones (es decir, todo el recorrido era compatible con su ODD). La Figura 4 representa los ODDs para el BMW circulando a 80 km/h (en verde las compatibles con su ODD, y en rojo aquellas zonas en las que el sistema estaba desconectado).

La Figura 5 representa las zonas compatibles con los ODDs corres-

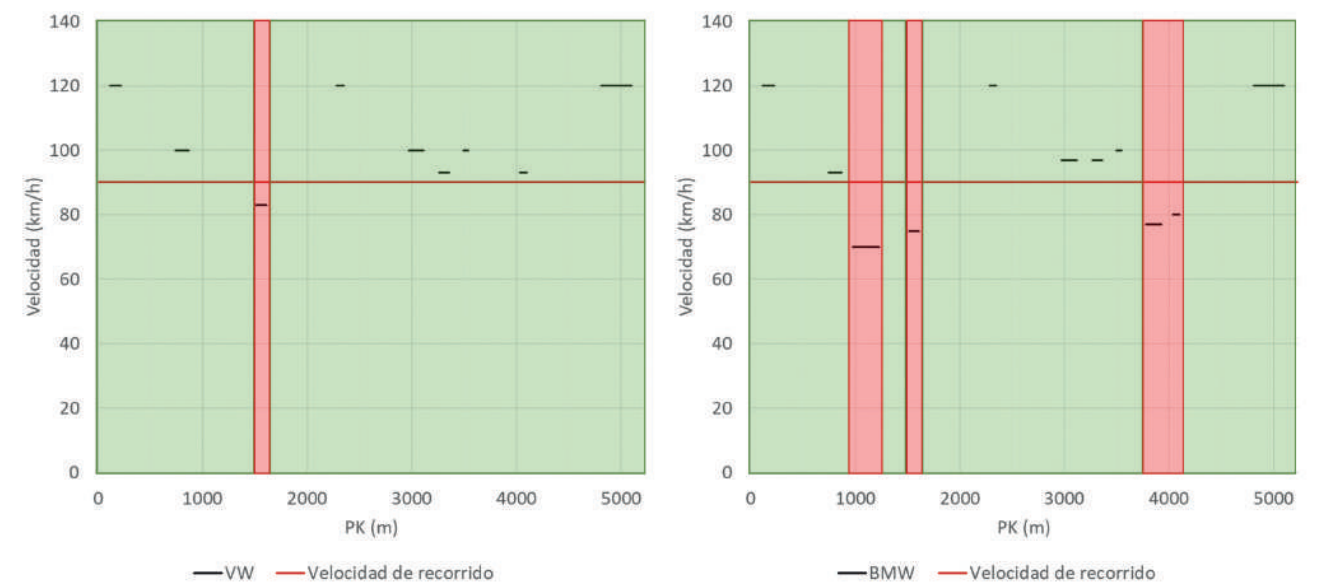


Figura 5. Zonas compatibles para los ODDs para el VW y el BMW a 90 km/h.

pondientes a cada uno de los vehículos empleados circulando a una velocidad de 90 km/h, es decir, a la velocidad límite del tramo de carretera estudiado. En este sentido, se puede observar como el BMW resultó tener de nuevo cuatro zonas compatibles, pero disminuyendo la longitud del último de ellos, y el VW dos. Por su parte, el Audi todavía fue capaz de realizar el tramo completo sin registrar ninguna desconexión.

Todos estos resultados, de forma global a lo largo de todo el tramo analizado, supusieron diferente extensión

de las zonas de control manual del conductor. La Tabla 2 recoge las sumas de longitudes de esas zonas sin funcionamiento automatizado para cada vehículo y para cada velocidad objetivo, así como la longitud total del conjunto compatible con sus ODDs. Adicionalmente, se expresan las zonas de control manual en porcentaje del desarrollo total.

Este ejemplo ilustrativo del concepto de ODD indica con claridad que cada sistema automatizado de conducción presentará en un determinado tramo diferente compor-

tamiento, en función del ODD establecido por el nivel de desarrollo tecnológico de su sistema de guiado y control lateral. Además, se demuestra que la velocidad que se adopte como referencia para la definición del ODD del vehículo automatizado debe ser explicitada en su descripción porque condiciona significativamente el funcionamiento. Esta velocidad nunca debería ser inferior al límite de velocidad establecido para la sección de carretera.

Tabla 2. Identificación y análisis de ODDs según velocidades de circulación.						
Coche	Velocidad constante (km/h)	Número	Longitud (m)		Porcentaje (%)	
		ODDs	ODDs	Zona Control Manual	ODDs	Zona Control Manual
BMW 5	70	1	5.227	0	100,0	0,0
	80	4	4.246	981	81,2	18,8
	90	4	3.952	1.275	75,6	24,4
VW Tiguan	70	1	5.227	0	100,0	0,0
	80	1	5.227	0	100,0	0,0
	90	2	5.077	150	97,1	2,9
AUDI Q2	70	1	5.227	0	100,0	0,0
	80	1	5.227	0	100,0	0,0
	90	1	5.227	0	100,0	0,0

6. Conclusiones

Cada vehículo automatizado tiene asociado un Dominio de Diseño Operativo (ODD) en función del diseño de su sistema automatizado de conducción, de tal forma que, si ese vehículo se enfrenta en sus recorridos a las condiciones específicas fijadas para su ODD, podrá mantener una conducción automatizada segura.

Los factores y atributos que definen el ODD son muy variados, pero si el vehículo encuentra una situación o condición que se salga de ese conjunto de restricciones se producirá la finalización de ese ODD, con la desconexión del sistema automatizado y la cesión del control al conductor.

La gestión de los ODDs abarca todo el proceso, desde el diseño que imprime las características propias de los ODDs para cada vehículo, hasta las verificaciones controladas y las validaciones finales una vez ya está circulando ese vehículo. Todo ello es fundamental para garantizar la seguridad de este tipo de vehículos, siendo lo más crítico el diseño y la verificación de cómo el sistema automatizado reacciona y actúa ante una finalización de un ODD.

Se trata del diseño de las maniobras posibles para lograr una condición o localización de riesgo mínimo. La selección de las maniobras apropiadas, de menor riesgo, dependerá de: (i) las condiciones de funcionamiento del vehículo, (ii) las condiciones ambientales y operacionales existentes en la sección de la carretera en ese momento y (iii) del marco normativo de circulación.

Para aprovechar todos los beneficios de la conducción automatizada, se debe maximizar la longitud de las zonas compatibles con su ODD y evitar las transiciones entre automatizado y manual, es decir, maximizar la continuidad del estas en el espa-

cio y el tiempo. Pero, como siempre habrá múltiples causas para la desconexión, el vehículo debe saber cuándo se acerca al final de cada zona, para lo que harán falta alertas de aproximación a los límites correspondientes mediante mapas de alta definición digitales y dinámicos.

Un sistema automatizado debe poder lograr una condición de riesgo mínimo, como apartarse y detenerse en el arcén derecho, si detecta algún problema con su propio funcionamiento o por condiciones externas que impidan una operación segura. Se trata, por tanto, de una detención segura, no una detención de emergencia. Una respuesta preventiva dinámica para un vehículo automatizado de nivel 3 es la intervención humana, cediéndole el control al conductor. En el supuesto de que el conductor no actuara, se iniciaría una tarea dinámica de conducción por parte del sistema automatizado para buscar una condición o localización de riesgo mínimo. Esto último se hace imprescindible para un vehículo de nivel de automatización 4 o 5, ya que ha de ser el propio sistema automatizado el que ha de ejecutar completamente una acción dinámica de retirada del vehículo para minimizar los riesgos.

Por tanto, se hace imprescindible avanzar en el estudio, las discusiones y los acuerdos para ir resolviendo los problemas y limitaciones de la gestión de los ODDs y, en particular, de la finalización de los mismos, donde todos los agentes implicados participan, no solo las empresas automovilísticas. La seguridad robusta de los sistemas automatizados de niveles avanzados dependerá en gran medida de que se garanticen reacciones y maniobras dinámicas seguras, que lleven a estos vehículos a condiciones y localizaciones de riesgo mínimo para el conjunto de la circulación, no solo para el propio vehículo afectado.

Referencias

BSI (2020). PAS 1883:2020. Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification. Centre for Connected & Autonomous Vehicles, The British Standards Institution, London.

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

Liu, Y., Tight, M., Sun, Q., & Kang, R. (2019). A systematic review: Road infrastructure requirement for connected and autonomous vehicles (CAVs). In *Journal of Physics: Conference Series*, 1187(4), 042073.

SAE (2018). J3016_201806: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE International, US.

SAE (2021). J3016_202104: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE International, US.

Svensson, L., Masson, L., Mohan, N., Ward, E., Brenden, A. P., Feng, L., & Törngren, M. (2018). Safe stop trajectory planning for highly automated vehicles: An optimal control problem formulation. In *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 517-522.

Thatcham Research (2019). Defining Safe Automated Driving. Thatcham Research, United Kingdom.

Transport Systems Catapult (2017). Future Proofing Infrastructure for Connected and Autonomous Vehicles. Technical Report.

World Economic Forum (2020). Autonomous Vehicle Policy Framework: Selected National and Jurisdictional Policy Efforts to Guide Safe AV Development. ❖