

El Dominio de Diseño Operativo para los Vehículos Automatizados



The Operational Design Domain for Automated Vehicles

Alfredo García

Catedrático

Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC)

Universitat Politècnica de València

Francisco Javier Camacho Torregrosa

Profesor Titular de Universidad

GIIC – Universitat Politècnica de València

David Llopis Castelló

Profesor Ayudante Doctor

GIIC – Universitat Politècnica de València

Revisado por el **Comité Técnico de Planificación, Diseño y Tráfico**

Asociación Técnica de Carreteras.

Los vehículos automatizados están diseñados para mantener el control, tanto longitudinal como lateral, a lo largo de una sección de una carretera si se dan unas determinadas condiciones favorables, en el momento de circular por ella. Esas condiciones propicias para su funcionamiento seguro es lo que se denomina Dominio de Diseño Operativo (ODD). Para un mismo tramo de carretera, cada vehículo automatizado puede tener diferentes zonas compatibles con su ODD, constituyendo diversas secciones inconexas que resultan compatibles con su sistema de conducción automatizada.

La definición del ODD para un determinado vehículo automatizado va a depender de toda una serie de factores o condiciones operativas que le permitan iniciar y mantener el control automatizado. Se pueden distinguir entre factores estáticos o fijos y dinámicos o variables. Si aparece una condición fuera del rango definido en el ODD, ese vehículo desconectará y transferirá al conductor el control o, en niveles SAE

más elevados, tendrá que desarrollar unas tareas dinámicas por sí mismo para llevar al vehículo a una situación de riesgo mínimo. Hasta ahora, solo ha habido tres propuestas de taxonomía de los factores y atributos a tener en cuenta para la definición de un ODD, pero los fabricantes todavía no tienen que cumplirlas.

Para aprovechar todos los beneficios de la conducción automatizada, se debe maximizar la longitud del ODD y minimizar las transiciones entre automatizado y manual, es decir, maximizar la continuidad del ODD en el espacio y el tiempo. Conforme se avance en los niveles de automatización, se van a propiciar ODDs más robustos y extensos, siendo necesario disponer de información detallada sobre la localización de las finalizaciones de los ODDs para advertir al conductor con antelación suficiente que ha de recuperar el control.

Automated vehicles are designed to maintain both longitudinal and transverse control along a road section under certain favorable conditions. The conditions that provide a safe operation are referred as the Operational Design Domain (ODD). Along a certain road segment, each automated vehicle may have its own ODD-compliant sections, i.e., several unconnected road sections that are compatible with its automated driving system.

The definition of an ODD for a given automated vehicle is established upon different factors or operational conditions that allow it to initiate and maintain the automated control. Regarding this, a distinction can be drawn between static or fixed factors and dynamic or variable factors. If a condition out the ODD occurs, the vehicle will either experience a disengagement and transfer control to the driver or, for high

SAE levels, the vehicle will have to perform the dynamic tasks own to achieve a minimum risk condition. So far, there have only been three proposed taxonomies of factors and attributes to be considered for the definition of an ODD but automakers do not yet have to comply with them.

To take advantage of all benefits related to automated driving, the length of the ODD-compliant sections must be maximized. Transitions between automated and manual driving must be reduced in number, too. This results in maximizing the continuity of the ODD in space and time. As automation levels evolve, more robust and longer ODD-compliant sections will show up. Detailed information about the location of ODD terminals will be also needed, to warn drivers with sufficient time to take over control.

1. Introducción

La aparición de los sistemas automatizados de conducción, con sus cinco niveles de automatización, y la creciente venta de vehículos de nivel 2 (vehículos semiautónomos capaces de controlar simultáneamente el movimiento longitudinal y lateral dentro del carril, entre otras asistencias), implica la necesidad de analizar las características de la infraestructura viaria para detectar qué elementos y condiciones pueden suponer una limitación al despliegue seguro de los vehículos automatizados, pensando también en los niveles superiores de automatización que se aproximan al mercado.

Adicionalmente, aparecen otros factores que pueden condicionar que un sistema automatizado de conducción no sea capaz de mantener el control del vehículo. Entre todos ellos, cabe destacar: (i) el tipo de vía; (ii) las características del tráfico o ambientales; (iii) el rango de velocidades; (iv) los incidentes o accidentes; (v) las obras en la vía o actuaciones de mantenimiento.

Por tanto, los niveles 2 y 3 de conducción semiautónoma requieren la presencia y la supervisión continua

del conductor, quien debe estar en condiciones de asumir el control de forma rápida cuando el sistema automatizado le ceda el mismo debido a alguno de los factores anteriores. Estos eventos se conocen comúnmente como desconexiones y constituyen uno de los principales problemas para la seguridad del sistema de conducción automatizada.

Para el año 2022 se espera que ya circulen en todo el mundo 638.000 vehículos automatizados, mientras que en 2030 se estima que las ventas de este tipo de vehículo representen el 12% de todo el sector automovilístico (ERF, 2020). En este contexto, se espera que en 2035, un 20% del parque mundial de estos vehículos esté en Europa (Figura 1).

Actualmente, el nivel de madurez en el mercado de este tipo de vehículos es muy variable dentro de una misma región (Figura 2). En el caso concreto de Europa, países como Suecia, Holanda o Reino Unido van en la cabeza en lo que a movilidad autónoma y conectada se refiere. En el lado opuesto se encuentra España, con un nivel de madurez de 1 en una escala de 0 a 4 (ERF, 2020).

De hecho, según el Reglamento (UE) 2019/2144 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2019, todos los vehículos que se homologuen a partir de julio del 2022 deberán cumplir con lo establecido en el Reglamento, suponiendo que todos los vehículos que se vendan desde entonces tendrán como

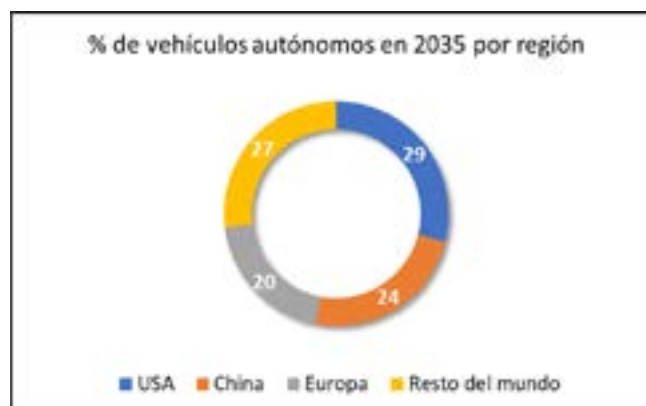


Figura 1. Vehículos autónomos alrededor del mundo en 2035. Fuente: (Wagner, 2020).

mínimo un nivel 2 de automatización, es decir, serán vehículos semiautónomos. Esto propiciará, al menos en Europa, la renovación más acelerada del parque hacia los vehículos automatizados.

Pese a que, en el actual desarrollo de los sistemas de asistencia a la conducción, los fabricantes de automóviles y los desarrolladores de componentes están considerando la nula necesidad de adaptar la infraestructura, los niveles superiores de automatización de la conducción sí se verían ampliamente beneficiados con ciertas mejoras de las carreteras. Tanto para el nivel de automatización 2 actual en el mercado como, sobre todo, para los niveles 3 y 4 de automatización, existen adecuaciones, complementos y modificaciones de la infraestructura viaria que permitirán optimizar el nivel de automatización y la movilidad por carretera en general.

En este sentido, la adaptación de la infraestructura fomentará una implementación más extensa y rápida del nivel 4 de conducción autónoma, lo que permitirá alcanzar grandes beneficios en seguridad vial y funcionalidad. Todo ello solo será posible con los necesarios desarrollos e implementaciones de infraestructura digital y de conectividad que puedan facilitar la información necesaria, en tiempo real, para que los vehículos automatizados puedan extender sus ámbitos de funcionamiento seguro y sean capaces de desplegar los niveles superiores de automatización (niveles 4 y 5).

Por tanto, una infraestructura vial adaptada al vehículo autónomo y conectado y coordinada con su avance tecnológico es fundamental para el desarrollo de una movilidad conectada, autónoma y sostenible. Dicho de otra manera, la infraestructura debe ocupar un lugar central para el desarrollo de la nueva movilidad,



Figura 2. Nivel de madurez en movilidad autónoma y conectada en Europa. Fuente: (ERF, 2020).

posibilitando la transición ecológica y energética, que es una prioridad de la Unión Europea (Green Deal). Sin embargo, la mayoría de los países europeos están más centrados en la movilidad en sí que en lo que es la propia infraestructura vial y el papel fundamental que ha de seguir teniendo. No obstante, esto podría representar una ventana de oportunidad para que el sector de la carretera demuestre cómo estos cambios se facilitan también mediante adaptaciones de la infraestructura vial existente (ERF, 2020). Así pues, el mantenimiento y la adaptación de la infraestructura vial actual juega un papel esencial para promover el desarrollo de una nueva movilidad.

2. Concepto

Los vehículos automatizados están diseñados para mantener el control a lo largo de una sección de una carretera si se dan unas determinadas condiciones favorables, en el momento de circular por ella. Esas secciones propicias para un funcionamiento seguro de un vehículo automatizado es lo que 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 puede funcionar de forma segura a lo largo de una sección de la carretera manteniendo el control del mismo, tanto longitudinal como lateral.

Por tanto, un ODD define, de forma particular, cuándo, dónde y bajo qué condiciones un determinado vehículo automatizado puede operar de manera autónoma, asumiendo el control total del movimiento longitudinal y lateral del vehículo. Igualmente, de forma específica o complementaria, también determina aquellas condiciones con las que no garantiza su operación. Todo ello según el diseño de ese vehículo y su sistema de automatización.

La Sociedad de Ingenieros de Automoción de EE.UU. (SAE, Society of Automotive Engineers) define el ODD como “las condiciones específicas bajo las cuales un sistema dado de automatización de la conducción, o un elemento del mismo, está diseñado para funcionar, incluidos, entre otros, los niveles de conducción” (SAE, 2018).

Otra definición de un ODD es “una descripción de las condiciones operativas específicas con las que el

sistema de conducción automatizado está diseñado para funcionar correctamente, incluidos, entre otros, el tipo de carretera, el rango de velocidad, las condiciones ambientales (meteorológicas, diurnas/nocturnas, etc.), las leyes y reglamentos de tráfico vigentes, y otras posibles restricciones” (Waymo, 2017).

El Vocabulario desarrollado por la British Standards Institution (2020) incluye el ODD como “las condiciones operativas –ambientales, geográficas, horarias, presencia o ausencia de ciertas condiciones de tráfico o características de la vía– sobre las que está diseñado un sistema de conducción automatizada, o elemento del mismo, para que pueda funcionar”.

Como se puede apreciar, las definiciones que existen de ODD se centran en el vehículo automatizado y en cómo está diseñado para que sea capaz de operar de forma automática y segura en ciertos ámbitos y condiciones. De este modo, la carretera y su entorno, que son los aspectos que mayor interés pueden despertar en las administraciones de carreteras, no se incluyen de manera explícita en estas definiciones.

En ese otro sentido, se podría definir un ODD como una sección de carretera que reúne una serie de características que propician, durante un cierto periodo de tiempo, el funcionamiento de un determinado sistema automatizado de conducción. Por tanto, la clave está en las limitaciones que puedan existir en la interacción entre un vehículo automatizado y la infraestructura de la carretera, además de diversos factores de entorno o variables. Probablemente pueda ser más claro el concepto no solo diciendo lo que incluye sino también lo que excluye, es decir, los factores y umbrales que provocan la desconexión del sistema y hacen que el ODD termine.

También es importante resaltar de las definiciones que puede haber un ODD global del sistema automatizado, pero puede haber diferentes ODDs correspondientes a los diversos elementos que configuran el sistema automatizado. Así, el ODD general del sistema estaría formado por la intersección de los factores y atributos de todos los ODDs parciales.

Algunos ejemplos iniciales de factores que influyan en la localización de un ODD pueden ser, entre otros: el tipo de vía, el entorno, las características de la vía, las condiciones del tráfico y la máxima velocidad del vehículo automatizado que le corresponda al ODD.

Para un mismo tramo de carretera, cada vehículo automatizado puede tener sus propios ODDs, es decir, diversas secciones inconexas de esa carretera que resultan compatibles con su sistema de conducción semiautónomo. Son inconexas

porque no tienen continuidad, es decir, están aisladas, y, además, se pueden deber a factores limitantes distintos.

La Figura 3 muestra el concepto de ODD en un diagrama espacio-tiempo. Cuando ocurre una desconexión (destacado con un círculo rojo), el vehículo automatizado no es capaz de seguir operando autónomamente durante un cierto periodo de tiempo (t_i) y, por tanto, en una sección de cierta longitud (s_i), hasta que el sistema vuelve a recuperar el control, entrando en el siguiente ODD.

Si se producen múltiples desconexiones, habrá muchos ODDs cortos, requiriendo con bastante frecuencia el control manual del conductor. Estos eventos siempre suponen un cierto riesgo porque, aunque se requiere de la presencia y supervisión continua del conductor para estar en condiciones de asumir el control de forma rápida, se pueden

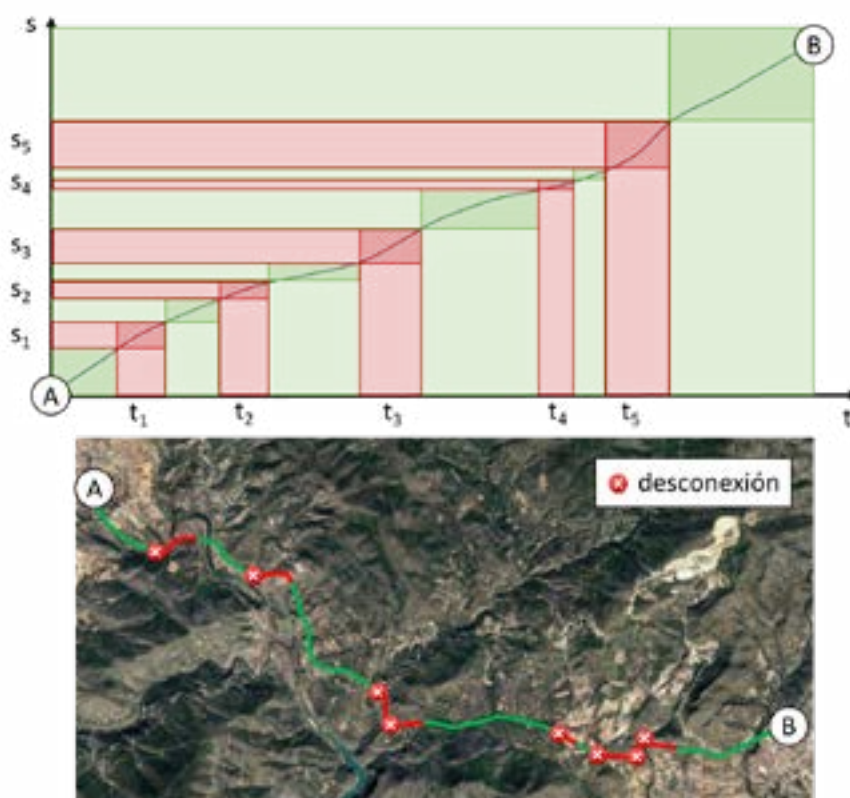


Figura 3. ODDs frecuentes.

producir demoras en la aplicación de las acciones necesarias, como, por ejemplo, girar el volante para que el vehículo no se salga del carril por donde circula. Hay que recordar que la transferencia de control desde el vehículo es un evento inesperado por el conductor, produciendo una sorpresa y por ello requiriendo un mayor tiempo de reacción.

Para ello, se requiere una interfaz entre el sistema y el conductor (HMI, Human Machine Interface) que advierta de forma eficaz al conductor cuándo precisa su intervención. Sin embargo, el nivel de desarrollo actual de los sistemas automatizados que se encuentra en el mercado produce cesiones de control con cierta frecuencia, de modo que el HMI no incluye suficientes y eficaces avisos, con el objetivo de no generar molestias y distracciones constantes en los conductores. Esta falta de avisos provoca que los tiempos de respuesta de los conductores aumenten y el riesgo sea mayor (Dogan et al., 2017; Shen et al., 2017).

Por tanto, si hay frecuentes, pero cortos, ODDs, el conductor optará normalmente por desconectar el sistema automatizado y desarrollar una conducción manual o, como mucho, ejercer una supervisión directa y continua sobre el sistema automatizado (equivalente a una conducción manual). Un ejemplo de esto último sería mantener el volante con fuerza y ejecutar los movimientos necesarios para los cambios de dirección –ya sea en secciones curvas o para no salirse del carril en secciones rectas–, a pesar de que el propio sistema automatizado también esté actuando sobre el volante al mismo tiempo.

En cambio, si en un tramo de carretera suficientemente largo solo hubiera dos ODDs (ver Figura 4) porque el primero de ellos termina de repente al aparecer un factor li-

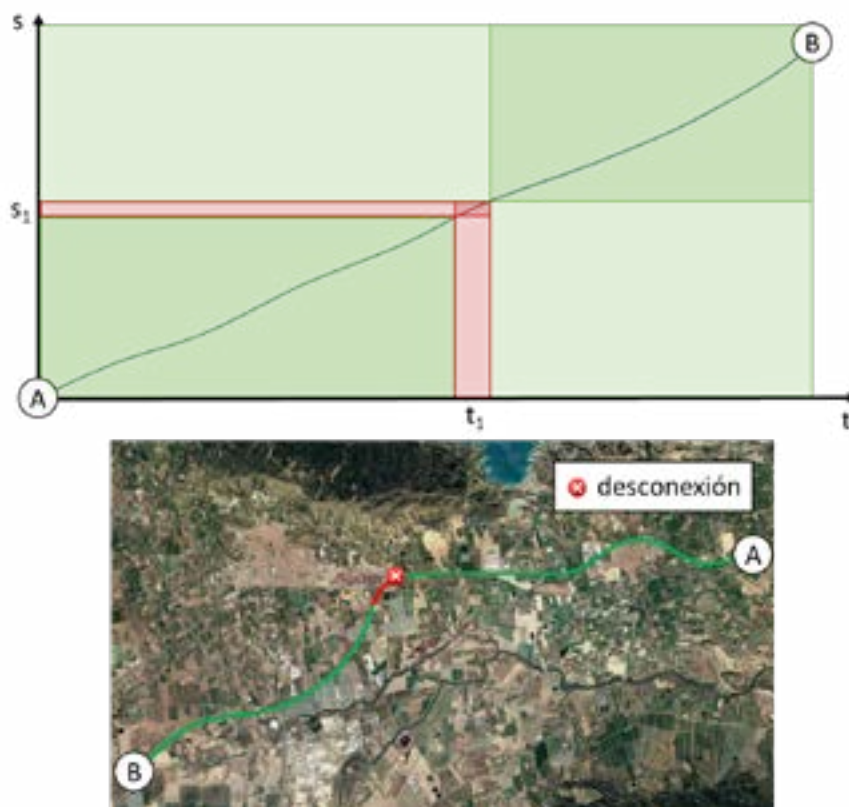


Figura 4. ODDs largos.

mitante que le provoca una desconexión, el problema anterior se convierte en mucho más peligroso. El conductor observa que el sistema automatizado mantiene el control de forma prolongada y, conforme el ODD sea más largo, su expectativa es que lo siga haciendo. Al surgir repentinamente el factor que produce la desconexión, esta será contraria a su expectativa ad hoc por lo que aparece una inconsistencia que hace que el tiempo de percepción y reacción del conductor aumente, con el riesgo consiguiente.

Por tanto, conforme se avance en los niveles de automatización, que van a propiciar ODDs más robustos y extensos, se hace necesario disponer de información detallada sobre la localización de las finalizaciones de los ODDs para advertir al conductor con antelación suficiente que ha de recuperar el control. Esto se podría hacer mediante mapas HD dinámicos y conectividad con el ve-

hículo, es decir, pasando el vehículo a ser un vehículo automatizado y conectado.

Todos los niveles de automatización, excepto el más avanzado –nivel 5–, presentan un ODD limitado por diversos factores o atributos. Esto supone que solo los vehículos puramente autónomos –nivel 5– serán capaces de operar por toda la red viaria de un determinado ámbito geográfico, es decir, que su dominio de diseño operativo será realmente una zona operativa.

3. Factores

La definición de un ODD para un determinado vehículo automatizado va a depender de toda una serie de factores o condiciones operativas que le permitan iniciar y mantener el control automatizado. Si aparece una condición fuera del rango definido en el ODD, ese vehículo des-

conectará y transferirá al conductor el control o, si el conductor no responde, tendrá que desarrollar unas tareas dinámicas por sí mismo para llevar al vehículo a una situación de riesgo mínimo.

Por tanto, los factores o condiciones operacionales de un ODD son fundamentales y pueden ser diversos y atender a clasificaciones distintas. Se pueden distinguir entre factores estáticos o fijos y dinámicos o variables. Los primeros se refieren a la infraestructura física y digital, mientras que los dinámicos se deben a las condiciones de entorno y a la propia operación de la carretera, tanto desde el punto de vista de la circulación de los vehículos y usuarios, como de la explotación y conservación de la carretera.

Otra clasificación los agrupa en factores internos y externos (Gyllenhammar et al., 2020). Los factores internos se refieren a las condiciones relativas al propio sistema automatizado y a su usuario, es decir, al conductor. Por otra parte, los factores externos se deben a las propias condiciones del escenario vial, del entorno, de los elementos cambiantes o dinámicos y de la conectividad.

Algunos ejemplos de ámbitos que agrupan los factores o condiciones operativas son los siguientes: (i) área geográfica o ámbito; (ii) tipología de carretera; (iii) características de la infraestructura física; (iv) características de la infraestructura digital; (v) condiciones del entorno; (vi) conectividad; (vii) condiciones del tráfico; (viii) condiciones de la gestión de la carretera, incluyendo accidentes, incidentes, eventos, actuaciones y obras.

Otro factor fundamental es el rango de velocidades del vehículo automatizado para que el ODD se pueda activar y mantener. Actualmente, algunos de los sistemas que incorporan los vehículos semiautó-

nomos –p. ej., control lateral del vehículo– no se activan por debajo de cierta velocidad, y, al mismo tiempo, existe una velocidad máxima que en caso de ser superada el vehículo ya no será capaz de operar de manera autónoma en ciertos elementos geométricos que haya en el ODD –p. ej., curvas en planta–.

En el siguiente apartado se recoge un desglose de los múltiples factores y atributos o características de los mismos que son necesarios para poder definir de forma completa y detallada el ODD de un determinado vehículo automatizado.

4. Taxonomía

La conducción automatizada verdaderamente segura dependerá de la definición de la lista exhaustiva de múltiples condiciones y factores superpuestos que puede encontrar y manejar un determinado vehículo automatizado para seguir operando como tal a lo largo de una sección de carretera.

Hasta ahora, solo ha habido tres propuestas de taxonomía de los factores y atributos a tener en cuenta para la definición de un ODD: de la British Standards Institution (BSI, 2020), de la Plataforma Europea de ITS (EU EIP, 2020), y de la Sociedad de Ingenieros de Automoción de EE.UU. (SAE, 2020). La primera es la referencia más importante al formar parte de una norma ya aprobada, mientras que las otras son propuestas.

Además, se está elaborando la norma ISO/AWI 34503: Road vehicles — Taxonomy for operational design domain for automated driving systems (ISO, 2021). Otra iniciativa de normalización se está desarrollando a través del proyecto ASAM OpenODD (ASAM, 2021), en la que se pretende definir un formato, con

una sintaxis y una semántica bien definidas, que pueda representar un ODD y que sea procesable computacionalmente durante todo el desarrollo del vehículo y su ciclo de vida. Este trabajo plantea, adicionalmente, su integración en simulaciones de conducción para llevar a cabo pruebas de verificación, que permitan que las especificaciones de los ODDs sean medibles y verificables.

4.1. Taxonomía de la Institución Británica de Normalización (BSI)

La clasificación propuesta por la BSI distingue, en un primer nivel, entre: (i) el escenario, (ii) las condiciones de entorno y (iii) los elementos dinámicos. Lo que denominan escenario, se refiere a la infraestructura física, es decir, incluyendo todos los elementos fijos de la vía y sus márgenes. Las condiciones de entorno consisten en situaciones o condiciones añadidas, tanto de tipo ambiental como todo lo relacionado con la conectividad. Por su parte, los elementos dinámicos son todos aquellos elementos móviles, relacionados con la circulación de los diversos usuarios.

El escenario se clasificará en los siguientes ámbitos: (i) zonas, (ii) área de conducción, (iii) nudos, (iv) estructuras especiales, (v) estructuras viales fijas y (vi) estructuras viales temporales.

Las zonas incluyen configuraciones especiales de vías que pueden diferir de las condiciones típicas de conducción o áreas con normas de conducción o condiciones ambientales específicas. Estas incluyen áreas con límites georreferenciados, zonas de gestión del tráfico, zonas escolares, regiones o estados y zonas de interferencia para la señal de posicionamiento.

El área de conducción se clasificará en los siguientes atributos:

- Tipología viaria:
 - o Autopistas/autovías.
 - Con gestión dinámica del tráfico (ITS).
 - Sin gestión dinámica del tráfico.
 - o Carreteras radiales o principales.
 - o Carreteras distribuidoras.
 - o Carreteras locales.
 - o Ramales de conexión.
 - o Áreas de estacionamiento.
 - o Áreas de coexistencia o compartidas.
- Geometría:
 - o Planta:
 - Rectas.
 - Curvas.
 - o Alzado:
 - Rampas.
 - Pendientes.
 - Zonas llanas.
 - o Sección transversal:
 - Calzadas separadas.
 - Calzada única.
 - Pavimentos.
 - Barreras de contención.
 - Tipos de carriles unidos.
- Carriles:
 - o Dimensiones.
 - o Marcas viales.
 - o Tipo de uso.
 - o Número de carriles.
 - o Sentido de circulación.
- Señalización (fija o variable):
 - o Señales informativas.
 - o Señales reglamentarias.
 - o Señales de advertencia.
- Bordes de la calzada:
 - o Resaltos y marcadores en línea de borde.
 - o Arcén (pavimentado o granular).
 - o Arcén con hierba.
 - o Barreras o límites rígidos.
 - o Marcadores temporales.
 - o Ninguno.

- Superficie del pavimento:
 - o Tipo: suelta, discreta o uniforme.
 - o Características superficiales: grietas, baches, roderas u ondulaciones.
 - o Condiciones: hielo, inundación, espejismo, nieve, agua estancada, mojado, contaminada.

En los nudos se incluyen las glorieta, las intersecciones y los enlaces. Las glorieta se separan entre normales, compactas, dobles, grandes y miniglorieta. Además, se diferencia entre semaforizadas y no semaforizadas. Las intersecciones se clasifican en intersección en T, intersección desalineada o descompuesta, intersección en Y e intersección sin canalización.

Respecto a las estructuras especiales, se distinguen controles de acceso automático, puentes, pasos de peatones, pasos a nivel ferroviarios, túneles y peajes. Las estructuras viales fijas incluyen edificaciones, alumbrado público, mobiliario urbano y vegetación. Por su parte, las estructuras viales temporales se clasifican en desvíos de obra, recogida de basura, obras viales y señalización vial temporal por accidentes, emergencias o eventos.

Las condiciones de entorno incluyen la (i) meteorología, (ii) las partículas en suspensión, (iii) las condiciones de iluminación y (iv) la conectividad. Dentro de las condiciones meteorológicas, se distinguen el viento, la lluvia y la nieve. Todas ellas requieren que los responsables definan unas escalas según variables asociadas. Por ejemplo, para el viento se podrá usar la velocidad media (m/s) durante un cierto periodo (entre 2 y 10 minutos) y la velocidad de las rachas (m/s); para la lluvia se debe emplear la intensidad en mm/h; mientras que la nieve se considerará por la restricción de visibilidad inferida.

Las partículas en suspensión también se han de tener en cuenta a través de la restricción de visibilidad que provocan, así como al tipo, distin-

guiendo entre marinas, niebla, arena y polvo, humo y contaminación y ceniza volcánica.

La iluminación se clasifica según día, noche o crepúsculo, nublado e iluminación artificial. Durante el día, se usan dos atributos: la elevación del sol sobre el horizonte y la posición relativa del sol con respecto al vehículo (delante, detrás, a la derecha o a la izquierda).

La conectividad se clasifica a través de la comunicación y el posicionamiento. La comunicación ha de distinguirse entre V2V y V2I (aunque también puede ser V2X), con el detalle de qué tipo: celular (#G), satélite, DSRC o ITS-G5. El posicionamiento puede ser por Galileo, GLONASS o GPS. En ambos casos, puede haber atributos adicionales relacionados con la potencia de la señal y las interferencias, así como la cobertura.

Los elementos dinámicos se han de clasificar respecto a (i) la circulación y (ii) al vehículo objeto de la definición o verificación del ODD. La circulación, a su vez, se clasifica en densidad de usuarios, volumen de tráfico, intensidad, tipo de usuario (incluyendo usuarios vulnerables, en su caso) y presencia de vehículos especiales (p. ej., ambulancias o vehículos policiales). Respecto al vehículo, hay que definir el rango de velocidades para el que el ODD sería operativo. Además, se le pueden atribuir otras características limitantes, como la capacidad de cambiar de carril, de girar a la derecha o a la izquierda, entre otras.

4.2. Taxonomía de la Plataforma Europea ITS (EU EIP)

La taxonomía de la Plataforma Europea ITS hace otro tipo de clasificación de primer nivel, distinguiendo entre: (i) la infraestructura física, (ii) la infraestructura digital, (iii) la infraestructura de comunicación y (iv) las operaciones y mantenimiento de infraestructura.

En la infraestructura física proponen distinguir los siguientes atributos: (i) tipo de vía; (ii) geometría y visibilidades; (iii) secciones especiales; (iv) calzadas y carriles; (v) arcones y espacios junto a bordillos; (vi) pavimentos; (vii) marcas viales; (viii) enlaces, intersecciones, conexiones y trenzados; (ix) señales de tráfico; (x) equipamiento vial; (xi) instalaciones o elementos viarios para usuarios vulnerables; y (xii) rango de velocidades.

Para la infraestructura digital se distinguen los siguientes factores: (i) posicionamiento; (ii) sistema dinámico de información de tráfico; (iii) mapas HD; y (iv) estado de la operación del tráfico en la red de carreteras en tiempo real.

La infraestructura de comunicación requerirá unidades o balizas al lado o sobre la carretera (RSU, Road Side Unit) para las comunicaciones básicas de corto alcance (V2I) conectadas troncalmente a diferentes servidores mediante cableado de fibra óptica. Además, las comunicaciones de medio y largo alcance entre vehículos e infraestructura serán a través de redes celulares con cobertura muy amplia.

Respecto al ámbito de las operaciones y mantenimiento de infraestructura, se tiene en cuenta todo lo relacionado con: (i) la gestión y control cooperativo del tráfico; (ii) los incidentes y eventos; (iii) las obras en carreteras; (iv) las actuaciones de conservación y mantenimiento de la infraestructura; y (v) la supervisión de flotas de vehículos automatizados y conectados.

4.3. Taxonomía de la Sociedad de Ingenieros de Automoción de EE.UU. (SAE)

La SAE publicó en 2020 un informe donde se propone un marco conceptual y una nomenclatura para la definición y publicación de los ODDs por parte de las empresas automovilísticas. Se trata de un planteamiento

para una comprensión realista de las condiciones del entorno de la carretera, de la geometría de la misma y de su infraestructura física, así como de las zonas y los comportamientos de los otros usuarios de la carretera.

Se trata de identificar, en primer lugar, la red de carreteras y rutas sobre las que puede operar el vehículo automatizado. Luego, hay que caracterizar la infraestructura física de esas carreteras, con sus condiciones y elementos del entorno relevantes para el funcionamiento del sistema automatizado. En tercer lugar, hay que identificar las limitaciones operativas dentro de esas carreteras, como son, por ejemplo, los obstáculos, objetos, zonas, condiciones o eventos. Por último, se propone que los fabricantes de vehículos formulen y comuniquen claramente la descripción del ODD de cada uno de sus vehículos, en términos de características, elementos y parámetros permisivos y no permisivos, es decir, que habilitan un ODD o que suponen la finalización de uno anterior o la restricción de entrada a ese tramo de carretera que no reúne los mínimos habilitantes para el sistema automatizado definido.

Además, el informe de la SAE proporciona una terminología con el fin de que los fabricantes y desarrolladores puedan utilizar un lenguaje común para describir sus ODDs. En esta se incluyen factores y parámetros para definir: (i) las condiciones ambientales relacionadas con el clima y la meteorología; (ii) las condiciones de la superficie de la carretera; (iii) las restricciones operativas, es decir, otros elementos dentro del entorno operativo no relacionados con las condiciones meteorológicas y atmosféricas; (iv) los posibles usuarios de la vía; (v) los objetos u obstáculos de la carretera no estáticos; y (vi) la conectividad, es decir, la comunicación con otros vehículos, otros usuarios de la carretera e infraestructura, incluidos los centros de operación de las flotas de vehículos automatizados.

5. Caso de Estudio

Para comprender mejor el concepto y la utilidad de los Dominios de Diseño Operativo de un determinado vehículo automatizado, se muestra un estudio real a lo largo de un tramo de carretera convencional de 5,25 km de longitud (Figura 5). 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 7/10. El límite de velocidad está establecido en 90 km/h. El estado de las marcas viales es adecuado para la detección de las líneas de borde de los carriles y no presenta discontinuidades. Igualmente, el estado del pavimento es bueno.

Se llevaron a cabo observaciones a través de múltiples recorridos mediante un vehículo con un sistema automatizado de conducción de nivel 2, el cual permite el control simultáneo del movimiento longitudinal, mediante el sistema de control de crucero adaptativo (ACC, Adaptive Cruise Control), y el movimiento lateral, a través del sistema de asistencia de mantenimiento en carril (LKA, Lane Keeping Assist).

Lo primero que se determinó para cada curva, a través de diversos recorridos de las mismas, fue la velocidad máxima a la que ese sistema era 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. En la Figura 5, se puede observar las diversas velocidades automatizadas en función del radio de la curva (en azul).

Si un vehículo con este sistema automatizado de conducción recorre el tramo a una velocidad constante correspondiente al límite de velocidad –90 km/h–, el sistema no podría funcionar a esa velocidad sin ceder el control en cuatro curvas, creando tres zonas de no automatización, resaltadas en rojo. Las otras zonas verdes son ODDs para este sistema automatizado de conducción y a esa velocidad, ya que el vehículo no cedió el control al conductor.

Como resultado, el vehículo automatizado presentó cuatro zonas compatibles con sus ODDs y tres zonas intermedias que precisaron conducción manual, correspondientes a las cuatro curvas con una velocidad automatizada inferior al límite de velocidad. Esto supuso la desconexión durante 1,275 km del total del desarrollo, es decir, un 24,3% del mismo.

En este caso de estudio, se observó que al entrar en esas cuatro curvas se producían las desconexiones y las correspondientes cesiones del control al conductor. Durante una cierta distancia posterior a cada desconexión, se mantenía el control manual hasta que el sistema automatizado recobraba el control y se iniciaba el siguiente ODD.

Este ejemplo ilustrativo del concepto de ODD indica con claridad que cada sistema automatizado de conducción presentará diferentes ODDs en este tramo según sea 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 explicitado en su descripción porque es un factor clave en el funcionamiento. Esta velocidad nunca debería ser inferior al límite de velocidad establecido hasta ahora.

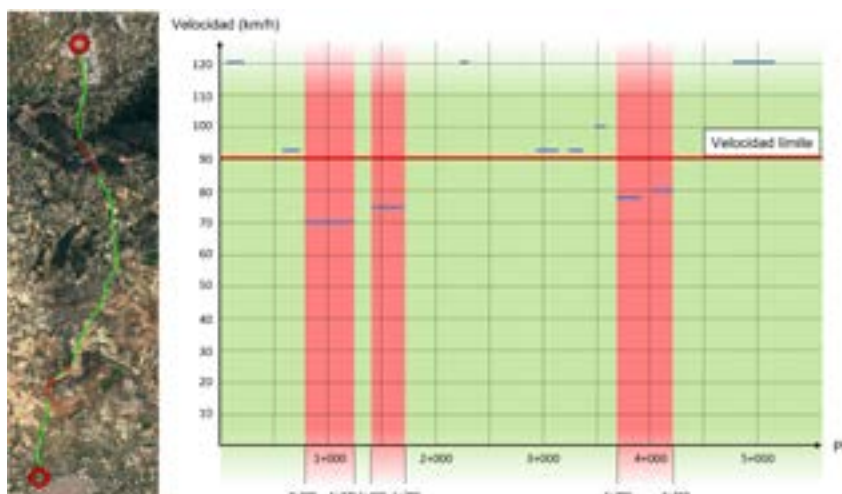


Figura 5. Caso de estudio.

6. Conclusiones

Los vehículos automatizados son capaces de mantener el control a lo largo de una sección de una carretera si se dan unas determinadas condiciones favorables durante su circulación por ella. Esas secciones propicias para un funcionamiento seguro de un vehículo automatizado es lo que se denomina Dominio de Diseño Operativo (ODD). Por tanto, un ODD se refiere a las condiciones específicas bajo las cuales un vehículo automatizado está diseñado para funcionar de forma segura a lo largo de una sección de la carretera manteniendo el control longitudinal y lateral del vehículo.

De esta forma, el ODD define cuándo, dónde y bajo qué condiciones un determinado vehículo automatizado está diseñado para operar de manera autónoma, controlando en todo momento el movimiento longitudinal y lateral del vehículo. De manera complementaria, las condiciones no recogidas por los ODDs de un vehículo son aquellas para las que su sistema de conducción no ha sido diseñado y, por lo tanto, no podrá operar.

Las definiciones de ODD establecidas hasta la fecha se fundamentan en las capacidades del vehículo automatizado y en cómo está diseñado para operar de forma automática y se-

gura en ciertos ámbitos y condiciones. Sin embargo, la propia carretera y su entorno, que es lo que mayor interés puede despertar en las administraciones de carreteras, no se considera de manera explícita en estas definiciones. En este sentido, se podría definir un ODD como una sección de carretera que reúne una serie de características que propician, durante un cierto periodo de tiempo y longitud de carretera, el funcionamiento de un determinado sistema automatizado de conducción.

La definición de un ODD para un determinado vehículo automatizado depende de multitud de factores o condiciones operacionales que le permitan iniciar y mantener el control automatizado, de manera que en el momento que aparece una condición fuera del rango definido en el ODD, el vehículo desconecta y transfiere al conductor su control o, en caso de que este no responda, desarrolla unas tareas dinámicas por sí mismo para apartar el coche a una situación de riesgo mínimo.

Por tanto, los factores o condiciones operacionales de un ODD son fundamentales y pueden ser diversos y atender a clasificaciones distintas. A este respecto, se puede distinguir entre factores estáticos o fijos y dinámicos o variables, y entre factores internos y externos.

Por tanto, la clave está en las limitaciones que puedan existir en la interacción entre un vehículo automatizado y la infraestructura de la carretera, además de diversos factores de entorno o variables. Probablemente pueda ser más claro el concepto no solo diciendo lo que incluye sino también lo que excluye, es decir, los factores y umbrales que provocan la desconexión y hacen que el ODD termine.

La conducción automatizada realmente segura dependerá de la definición y publicación de la lista exhaustiva de múltiples condiciones y factores superpuestos que puede encontrar y manejar un determinado vehículo automatizado para seguir operando como tal a lo largo de una sección de carretera. Hasta ahora, solo ha habido tres propuestas de taxonomía de los factores y atributos a tener en cuenta para la definición de un ODD, pero no se ha trasladado todavía como obligatorio para los fabricantes.

Actualmente, los fabricantes describen de una forma muy general el ODD para los vehículos automatizados que venden, por lo que desarrollar y acordar una taxonomía va a ser un primer paso para estandarizar la forma en que los fabricantes describen sus sistemas y así facilitar la información adecuada a los usuarios para reducir su confusión, ya que podrán saber y ajustar sus expectativas en torno al rendimiento de los vehículos automatizados que van a conducir. Luego, el ODD detallado es fundamental para ser aplicado y aumentar la aceptación del usuario.

Para aprovechar todos los beneficios de la conducción automatizada, se debe maximizar la longitud del ODD y minimizar las transiciones entre automatizado y manual, es decir, maximizar la continuidad del ODD en el espacio y el tiempo. El vehículo debe saber cuándo se acerca al final de cada ODD, para lo que harán falta alertas de aproximación a los límites

correspondientes mediante mapas HD digitales y dinámicos, apoyándose en la conectividad.

La verdad es que, a día de hoy, las funciones y responsabilidades están aún poco claras. Es necesario avanzar en el estudio, las discusiones y los acuerdos para ir resolviendo los problemas y limitaciones de los ODDs actuales, donde todos los agentes implicados participen, no solo las empresas automovilísticas. Para este necesario objetivo a corto y medio plazo, es imprescindible que se involucren las administraciones de carreteras y tráfico, responsables de la infraestructura física y digital, así como de la circulación y seguridad de los vehículos y los usuarios.

Referencias

- [1] ASAM (2021). P2020-08 ASAM OpenODD Project. 2020. Acceso online: <https://www.asam.net/project-detail/asam-openodd/#backToFilters>
- [2] British Standards Institution. PAS 1883:2020. Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification, 2020.
- [3] Dogan, E., M. Rahal, R. Deborne, P. Delhomme, A. Kemeny y J. Perrin (2017). Transition of Control in a Partially Automated Vehicle: Effects of Anticipation and Non-Driving-Related Task Involvement. Transportation Research Part F: Traffic Psychology Behavior, vol. 46, pp. 205-215.
- [4] ERF (2020). New mobility and road infrastructure. Brussels (Belgium): European Road Federation. Acceso online: <http://www.cica.net/new-mobility-and-road-infrastructure-main-findings-of-a-benchmark-study-in-20-countries/>
- [5] EU EIP (2020). Road map and action plan to facilitate automated driving on TEN.
- [6] European Parliament. (2019). Type-approval requirements for motor vehicles as regards general safety. Brussels (Belgium): European Parliament.
- [7] Gyllenhammar, Magnus, Rolf Johansson, Fredrik Warg, Stig Ursing, DeJiu Chen, Hans-Martin Heyn, Martin Sanfridson, Jan Söderberg, Anders Thorsén, and, Stig Ursing (2020). Towards an Operational Design Domain That Supports the Safety Argumentation of an Automated Driving System. 10th European Congress on Embedded Real Time Systems. Toulouse, France.
- [8] ISO (2020). ISO/TC 22/SC 33 Vehicle dynamics and chassis components. ISO/AWI 34503. Road vehicles – Taxonomy for operational design domain for automated driving systems. ISO, 2020. Acceso online: <https://www.iso.org/standard/78952.html>
- [9] SAE (2018). SAE Surface Vehicle Recommended Practice J3016: "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles". https://doi.org/10.4271/J3016_201806
- [10] SAE (2020). Automated Vehicle Safety Consortium (AVSC). AVSC Best Practice for Describing an Operational Design Domain: Conceptual Framework and Lexicon. Society of Automotive Engineers.
- [11] Shen, S. y D. M. Neyens (2017). Assessing Drivers' Response during Automated Driver Support Systems Failures with Non-Driving Tasks. Journal of Safety Research, vol. 61, pp. 149-155.
- [12] Waymo 2017. On the road to fully self-driving. Waymo Safety Report. 43 p. Acceso online: https://www.auto-mat.ch/wAssets/docs/171019_waymo-safety-report-2017-10.pdf ❖