

Integración de los Dominios de Diseño Operativo de los Vehículos Automatizados en las Carreteras



Adaptation of Operational Design Domains of Automated Vehicles to Roads

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)

En los próximos años, el concepto de Dominio de Diseño Operativo (ODD) resultará crucial para determinar cuándo un vehículo automatizado puede funcionar sin supervisión humana. Los ODDs definen las condiciones para las que un determinado vehículo automatizado está diseñado. De este modo, una carretera que cumpla las especificaciones de un ODD presentará muy pocas desconexiones en los niveles SAE 2 y 3 de automatización, y ninguna en los niveles SAE 4 y 5.

El concepto de ODD aún debe madurar en muchos aspectos, como es una taxonomía detallada, sus umbrales, la interrelación entre los diferentes factores (especialmente la velocidad) o cómo gestionar factores variables. Además, deberá estudiarse también los funcionamientos degradados: cómo debe operar un vehículo automatizado hasta detenerse en una condición de riesgo mínimo.

Para administraciones y operadores de carreteras, sin embargo, puede que la mayor limitación esté en que el ODD está definido desde el punto de vista vehicular. Cada modelo de vehículo automatizado presenta su propio ODD, que es además susceptible de variar con actualizaciones software. Con centenares de modelos de vehículos, se hace especialmente complejo conocer el grado de adaptación de las infraestructuras a la conducción automatizada.

En este artículo se revisan algunas de estas limitaciones, así como se propone un nuevo concepto de ODD desde la perspectiva de la infraestructura: la Sección Viaria Operativa, entendida esta como aquella compatible con los ODDs de los vehículos en el mercado en un determinado momento. De este modo administraciones y operadores podrán trabajar mucho más fácilmente sobre las redes viarias que gestionan.

In the coming years, the concept of Operational Design Domain (ODD) will become crucial in determining when an Automated Vehicle can operate without human supervision. The ODDs define the conditions under which an Automated Vehicle is designed to drive autonomously. Thus, a road section that meets the specifications of an ODD will have very few disengagements at SAE Level 2 and 3, and none at SAE Level 4 and 5.

The concept of ODD still needs to mature in many aspects such as a detailed taxonomy, its thresholds, the interrelation between the different factors (especially speed) or the management of variable factors. In addition, degraded operations will need to be studied: how an Automated Vehicle should operate to a stop in a minimal risk condition.

For Road Administrations and Operators, the biggest limitation may lie in the fact that the concept of ODD is defined from the point of view of the vehicle. Each Automated Vehicle model has its own ODD which is also subject to change with software updates. With hundreds of vehicle models, it is particularly complex to know the degree of adaptation of infrastructures to automated driving.

This article aims at reviewing some of these limitations and proposing a new concept of ODD from the point of view of the infrastructure: Operational Road Section (ORS), defined as a road section compatible with the ODDs of the Automated Vehicles on the market at any given time. This concept will allow Road Administrations and Operators an easier road management.

1. Introducción

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. El conjunto de condiciones propicias para un funcionamiento seguro de un vehículo automatizado es lo que se denomina Dominio de Diseño Operativo (ODD). Por tanto, un ODD define cuándo, dónde y bajo qué circunstancias o condiciones un determinado vehículo automatizado puede funcionar con un control automatizado. Todo ello según el diseño de ese vehículo y su sistema de automatización.

Así pues, el objetivo principal del ODD es especificar con precisión el dominio en el que un vehículo automatizado puede realizar sus tareas dinámicas de conducción. Su explicación es especialmente importante para vehículos de nivel 4, que sí garantizarán el pleno funcionamiento autónomo dentro de sus ODDs. Vehículos de nivel 3 también presentan ODDs, pero no garantizan que el sistema sea suficientemente robusto como para no ceder el control de forma inesperada incluso dentro de ellos.

En general, el ODD es útil en los siguientes ámbitos:

- 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, o mediante 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.

Definir un ODD implica concretar todos los posibles factores y atributos (con sus umbrales correspondientes) para los que un vehículo autónomo debería ser capaz de funcionar autónomamente. La evolución tecnológica actual, así como el incipiente estado de la estandarización a estos efectos, hace que, a día de

hoy, existan serias limitaciones en el propio concepto, en su desarrollo y definición, y en el proceso que tendría que seguir para llegar a ser útil para todos los agentes involucrados y los usuarios finalistas.

A lo largo de un tramo de carretera, cada vehículo automatizado puede encontrarse con diferentes zonas que son acordes con sus ODDs, de modo que en principio podrá circular de forma autónoma por ellas. Sin embargo, hay que destacar dos aspectos: (i) los diferentes vehículos pueden presentar diferentes ODDs, por lo que una sección viaria puede ser adecuada para unos pero no para otros, y (ii) para cada vehículo automatizado, habrá zonas no acordes con ningún ODD, sobre las que no podrán circular de forma autónoma.

El ODD se centra en el diseño del vehículo automatizado para que pueda circular de forma autónoma en unas zonas viarias o ámbitos geográficos si se cumplen los condicionantes incluidos en su definición. En cambio, el ODD no está pensado ni enunciado desde la óptica de la carretera y su entorno, que es lo que más puede interesar a las administraciones de carreteras, como responsables del desarrollo y gestión de las mismas.

En ese otro sentido, se debería adaptar el ODD para centrarlo en qué secciones viarias reúnen las características adecuadas que propician 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.

No obstante, esta adaptación no es a priori suficiente debido a que actualmente el concepto de ODD se centra en cada vehículo automatizado, es decir, en un mismo tramo de carretera habrá más o menos zonas compatibles con los ODDs según el vehículo automatizado que lo recorra. En este sentido, se requiere ir más allá de completar y perfilar el ODD, incluyendo su propia adaptación a la carretera, para proponer otros conceptos asociados al ODD más directamente formulados desde la perspectiva de la carretera y que realmente puedan ser operativos para el diseño, mantenimiento y gestión de las carreteras actuales y futuras.

2. Limitaciones de los ODDs

2.1 Relación con la infraestructura

Las definiciones que existen del 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. Sin embargo, lo que más puede interesar a las administraciones de carreteras es que los ODDs estén formulados desde la carretera y su entorno.

Hasta la fecha no existe un consenso completo respecto a la definición de un ODD, pero las diferen-

cias son aún más manifiestas en los factores y condiciones que han de soportarlo. Otra cuestión que está en duda respecto a la concreción de un ODD es la probabilidad de que ocurran determinados eventos conflictivos frente a la precisión del sistema de detección como una tasa de fiabilidad. Son conceptos no comparables directamente, pero que están relacionados y afectan plenamente al ODD. El ODD debe de poder garantizar el funcionamiento autónomo del sistema al que está referido (siempre y cuando este funcione correctamente). Por ello, no puede definirse con unos factores, atributos y condiciones que establezcan unos límites probabilísticos, sino que los umbrales tienen que presentar suficiente margen como para que las condiciones de funcionamiento sean totalmente seguras. Fuera del rango del ODD, el vehículo autónomo podría seguir funcionando, pero ya no está garantizado.

Un ejemplo podría ser el cruce de un peatón a través de una carretera. Este es un evento conflictivo que presenta una probabilidad baja de que se produzca (supongamos un 10%). Si el sistema automatizado para el que se defina el ODD abarcara ese tramo de carretera, con presencia de peatones, no sería admisible que la detección automatizada de los peatones sobre la calzada presentara una detección precisa del 70%. Para este vehículo, ese tramo de carretera debería estar fuera del ODD. Si este evento ocurre con muchos vehículos, las autoridades podrían plantearse prohibir la presencia de peatones en el mismo o impedir físicamente que puedan cruzar la calzada, extendiendo de este modo la compatibilidad de la carretera con la mayoría de los vehículos (nótese que para tomar esta decisión se valora el funcionamiento no solo de un vehículo).

Otra dimensión que todavía no está clara se refiere a cómo varía

el ODD en función del comportamiento del vehículo automatizado. Un ejemplo de esto es la afección de la propia velocidad. De hecho, para cada ODD debería definirse como parámetro la velocidad automatizada, definida por García et al. (2020) como la máxima velocidad de circulación a la que el vehículo es capaz de mantener la conducción autónoma. ¿Qué ocurriría si el vehículo y/o su conductor desarrollan una velocidad mayor, bien voluntariamente o como necesidad de una maniobra evasiva? Incluso respetando la velocidad automatizada, si se definiera en el ODD, se podría producir un deslizamiento debido a un mal estado de los neumáticos, lo que supondría una limitación propia del vehículo, no del ODD.

La velocidad es, por lo tanto, un ámbito muy sensible a tener en cuenta en el ODD y en el diseño y operación de un tramo de carretera. Todavía no se ha concretado si la velocidad automatizada tiene que estar relacionada con la velocidad de diseño y el límite de velocidad genérico de cada segmento de carretera. Para que la circulación mixta de todo tipo de vehículos sea segura durante muchos años, las velocidades máximas de los ODDs de los vehículos automatizados que incluyan ese segmento viario deberían ser, como mínimo, las correspondientes al diseño y al límite genérico de velocidad.

2.2 Generalización del uso de los ODDs

En un futuro cercano será necesario que el concepto y la aplicación práctica de los ODDs se generalice. Para ello, es esencial que exista una superposición entre las dos perspectivas del ODD: el fabricante (o el diseñador del sistema automatizado) y el usuario final; para garantizar el despliegue seguro de los vehículos automatizados. La mayoría de las

RUTAS TÉCNICA

veces se olvida la segunda de estas perspectivas.

Los ODDs pueden desplegarse de varias formas, aunque hasta ahora se haya hecho de una forma muy incipiente y poco detallada (únicamente conocidos por cada fabricante en su fase de diseño y pruebas propias, así como por las agencias correspondientes en las pruebas de certificación). Hay que ir mucho más allá, comunicando estos ODDs también a compradores –incluyendo los posibles conductores ocasionales– y vehículos –a través del navegador– de forma georreferenciada y permitiendo recibir información dinámica por conectividad.

Si bien esto puede parecer todavía lejano, van apareciendo algunas iniciativas al respecto. Por ejemplo, la empresa TomTom ha desarrollado la función Roadcheck, dentro de su paquete de mapas HD para la navegación de los vehículos (Figura 1). En ella estarán representadas las secciones que permitan activar la conducción automatizada y las que no, para cada vehículo automatizado. Al considerar mapas en HD, el nivel de detalle llega incluso a conexiones, bifurcaciones y convergencias (Figura 2).

RoadCheck permite a los fabricantes de automóviles editar de forma georreferenciada los ODDs de cada modelo sobre los mapas avanzados de TomTom, incluso con la posibilidad de incluir los datos provenientes de las pruebas de esos vehículos, así como, en el futuro, de los propios vehículos circulando por la carretera. Por tanto, será habitual que en una misma sección de carretera haya vehículos que tengan permitida la activación del sistema de conducción automatizada y otros que no (Figura 3).



Figura 1. Secciones viarias dentro y fuera del ODD. Fuente: TomTom.



Figura 2. Conexiones viarias con diferentes condiciones de conducción. Fuente: TomTom.



Figura 3. Sección viaria con vehículos circulando en su ODD y fuera de su ODD. Fuente: TomTom.

Esto va a abrir muchas ventanas de mejora para todos los agentes:

- Los fabricantes y proveedores podrán verificar si realmente los atributos de sus ODDs se ajustan a la realidad del funcionamiento de sus vehículos y así mejorar sus tecnologías, así como compararse con otras tecnologías.
- Las administraciones y los operadores de carreteras dispondrán de una herramienta que les facilite la comprobación de qué secciones y segmentos de carreteras son aptos para los vehículos automatizados y cuáles no, pudiendo entrar a analizar la forma de ampliarlos a través de algunas posibles mejoras.
- Los usuarios serán los más beneficiados al disponer de una información clara de dónde se pueden activar las funciones de conducción automatizada y, probablemente, con qué nivel de atención o intervención del conductor.

Por tanto, este nuevo tipo de herramienta, que seguro será desarrollada de forma similar por otras empresas o instituciones, abre nuevas posibilidades para hacer que los vehículos automatizados sean realmente más seguros.

Sin embargo, su desarrollo e implantación va a traer algunas dudas y limitaciones que habrá que ir superando. Todo este sistema va a depender de que los fabricantes editen sus ODDs de forma georreferenciada, es decir, sus límites o barreras virtuales, lo cual va a suponer un gran trabajo, ya que será diferente según el modelo de vehículo. Luego, como al principio habrá poco detalle en los atributos de los ODDs, se arrancará con la habilitación de la conducción automatizada para los segmentos de carreteras principales con buenas condiciones de geometría, señalización, marcas viales y estado del pavimento.

Posteriormente, conforme los fabricantes vayan detallando los atributos y umbrales o límites de sus ODDs, la localización de zonas compatibles con sus ODDs será más amplia y concreta, abarcando más carreteras, pero también más secciones intermedias fuera de los ODDs. Estas últimas serán las más importantes para advertir con antelación a los conductores de una desconexión localizada o de la finalización del ODD, con el beneficio en la seguridad del proceso de cesión del control.

Otro parámetro que se debería incluir para cada ODD individualizado sería la velocidad máxima a desarrollar, y la mínima, si es de aplicación. Todo ello porque el rango de velocidades es uno de los factores o atributos importantes para que el sistema automatizado pueda mantener el control con seguridad dentro de un ODD.

Desde el punto de vista de los titulares de las carreteras, como se ha mencionado antes, el nuevo sistema les permitirá saber qué secciones o segmentos son aptos, según los fabricantes, para la conducción automatizada, pero se tendrán que desarrollar procedimientos para la verificación y/o certificación de que realmente es así, tanto para cada marca y modelo, como para el conjunto de los vehículos automatizados que circulen por ese tramo.

Esta nueva situación puede hacer que los fabricantes adopten otra estrategia de desarrollo más competitiva, si cabe. El ODD está planteado como una característica o propiedad resultante del diseño del sistema automatizado. Pero, también, puede ser el objetivo de las condiciones operativas de un vehículo nuevo para que el fabricante seleccione y diseñe todos los sensores y la computación necesarios para alcanzarlo.

3. Gestión dinámica de los ODDs

En el proyecto ASAM OpenODD (ASAM, 2021) se está trabajando para integrar el concepto de **ODD condicionado o reducido**. Esta aportación va a ser muy necesaria ya que un ODD, con sus atributos, especifica un rango operativo completo para un sistema automatizado. Sin embargo, puede haber un determinado atributo del ODD que presente una limitación en un cierto periodo de tiempo y ámbito espacial, que haga que el rango del ODD deba estar restringido, pero no por ello sea necesario abandonar completamente el ODD.

Un ejemplo claro se da con el atributo del rango de velocidades al que puede funcionar un sistema automatizado, por ejemplo, entre 0 y 80 km/h. Sin embargo, en el caso de una niebla densa (suponiendo que el concepto de “niebla densa” esté bien definido), el sistema automatizado se podría mantener dentro de su ODD, condicionado o reducido, si el rango de velocidades pasa a ser de 0 a 40 km/h.

Otra cuestión a tener en cuenta está relacionada con que el ODD de un vehículo automatizado ha de ser válido a lo largo de toda su vida útil, ya que va a ser una parte fundamental de su seguridad y la de otros vehículos y usuarios. Así, lo normal es que los fabricantes sean capaces de actualizar las tecnologías de automatización a bordo, al menos, en la parte de computación, y así se pueda habilitar un ODD dinámico o mejorado, es decir, que cada vez que se introduzca en el vehículo una mejora en su sistema de automatización, se amplíen y se hagan más robustos sus ODDs. De este modo, habrá versiones del ODD para un mismo vehículo automatizado a lo largo de su vida útil.

Esta expansión de los ODDs lleva aparejada la necesidad de nuevos umbrales e, incluso, la eliminación de alguno de los factores o atributos como condicionantes. Toda esta dinámica hace que la seguridad que se atribuye a un ODD a través de sus factores y umbrales no sea sencilla de gestionar y asegurar. Máxime, cuando el vehículo automatizado circula en el mundo real, avanzando dentro de todas las dimensiones posibles del ODD declarado, y las sorpresas o los conflictos pueden surgir con cierta frecuencia. Hay tantos eventos y situaciones extremas que ni siquiera los expertos pueden anticipar pruebas reales o en entornos de simulación para afrontar toda la variedad de sorpresas (Fraade-Blanar et al., 2018).

Por tanto, tal y como se está planteando y definiendo el ODD, con los umbrales para los diversos factores o atributos, el enfoque de la seguridad de la conducción automatizada se está orientando hacia la seguridad nominal, es decir, la que se basa en cumplir una serie de límites, dejando de lado que la seguridad real es un continuo (Blumenthal et al., 2020).

Según lo expuesto hasta ahora, un vehículo automatizado puede estar circulando dentro de su ODD, pero, en un momento dado, puede surgir un evento o conflicto que precipite su salida del dominio operativo, por lo que el nivel de seguridad pasa a estar en la gestión de las maniobras de riesgo mínimo que puedan llevar al vehículo a la cesión del control al conductor o a la búsqueda de una condición o localización de riesgo mínimo. No obstante, también puede ser posible desarrollar unas acciones preventivas, como aminorar la velocidad, para mantenerse dentro de un ODD condicionado o reducido.

Así, la relación de los ODDs con la seguridad resultante de la circulación de los vehículos automatizados, siendo innegable que será mucho mejor que la actual, ha de ser objeto de múltiples estudios e investigaciones para ir definiendo los factores y límites que realmente favorezcan una maximización de la seguridad del sistema resultante. Además, no es suficiente con que toda la seguridad recaiga en los sistemas de automatización, a través de los ODDs, sino que la infraestructura física, la infraestructura digital y la conectividad han de jugar un papel importante. No se puede dejar de lado la necesidad de contemplar, en el sistema seguro que se ha de buscar, la situación y disposición del conductor para intervenir si es necesario, así como las capacidades y operación del vehículo ante eventos.

En ese sentido, recientemente desde China, han propuesto un nuevo concepto que engloba al ODD y pretende aclarar la confusión que rodea al mismo (Khastgir, 2020). Le han denominado **Condición de Diseño Operativo (ODC)** y engloba al ODD, añadiendo las capacidades del vehículo objeto en cada momento y las del conductor. Este avance más integrado puede permitir lograr un sistema más seguro al contemplar dinámicamente el ODD según sea la operación del vehículo y la situación del conductor respecto a recobrar el control manual.

4. Adaptación de los ODDs a las carreteras

Hasta ahora, el planteamiento y desarrollo del ODD se centra en el diseño del vehículo automatizado para que pueda circular de forma automática y segura en unas secciones o zonas viarias si se cum-

plen los factores y condiciones incluidos en su definición. En cambio, el ODD no está enunciado desde la carretera y su entorno, que es lo que más puede interesar a las administraciones de carreteras.

Desde la perspectiva viaria, se podría definir un ODD como una sección de carretera que reúne una serie de características que propician, durante un cierto tiempo o periodo, 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 y hacen que el ODD no aplique.

Para una administración u operador de carreteras, se debería poder dar respuesta a toda una serie de necesidades (ASAM, 2021):

- Tener fácil acceso a las especificaciones del ODD de todos los vehículos que circulan por sus carreteras, para tener una visión clara de las demandas actuales y poder estimar las futuras en su red de carreteras.
- Tener la capacidad de advertir a los vehículos con anticipación si están a punto de elegir una ruta a través de su red de carreteras que probablemente exceda o esté fuera de su ODD.
- Facilitar recomendaciones a los vehículos automatizados sobre qué rutas, carreteras y carriles han de usar dependiendo de sus capacidades del ODD.

- Tener la capacidad de comunicar fácilmente restricciones actuales de ODD en determinadas secciones o tramos de su red.
- Disponer de control sobre las versiones de los formatos de cada ODD, al poder ir variando con el tiempo.

El camino emprendido por la empresa TomTom va en la dirección de algunos de esos requerimientos. Si todos los ODDs se georreferencian en un único mapa HD, será posible desde las administraciones de carreteras conocer las secciones que permiten la circulación automatizada para cualquier vehículo y también las secciones que presentan limitaciones y que, por tanto, no permiten la circulación automatizada de todos los vehículos automatizados.

Las administraciones de carreteras no pueden estar ajenas y su peditadas a los fabricantes de vehículos que decidan unilateralmente el diseño de sus sistemas automatizados sin contar, ni saber realmente, qué ocurre con la infraestructura física y de qué manera se podría mejorar y adaptar la infraestructura física de las carreteras para potenciar que los ODDs fueran más amplios y robustos.

Para que el sistema sea realmente seguro, las administraciones y operadores de carreteras han de conocer cómo son y cómo se adaptan los múltiples ODDs existentes a las condiciones de cada carretera, para poder gestionarlas de forma eficiente.

5. Sección Viaria Operativa (ORS)

Ante las limitaciones propias de los ODDs y de su adaptación a las carreteras, se hace necesario una



Figura 4. Secciones viarias operativas en un segmento de carretera.

adaptación o una interpretación de los ODDs desde el ámbito de la infraestructura viaria para poder conocer las secciones de carreteras que realmente puedan permitir el funcionamiento óptimo y seguro de todos los vehículos automatizados.

Se trata de las secciones viarias que resultan de la intersección de todos los ODDs correspondientes a todos los vehículos automatizados que circulen por un tramo de carretera. Por tanto, se trata de un nuevo concepto que haga o permita una adaptación de los ODDs a la realidad de la infraestructura viaria.

Este nuevo concepto se propone denominarlo **Sección Viaria Operativa** (ORS, Operational Road Section), es decir, una sección de carretera donde todos los sistemas automatizados pueden funcionar de forma segura, teniendo en cuenta las características de la infraestructura física y digital, salvo que haya factores de entorno o variables que puedan limitar temporalmente alguno de los ODDs.

La Figura 4 representa esquemáticamente el concepto de ORS a lo largo de un segmento de carretera. Las diversas líneas horizontales se corresponden con las zonas compatibles con los ODDs de diversos vehículos automatizados, representados en verde. Las secciones que permiten el funcionamiento de todos los sistemas automatizados se obtienen por la intersección de todos los ODDs, obteniendo las diversas secciones

viarias operativas que se muestran en la parte inferior también en verde.

Desde un punto de vista práctico y del lado de la seguridad, habría que eliminar de los extremos de una ORS las partes que se correspondan con la finalización e inicio de curvas y acuerdos verticales convexos que hayan supuesto una limitación de ODD para alguno de los sistemas automatizados.

Las secciones viarias operativas serán variables conforme se vayan introduciendo en la circulación nuevos vehículos automatizados, con una tecnología superior, que dispongan de unos ODDs más amplios y robustos. Luego, con el tiempo, estas secciones viarias operativas serán cada vez más largas y menos numerosas, pudiendo llegar en algunas carreteras de altas prestaciones a abarcar todo un segmento o tramo.

Por tanto, se podría plantear la posibilidad de determinar y comunicar a los usuarios, tanto conductores como vehículos automatizados, diferentes ORSs para los diversos niveles de automatización, que serán más largos conforme los niveles SAE sean más altos.

Para una administración u operador de carreteras este concepto de ORS puede ser realmente útil por diversos motivos. Con su determinación, se podrán deducir las características de la carretera y los umbrales de las mismas que son plenamente facilitadoras para

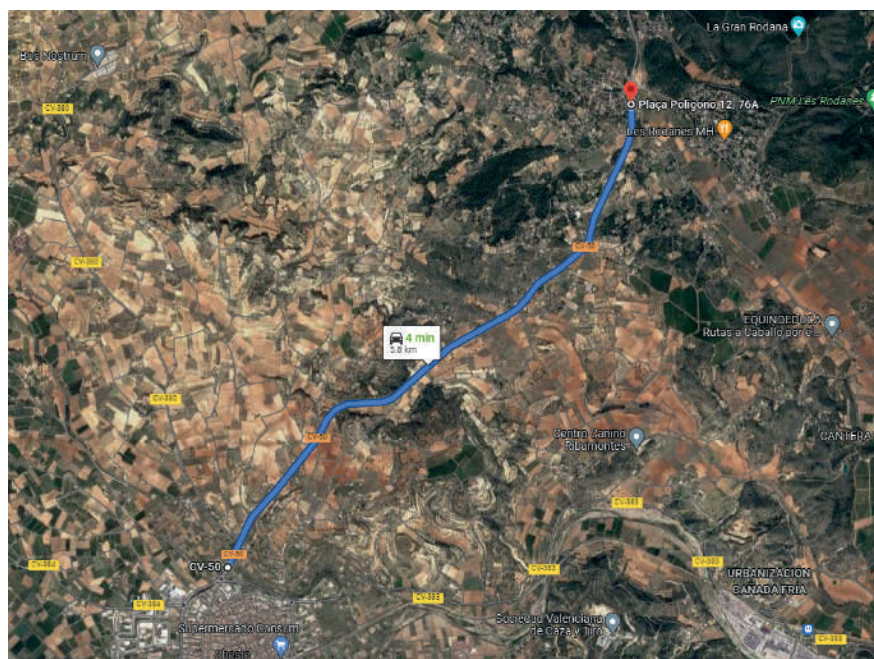


Figura 5. Tramo de carretera de estudio. Fuente: Google Maps.

la operatividad de los sistemas automatizados. Así, se podrán establecer las acciones de mejora y adaptación de otros tramos de carreteras que permitan el funcionamiento automatizado continuo sobre ellos. Además, también estarán en condiciones de poner restricciones de circulación a algunos sistemas automatizados y fomentar, así, que los fabricantes de vehículos y de sistemas automatizados avancen en sus desarrollos, no solo para los nuevos vehículos sino para actualizar los vehículos automatizados que ya circulaban. Si los fabricantes de vehículos hicieran explícitos los ODDs, las ORSs serían más fáciles de identificar, y los OEMs podrían recibir información de las administraciones de carreteras para mejorar sus sistemas.

Las ORSs, al igual que los ODDs, variarán con el tiempo. Al principio, se espera que todos los sistemas automatizados de conducción admitan solo los tramos de autopistas y autovías con un trazado suave. A medida que la tecnología evolucione, otros tramos serán compatibles con todos los sistemas, ampliando la aplicación de las ORSs. La

adaptación activa y continua de los tramos de carretera aceleraría esta generalización de las ORSs, pero para seleccionar las medidas más eficientes, los ODDs deben hacerse explícitos.

Finalmente, cabe destacar que este nuevo concepto de Sección Viaria Operativa (ORS) podría ser de gran interés en el diseño e implementación de carriles dedicados, es decir, de carriles de uso exclusivo de vehículos automatizados. En este sentido, la identificación y establecimiento de ORSs ayudará a determinar qué vehículos pueden circular por un determinado carril dedicado. De este modo, se podrá realizar una gestión más eficiente de estos carriles restringiendo el tráfico solo a aquellos vehículos capaces de actuar de manera automatizada.

6. Caso de Estudio

Para que se comprenda mejor cómo georreferenciar los Dominios de Diseño Operativo de diversos vehículos automatizados, así como la determinación de las Secciones

Viarias Operativas, 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 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 era adecuado para la detección de las líneas de borde de los carriles.

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.

Para determinar los ODDs de cada vehículo se realizaron recorridos a velocidad constante, empleando como velocidades de referencia 70, 80 y 90 km/h, para no superar el límite de velocidad establecido. De esta forma, se comprobó experimentalmente si cada uno de los vehículos sufría alguna desconexión, cediendo el control al conductor, registrando su localización (PK y tiempo). 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 (PK y tiempo).

Para cada vehículo automatizado aparecen diversas zonas compatibles con su ODD, desde el punto donde el sistema automatizado recupera el control hasta el siguiente punto de desconexión. Entre las sucesivas zonas compatibles aparecen zonas de no automatización o control manual del conductor. Como ejemplo, la Figura 6 muestra las zonas compatibles con el ODD, en color verde, del vehículo BMW circulando a una velocidad de 80 km/h. Las zonas marcadas en rojo indican zonas en las que el vehículo no fue capaz de operar de manera automatizada.

La Figura 7 presenta, de forma superpuesta, las zonas compatibles con los ODDs de los 3 vehículos para cada una de las velocidades de circulación consideradas. Realizando la intersección de todos los ODDs, se han identificado las diversas ORSs estrictas o brutas.

En caso de que las ORSs obtenidas contengan parcialmente alguna curva, estas habría que reducirlas para no incluir el desarrollo de las curvas que incluyen alguna desconexión para alguno de los vehículos. De esa forma, se obtendrían las ORSs finales o netas, que son las que realmente habría que tener en cuenta para la gestión viaria.

Teniendo en cuenta que el límite de velocidad del tramo es de 90 km/h, se deberían adoptar las Secciones Viarias Operativas (ORS) correspondientes a esa velocidad, resultando la tramificación que se recoge en la Tabla 1. En este sentido, podemos diferenciar dos tipos de ORS: bruta y neta. Las brutas están asociadas a los PKs desde

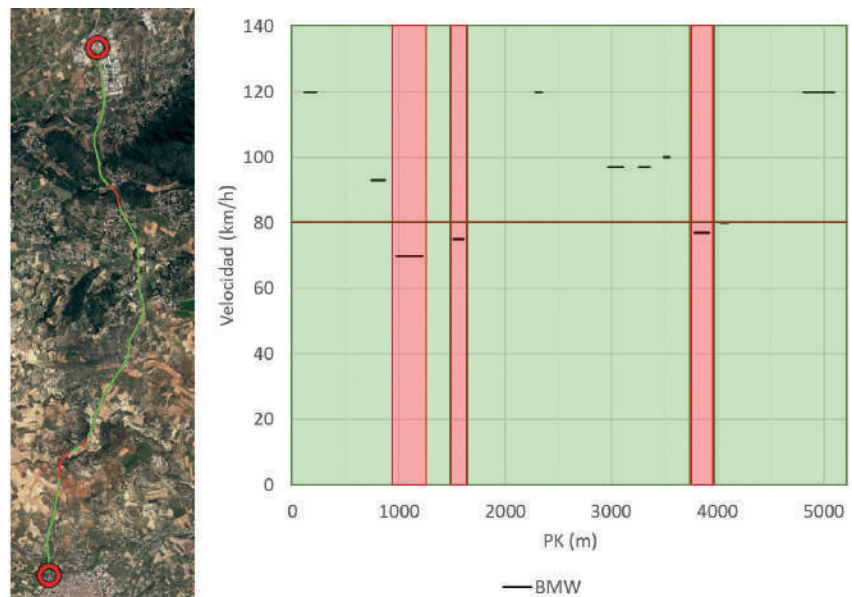
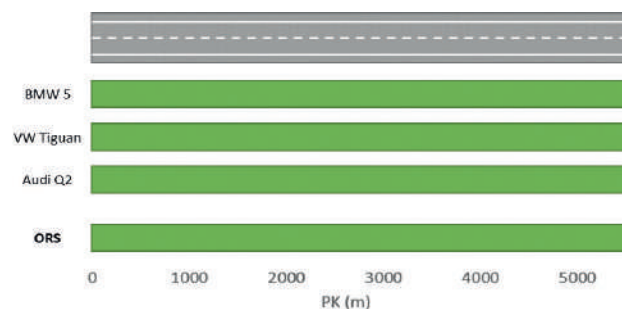
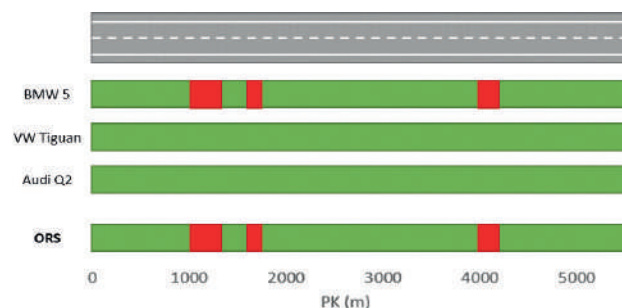


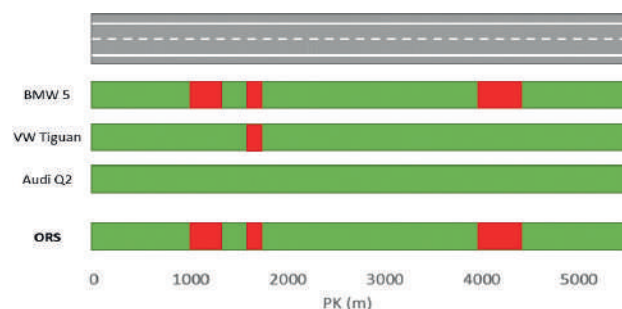
Figura 6. Zonas compatibles con el ODD para el BMW circulando a 80 km/h.



(a) Velocidad de circulación 70 km/h



(b) Velocidad de circulación 80 km/h.



(c) Velocidad de circulación 90 km/h.

Figura 7. Determinación de Secciones Viarias Operativas (ORSs)

Tabla 1. Secciones Viarias Operativas circulando a la velocidad límite de la vía.

	ORSs Brutas			ORSs Netas		
	PK inicial	PK final	Longitud (m)	PK inicial	PK final	Longitud (m)
1	0+000	1+001	1001	0+000	0+904	904
2	1+225	1+522	297	1+335	1+466	131
3	1+604	3+783	2179	1+739	3+749	2010
4	4+089	5+250	1161	4+173	5+250	1077
Total			4638			4122

que cada vehículo activa su sistema automatizado hasta que sufre una desconexión. Por otra parte, las netas quedan definidas a partir del elemento geométrico que provoca la desconexión, es decir, a partir de los PKs de inicio y final del elemento.

7. Conclusiones

Los ODDs son determinados por los fabricantes de vehículos y los desarrolladores de los sistemas de conducción automatizada (ADS). Lamentablemente, esta información sigue siendo muy limitada y restringida debido a razones de competitividad en el mercado de los desarrolladores de vehículos y sistemas de conducción automatizados. Asimismo, todavía no está sistematizada y acordada la taxonomía de todos los factores y atributos que han de formar parte de un ODD; menos aún los umbrales correspondientes.

Además, sigue habiendo discusiones respecto a ciertas limitaciones de los ODDs relacionadas con la seguridad resultante de los mismos, en el sentido de que si se cumplen los umbrales correspondientes a todos los factores se ha de poder garantizar que el sistema funcionará en condiciones totalmente seguras. Otra cosa es que con valores o magnitudes ligera-

mente fuera del rango de diseño del ODD, el sistema automatizado presente ciertas probabilidades de poder seguir funcionando.

Otra dimensión que todavía no está clara se refiere al comportamiento del vehículo automatizado, como respuesta al entorno de conducción que encuentra, frente al ODD, que define los atributos de ese entorno que están contemplados desde el diseño. Sobre todo, se trata de concretar el rango de velocidades para el funcionamiento seguro del vehículo automatizado, asociándolo al ODD. No solo es fundamental la velocidad máxima, sino que la velocidad mínima también puede ser un límite a tener en cuenta por sus implicaciones en la seguridad del conjunto de la circulación.

Los ODDs se han desplegado de una forma muy limitada, tan solo internamente por el fabricante en su fase de diseño y pruebas propias e informados a la agencia correspondiente en las pruebas de certificación del vehículo. Sin embargo, es necesario extenderlos a todos los agentes y usuarios del sistema de transporte por carretera, siendo comunicados a los compradores, incluyendo los posibles conductores ocasionales, a los vehículos a través del navegador e integrados de forma georreferenciada en el navegador, con su posible adapta-

ción al recibir información dinámica por conectividad.

Un primer paso en este sentido lo ha desarrollado la empresa TomTom con su nueva utilidad RoadCheck. Esta concentración de la información de todos los ODDs podrá permitir a las administraciones de carreteras la comprobación de qué secciones y segmentos de carreteras son aptos para los vehículos automatizados y cuáles no, pudiendo entrar a analizar la forma de ampliarlos a través de algunas posibles mejoras. Luego, se tendrán que desarrollar procedimientos para la verificación y/o certificación de que realmente es así, tanto para cada marca y modelo, como para el conjunto de los vehículos automatizados que circulen por cada tramo.

Recientemente, se están planteando variantes de los ODDs para adaptarlos a distintas situaciones o evoluciones. En este sentido, el concepto de ODD condicionado o reducido para dar respuesta a situaciones en las que alguno de los factores del mismo presente temporalmente una limitación y se pueda compensar con una operación restringida del vehículo, como reducir la velocidad. También aparece el concepto de ODD dinámico o mejorado, relacionado con la introducción en el vehículo de una actualización o mejora en su sistema

de automatización, que haga que el ODD se amplíe y se haga más robusto, contando, por tanto, con versiones del ODD como ocurre con cualquier software comercial.

Como se ha explicado, el ODD no está enunciado desde la carretera y su entorno, que es lo que más puede interesar a las administraciones u operadores de carreteras. Habría que adaptar el concepto desde la perspectiva de la carretera, como, por ejemplo, una sección de carretera que reúna una serie de características que propician, durante un cierto tiempo o periodo, el funcionamiento de un determinado sistema automatizado de conducción.

Las administraciones de carreteras no pueden seguir supeditadas a que los fabricantes de vehículos decidan unilateralmente el diseño de sus sistemas automatizados sin tener realmente en cuenta qué ocurre con la infraestructura física y de qué manera se podrían mejorar y adaptar las carreteras para potenciar que los ODDs fueran más amplios y robustos.

Para que el sistema sea realmente seguro, las administraciones y operadores de carreteras han de conocer cómo son y cómo se adaptan los múltiples ODDs existentes a las condiciones de cada carretera, para poder gestionarlas de forma eficiente.

En este sentido, se ha propuesto un nuevo concepto, Sección Viaria Operativa (ORS), que permita la adaptación del ODD de los fabricantes a la realidad de cada tramo de carretera. Una ORS se define como una sección de carretera donde todos los sistemas automatizados pueden funcionar de forma segura, teniendo en cuenta las características de la infraestructura física y digital, salvo que haya factores de entorno o variables que

puedan limitar temporalmente alguno de los ODDs. Se trata de las secciones viarias que resultan de la intersección de todos los ODDs correspondientes a todos los vehículos automatizados que circulen por un tramo de carretera.

Para una administración u operador de carreteras este concepto de ORS permitirá deducir las características de la carretera y los umbrales de las mismas que son plenamente facilitadoras para la operatividad de los sistemas automatizados. Así, se podrán establecer las acciones de mejora y adaptación de otros tramos de carreteras que permitan el funcionamiento automatizado continuo sobre ellos. Además, servirá de base para poner restricciones de circulación a algunos sistemas automatizados y fomentar, así, que los fabricantes de vehículos y de sistemas automatizados avancen en sus desarrollos, no solo para los nuevos vehículos sino para actualizar los vehículos automatizados que ya circulaban.

Referencias

ASAM (2021). P2020-08 ASAM OpenODD Project. Disponible en: <https://www.asam.net/project-detail/asam-openodd/>.

Blumenthal, M. S., Fraade-Blanar, L., Best, R., & Irwin, J. L. (2020). Safe Enough: Approaches to Assessing Acceptable Safety for Automated Vehicles. Blumenthal, Marjory S., Laura Fraade-Blanar, Ryan Best, and J. Luke Irwin (2020). Safe Enough: Approaches to Assessing Acceptable Safety for Automated Vehicles. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA569-1.html.

Fraade-Blanar, L., Blumenthal, M. S., Anderson, J. M., & Kalra, N. (2018). Measuring automated vehicle safety: Forging a framework. Fraade-Blanar, Laura, Marjory S. Blumenthal, James M. Anderson, and Nidhi Kalra (2018). Measuring Automated Vehicle Safety: Forging a Framework. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2662.html.

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.

Khastgir, S. (2020). The curious case of operational design domain: what is it and is not?. Disponible en: <https://medium.com/@siddkhastgir/the-curious-case-of-operational-design-domain-what-it-is-and-is-not-e0180b92a3ae>.

TomTom. Roadcheck product. Disponible en: <https://www.tomtom.com/products/roadcheck/>. ❖