Fundación Corell
Movilidad, Medioambiente y Seguridad

VIII Premio José Mª Huch

Impacto del Transporte de mercancías mediante "Platooning" en vías de alta capacidad

Ismael Ferrer Domingo
Álvaro Cuadrado Tarodo

Edita: Fundación Francisco Corell
Noviembre 2017

Autores: Ismael Ferrer Domingo
Álvaro Cuadrado Tarodo

ISBN: 978-84-697-6823-5
Depósito legal: M-30120-2017

Imprime: Grupo Diario Imprenta, S.L.
Tel.: 96 330 18 32
pedidos@grupodiario.com

IMPACTO DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS MEDIANTE "PLATOONING" EN VÍAS DE ALTA CAPACIDAD

Autores:
Ismael Ferrer Domingo
Álvaro Cuadrado Tarodo

Prólogo

La convocatoria del VIII Premio "José María Huch" promovido por la Fundación Corell ha estado en esta ocasión destinada a recompensar a los autores de un trabajo de investigación sobre las nuevas tecnologías de automatización en la ayuda a la conducción de vehículos de transporte por carretera.

Como se ve reflejado en este estudio premiado y también en los otros trabajos presentados, la evolución en esta materia está siendo mucho más rápida de lo que conoce el gran público, y de ahí también el interés de la Fundación en dar a conocer estas nuevas posibilidades que nos dejará el futuro próximo.

El jurado tras analizar profusamente todos los trabajos presentados, a cuyos autores damos la enhorabuena por la alta calidad de los mismos, ha considerado este trabajo sobre el "platooning" como el merecedor del galardón de esta edición.

Es un trabajo exhaustivo y descriptivo de las necesidades de mayor capacidad de las vías de circulación y cómo estas nuevas tecnologías pueden ayudar a aumentarlas, facilitando a su vez la actividad de la conducción y mejorando por tanto la seguridad.

Los autores ponen de manifiesto cómo estas nuevas situaciones harán necesario la adaptación no solo de los vehículos sino también de las carreteras y la señalización de las mismas. Implicando todo ello inversiones imprescindibles pero que redundarán sin duda en beneficios tanto para el medio ambiente como para la seguridad vial y en definitiva para las personas.

La importancia del transporte por carretera, tanto de mercancías como de personas en el contexto general de la economía, deben tenerlo presente las autoridades, valorando todo el esfuerzo que se está haciendo por aportar nueva soluciones que permiten mejorar su productividad y que necesitan de la contribución en infraestructuras que se adapten a estas nuevas situaciones que las nuevas tecnologías pueden aportar.

El jurado felicita a los autores de este trabajo, reconociendo una importante labor de investigación y documentación así como de aportación de iniciativas y soluciones.

Francisco J. Corell Grau
Presidente del Jurado del Premio José Mª Huch
Patrono de la Fundación Francisco Corell

INDICE

1. INTRODUCCIÓN 8
2. ESTADO DEL ARTE 12
2.1. VEHÍCULOS GUIADOS. ¿ EL TRANSPORTE DEL FUTURO? 12
2.1.1. BENEFICIOS 13
2.1.2. INCONVENIENTES 15
2.1.3. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN 16
2.2. ESTUDIOS PREVIOS 21
A. PATH 22
B. SARTRE 23
C. COMPANION 25
D. EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE 2016 27
2.2.1. COMPARATIVA 33
3. PROBLEMÁTICA DE LA CIRCULACIÓN DE CAMIONES GUIADOS 35
3.1. DIFERENCIAS ENTRE CAMIÓN Y PELOTÓN DE CAMIONES 35
3.1.1. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS PATRÓN 38
3.2. IMPACTO SOBRE EL TRÁFICO 40
3.2.1. ESTADO DEL TRÁFICO 40
A. Capacidad. 41
B. Nivel de servicio 50
3.2.2. ADELANTAMIENTOS 54
A. Adelantamiento de un vehículo ligero 55
B. Adelantamiento de un vehículo pesado 57
3.2.3. CONCLUSIONES 59
3.3. IMPACTO SOBRE LA INFRAESTRUCTURA 60
3.3.1. RAMPAS 60
3.3.2. CARRILES DE CAMBIO DE VELOCIDAD 63
A. Vías de aceleración 65
B. Vías de deceleración 68
C. Carriles de trenzado 69
D. Vía colectora-distribuidora 70
3.3.3. CONFLUENCIAS Y BIFURCACIONES 71
3.3.4. SEÑALIZACIÓN 75
A. Influencia en la señalización lateral 75
B. Influencia en la distancia de las señales 77
3.3.5. CONCLUSIONES 81
3.4. IMPACTO SOBRE LA SEGURIDAD VIAL 82
3.4.1. DATOS DE ACCIDENTABILIDAD 85
3.4.2. CONCLUSIONES 88

4. ESTUDIO PRÁCTICO: AUTOVÍA A-7 90
4.1. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO QUE SIMULAN ACTUALMENTE LOS PELOTONES DE CAMIONES EN LAS AUTOVÍAS 90
4.2. RED DE ALTA CAPACIDAD EN ESPAÑA 91
4.3. CARRETERA DE ESTUDIO. AUTOVÍA A-7 94
4.3.1. DATOS DISPONIBLES Y PERIODO DE ESTUDIO 96
A. Cámaras de video 97
B. Datos de aforo 101
C. Historial accidentes 103
4.4. ANÁLISIS COMPORTAMIENTO DEL RESTO DE USUARIOS FRENTE AL CONVOY DE CARRETERA. AUTOVÍA A-7 105
A. METODOLOGÍA 105
4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PELOTONES DE CAMIONES 106
4.4.2. INCORPORACIONES Y SALIDAS 113
A. Incorporaciones. 114
B. Salidas. 125
4.4.3. ADELANTAMIENTOS 126
4.5. INFLUENCIA DE LOS VEHÍCULOS PESADOS GUIADOS EN LA CIRCULACIÓN DE LA AUTOVÍA DE ESTUDIO 128
4.6. ANÁLISIS ACCIDENTABILIDAD EN AUTOVÍA A-7 136
4.6.1. LOS VEHÍCULOS PESADOS Y LA ACCIDENTABILIDAD 137
4.6.2. LOS VEHÍCULOS PESADOS GUIADOS Y LA ACCIDENTABILIDAD 141
5. CONCLUSIONES 146
6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 150
7. BIBLIOGRAFÍA 151

1. INTRODUCCIÓN

La automatización de los vehículos figura entre uno de los temas más investigados entorno al desarrollo del transporte y movilidad por carretera. Son muchos los estudios realizados sobre la incorporación de sistemas avanzados de asistencia al conductor en los vehículos, buscando conseguir un medio de transporte más seguro y sostenible. Los investigadores más optimistas aseguran la incorporación de vehículos automatizados de nivel 1 o 2, conocidos como vehículos guiados, en un futuro muy próximo. Sin embargo, aún son muchas las cuestiones entorno a esta idea.

Los sistemas avanzados de asistencia al conductor son sistemas desarrollados para automatizar ciertas tareas de la conducción. El acelerador, la dirección y/o el freno se controlan automáticamente para proporcionar un viaje más seguro y cómodo. El vehículo está equipado con sistemas de comunicación que permiten el intercambio de información entre vehículos, para poder así, conducir de manera cooperativa. Más adelante se muestran los principales sistemas de asistencia al conductor y el nivel de automatización de los vehículos en función de los mismos.

El incremento del volumen del transporte por carretera es debido a la creciente necesidad de movilidad de los ciudadanos, unido al mayor transporte de mercancías como consecuencia de la globalización del comercio internacional. Esto supone una posible congestión de las infraestructuras viarias y un aumento del consumo de energía, lo que conlleva a problemas sociales y medioambientales.

El sector del transporte es el de mayor consumo energético de la Unión Europea, según el Informe Anual del Observatorio del Transporte y la Logística en España 2015, con un 31,6 % de la energía final consumida, porcentaje que se agrava en el caso de España, con un 39,4%. El transporte de viajeros y mercancías por carretera es responsable de más del 90% de ese consumo, con más de un millón de TeraJulios consumidos en el año 2013. Los mayores consumos en carretera están asociados a la

mayor actividad de este sector frente al resto. En la siguiente tabla se muestra el consumo de energía final por modos de transporte:

	2010	2011	2012	2013
Carretera	1.212.333,0	1.165.038,2	1.106.743,9	1.059.196,0
Ferroviario	16.658,6	17.769,9	17.103,3	16.610,0
Aéreo	53.053,8	50.412,9	43.148,5	35.915,8
Marítimo	44.535,4	34.850,5	36.221,0	21.256,6
Total transporte	1.326.580,8	1.268.071,5	1.203.216,7	1.132.978,4

Tabla 1. Consumo de energía final nacional por modo de transporte. TeraJulios. Datos obtenidos del Informe Anual del Observatorio del Transporte y la Logística en España 2015.

Se observa que la energía final consumida del sector se ha ido minimizando considerablemente, con una reducción de casi un 25%. Se debe a motivos tales como: motores optimizados, uso de biocombustibles, vehículos híbridos, etc., es decir, gracias al continuo desarrollo tecnológico en la industria del automóvil. Pero esto no resulta suficiente para conseguir los objetivos del Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea de 2011, que marca como objetivo una reducción del 60% para 2050.

La Dirección General de Tráfico menciona un total de 223 millones de vehículos-kilómetro circulando en las carreteras españolas en el año 2014. En cuanto al transporte de viajeros y mercancías por carretera (viajeros-km y toneladas-km), en 2014 se ha experimentado un crecimiento en el transporte de mercancías de un 2,7% y una reducción en el segmento de viajeros (-3%), tal y como muestra la tabla siguiente:

Clase de vehiculo	2013	2014	Variación
VIAJEROS	372.312	361.262	-3,0%
Motocicletas	1.937	2.065	6,6%
Turismos	316.539	319.729	1,0%
Autobuses	53.836	39.469	-*
MERCANCÍAS	237.455	243.915	2,7%

Tabla 2.Transporte de viajeros y mercancías en las carreteras españolas (millones de viajeros-km y toneladas-km). Datos obtenidos de la DGT.

Otro de los grandes pilares en la ingeniería de tráfico es la mejora en seguridad vial. Existe una constante preocupación en reducir los factores que contribuyen a los accidentes de tráfico. Las medidas adoptadas han permitido pasar de 5.776 a 1.689 el número de víctimas mortales en carretera desde el año 2000 hasta el 2015 en España, según la Dirección General de Tráfico. El 90% de estos accidentes mortales son debidos a fallos humanos, tales como conducir a mayor velocidad de la permitida, no dedicar toda la atención a la conducción, somnolencia, alcohol o drogas. Estos resultados son el motivo por el cual existe un interés creciente en la búsqueda de conducciones automatizadas.

Todas estas externalidades del transporte por carretera son elementos esenciales en el desarrollo de un futuro sostenible para el medio ambiente y seguro para los usuarios.

El objeto de este estudio es analizar las modificaciones que será necesario realizar en las infraestructuras existentes y en los criterios de diseño de las nuevas carreteras, de tal forma que los vehículos pesados guiados puedan circular por la red de alta capacidad. Además, se estudiará la incidencia que tendrán este tipo de vehículos en las condiciones de circulación y en la seguridad vial.

El estudio parte de un análisis bibliográfico de las investigaciones y experiencias, tanto nacionales como internacionales, realizadas acerca de vehículos guiados y automatizados. Esta primera fase permite conocer el estado del conocimiento de esta nueva generación de la movilidad. Más adelante, el estudio se centra en la automatización

de vehículos pesados, analizando la influencia que tendría el pelotón de camiones en el tráfico y la infraestructura.

Para conocer más en detalle los efectos, se ha tomado como modelo la autovía A-7 (Autovía del Mediterráneo), que presenta altas intensidades de tráfico junto con un alto porcentaje de vehículos pesados, que provoca la formación de pelotones de camiones, permitiendo así observar la composición del tráfico actual y los diferentes patrones de comportamiento asimilados en la conducción al encontrarse pelotones de camiones. Además, se estudian los diferentes accidentes ocasionados en la carretera de estudio, analizando la causa que los produjo y la tipología de vehículo implicado, con el fin de conocer la influencia del tráfico pesado en la seguridad vial.

Con todo ello, el documento pretende indicar todos aquellos aspectos en los que se debería profundizar antes de incorporar vehículos guiados en el tráfico. Mostrando las ventajas e inconvenientes que se obtendrían tras su adaptación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. VEHÍCULOS GUIADOS. ¿ EL TRANSPORTE DEL FUTURO?

Actualmente, los vehículos ya disponen de un alto equipamiento tecnológico, facilitados con controles de velocidad, sistemas de aparcamiento automático, cámaras que permiten tener visión de los ángulos muertos, y una larga lista de dispositivos que facilitan la conducción y aumentan la seguridad. El avance tecnológico alcanzado permite una conducción automatizada o guiada, pero aún existe un gran desconocimiento entorno a la influencia que tendría sobre el resto de usuarios de la red de carreteras.

Cuando hablamos de vehículos guiados o platooning, nos estamos refiriendo a vehículos que circulan en pelotón comunicándose recíprocamente entre sí. El primer vehículo es el que sirve de guía al anterior, marcando la velocidad de circulación, frenado y maniobras de operación necesarias, mientras que los otros vehículos responden automáticamente y simultáneamente en fracción de segundos. Los estudios realizados hasta el momento muestran la gran variación de detalles que engloba este concepto, como por ejemplo, el objetivo de circular en pelotón, la adaptación con vehículos manuales, los requisitos de la infraestructura o incluso el nivel de automatización del que se habla. Más adelante se detalla este último aspecto, mostrando los distintos niveles de automatización y las diferentes alternativas existentes.

Esta modalidad de conducción es posible gracias a los avances alcanzados en la tecnología, con las nuevas ITS (Intelligent Transportation System) que permite la comunicación entre vehículos (V2V) y con la infraestructura (V2I), de manera que ambos puedan formar un sistema cooperativo donde los usuarios intercambian información y favorecen la mejora de características tales como seguridad, ahorro en el consumo de combustible, eficiencia del tráfico y capacidad de las vías.

Inicialmente se enfocó la idea de vehículos automáticos simplemente a los coches, pero a medida que la tecnología de éstos progresa, el sector del transporte se cuestiona la posibilidad de incluir este avance tecnológico en su campo. De hecho, la mayoría de los estudios que se muestran en este documento se centran en la utilización de los vehículos guiados en el transporte de mercancías.

2.1.1. BENEFICIOS

La búsqueda continuada de un transporte sostenible y seguro, ha sido la base para el desarrollo de nuevas formas de movilidad. Todas las investigaciones realizadas coinciden en los posibles beneficios que podrían derivarse de la incorporación de los sistemas automáticos en la conducción. Algunos de los beneficios potenciales estimados son:

- **Seguridad**: Este es el beneficio principal, ya que el vehículo cuenta con un sistema automático de guiado y frenado, reduciendo así el riesgo de accidente por fallo humano (representa el 90% de los accidentes de tráfico).

- **Consumo y emisiones**: La circulación se realiza la mayor parte del tiempo con velocidades constantes, evitando por tanto, el consumo de energía en los momentos de aceleración y frenado.

  El combustible representa aproximadamente un tercio de los costes de operación de un camión pesado en el transporte de larga distancia. Además, el uso de estos combustibles conduce a emisiones problemáticas, particularmente de dióxido de carbono. El sector del transporte, incluido viajeros, representa el 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, de los cuales el 72% se deben al transporte por carretera [Datos de 2014].

Una reducción de la resistencia al aire, como consecuencia de una conducción mucho más próxima, supondría un ahorro en el consumo de combustible. Éste, a su vez, implicaría una reducción de las emisiones y de los costes de operación.

El cálculo aproximado de ahorro de combustible que supondría su adaptación se excede de este estudio, ya que el resultado sería muy complejo. El consumo de combustible depende de un gran número de factores, tales como: la carretera, el clima, las características del vehículo, la velocidad, la carga, el tráfico, la distancia entre vehículos y un largo etcétera. El efecto del platooning en el consumo de combustible se ha investigado tanto en simulaciones como en experimentos con vehículos reales, lo que ha permitido obtener un valor aproximado del mismo. Los estudios indican que el arrastre de aire de un vehículo pesado en un pelotón se puede reducir en un 40%, lo que se traduce en que se podría reducir entre un 5 y un 15% el consumo de combustible, dependiendo de la ruta realizada y las características del vehículo ensayado. Este aspecto es clave para la reducción de CO2.

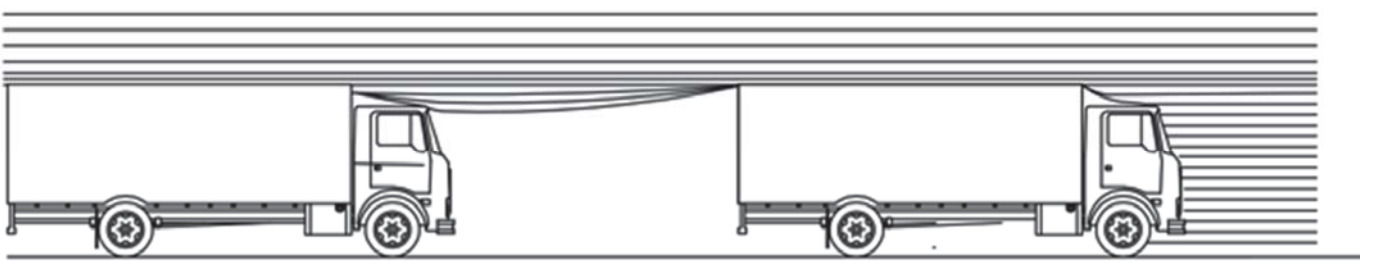


Figura 1. Reducción de la resistencia al aire con sistema platooning

- **Capacidad de la carretera**: Al tratarse de una circulación sistematizada, es mayor la cantidad de vehículos que pueden circular por la carretera. La velocidad del tráfico se estandariza y las distancias entre vehículos disminuyen. Además, al tratarse de un sistema que gestiona inicialmente la ruta, permite optimizar el uso de la red viaria reduciendo los atascos.

- **Condiciones climáticas**: El riesgo adicional ocasionado en condiciones de poca visibilidad, como lluvia, niebla o nieve, se vería minimizado debido a los sistemas de asistencia al conductor incorporados en el vehículo.

- **Eficiencia comercial**: En el caso de operaciones comerciales, la incorporación de los sistemas automatizados permite mejorar no solo la planificación de los sistemas de transporte, al poder conocer de manera más exacta los tiempos de desplazamiento, sino también aspectos como la reducción de costes y mayor facilidad para la coordinación con otros modos de transporte.

2.1.2. INCONVENIENTES

La mayor problemática con la que se encuentra esta nueva forma de movilidad es el conjunto de incertidumbres que existen entorno a su incorporación junto con el resto de usuarios:

- **Conductores de los vehículos guiados:** Los vehículos guiados no prescinden del conductor, por lo que supone una nueva experiencia de conducción para los usuarios. Esto genera inquietud entre los consumidores, planteándose cuestiones como: ¿Qué capacidades son necesarias tener para controlar este dispositivo? ¿Cuál es el papel del conductor? ¿Está garantizada la seguridad? Y en situaciones de emergencia, ¿irán suficientemente alerta?. Además, al reducir la distancia entre vehículos, los conductores pierden información visual del medio y por tanto, sienten una falta de confianza en la capacidad de reacción.

- **Resto de usuarios de la vía:** No queda clara la influencia que el paso de estos vehículos supondría sobre el resto de usuarios de la vía, y si su paso modificaría las conductas de circulación habituales.

- **Infraestructura:** Se necesitaría adaptar la infraestructura para permitir la circulación coordinada de los vehículos.

- **Legislación:** Se requiere de legislación comunitaria que elimine la descoordinación entre países para una conducción transfronteriza. Además, se tendría que revisar y modificar la normativa actual sobre maniobras de circulación, así como el balizamiento y señalización.

Todos estos aspectos generan un rechazo social sobre el que se tendrá que trabajar en el momento de puesta en el mercado.

2.1.3. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN

Existe diferentes conceptos acerca de los sistemas automatizados, los vehículos pueden ser autónomos, con una conducción aislada automática operando junto con vehículos manejados manualmente, o mediante una circulación automática cooperativa, donde los automóviles comparten información con el resto de vehículos para coordinar maniobras.

A su vez, dependiendo de la aplicación de los sistemas automáticos, se puede clasificar la automatización de los vehículos en diferentes niveles, en este estudio se muestra la clasificación realizada por el grupo de trabajo SAE (On-road Automated Vehicle Standards Committee) en la publicación *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems* realizado en 2014, graduada en función de la capacidad de decisión que tiene el sistema de asistencia frente al conductor:

Nivel SAE	Nombre	Control de la dirección y aceleración/ desaceleración	Seguimiento del entorno de conducción	Rendimiento de reposo	Capacidad del sistema (Modos de conducción)
0	**No automático**	Conductor humano	Conductor humano	Conductor humano	Ningún modo
1	**Asistencia al conductor**	Conductor humano y sistema	Conductor humano	Conductor humano	Algunos modos
2	**Automatización parcial**	Sistema	Conductor humano	Conductor humano	Algunos modos
El sistema supervisa el entorno de conducción					
3	**Automatización condicional**	Sistema	Sistema	Conductor humano	Algunos modos
4	**Alta automatización**	Sistema	Sistema	Sistema	Algunos modos
5	**Completamente automatizado**	Sistema	Sistema	Sistema	Todos los modos

Tabla 3. Niveles de automatización. Proyecto SAE

Nivel 0, No automatizado

El desempeño del conductor es a tiempo completo. El sistema no tiene control ni longitudinal ni lateral, pero si puede emitir avisos al conductor para advertir de posibles situaciones de emergencia.

Nivel 1, Asistencia al conductor

El vehículo dispone de un sistema de asistencia al conductor. Las tareas de aceleración/desaceleración y la dirección del vehículo se pueden realizar de manera automática, pero con el control lateral y longitudinal del conductor. Por tanto, el conductor no puede realizar otras tareas, debiendo supervisar el entorno y activando o desactivando el sistema automático cuando lo considere oportuno.

Nivel 2, Automatización parcial

Mientras que en el nivel 1 las tareas de conducción se comparten entre el sistema y el conductor, los sistemas de nivel 2 ejecutan completamente todas las tareas, incluido el control lateral y longitudinal. El conductor ya no participa de forma continua en la conducción, permitiéndole tener las manos fuera del volante y sin el pie en el pedal. Pero, aunque esté físicamente desconectado de la conducción, debe controlar el entorno e intervenir inmediatamente cuando sea necesario. Los vehículos incluyen sistemas de notificación y advertencia, con control limitado del vehículo en situaciones de emergencia. A su vez, comparten información con otros usuarios para coordinar maniobras y permitir viajes automatizados.

Nivel 3, Automatización condicional

Este nivel permite al conductor centrar su atención durante la conducción automática en cualquier otra actividad, sin preocuparse por situaciones de emergencia. El vehículo dispone de un sistema de conducción automatizado de todas las tareas de conducción dinámica, incluido el control del entorno de conducción. El conductor puede tomar el mando en cualquier momento.

Nivel 4, Alta automatización

El vehículo dispone de un sistema de conducción automatizado de todos los aspectos de la tarea de conducción dinámica. El sistema controla el entorno y las condiciones para las que fue diseñado y en el momento en el que el sistema percibe un cambio en el modo de conducción que pueda suponer un riesgo, avisa al conductor para solicitar intervención. En caso de no recibir respuesta por parte del conductor, el propio sistema tiene capacidad de reacción. En este caso, el conductor puede ocupar su tiempo en actividades de mayor duración.

Nivel 5, Completamente automático

Permite una conducción automática desde el origen hasta el destino del viaje, sin un dominio especifico de diseño. Por tanto, puede realizar el viaje por cualquier carretera tal y como lo realizaría un conductor humano, realizado a tiempo completo por un sistema de conducción automatizado de todos los aspectos. Todas las situaciones pueden ser gestionadas por un conductor.

Los vehículos guiados a los que hacemos referencia en este estudio corresponden a una conducción automática cooperativa de nivel 1 y 2, dependiendo del equipamiento tecnológico. Estos sistemas, conocidos como “sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS –Advanced driver assistance systems), permiten mejorar la seguridad y la comodidad en la conducción. A continuación se muestra una tabla con los sistemas de asistencia al conductor más importantes presentes en la conducción de nivel 1 y 2:

NOMBRE	SIGLAS	COMENTARIO
Control de crucero / Cruse Control	***CC***	Controla la velocidad del vehículo. El vehículo automáticamente acelera o desacelera en función de la necesidad.
Control de crucero adaptativo / Adaptive Cruise Control	***ACC***	Soporta el control longitudinal del vehículo, marcando la velocidad a la que deseas circular y/o la distancia al vehículo precedente. Ambos parámetros se establecen por el conductor.
Asistencia en mantenimiento del carril / Lane Keeping Assistance	***LKA***	Soporta el control lateral del vehículo. Puede ser: • *Tipo I,* control correctivo del movimiento, emitiendo un aviso en caso de que el vehículo vaya a salirse del carril. • *Tipo II,* control correctivo continuo de la dirección del vehículo para mantenerlo cerca del centro del carril. • *Tipo III,* el sistema mantiene el vehículo en el centro del carril.
Asistencia en cambio de carril / Active Lane Change Assistance	***LCA***	Ayuda al conductor durante las maniobras de cambio de carril. Se realiza una modificación en la dirección en caso de que el carril esté ocupado por otro vehículo.
Detección del ángulo muerto / Blind Spot detection	***BSD***	Ayuda a reducir los puntos ciegos de las áreas posterior y laterales del vehículo, emitiendo señales visuales o sonoras para advertir sobre objetos que no están en su campo de visión.
Freno de emergencia / Automatic Emergency Braking	***AEB***	Toma el control del pedal de freno en caso de que los sensores detecten un obstáculo próximo.
Comunicación vehículo con vehículo	***V2V***	Permite intercambiar información entre vehículos. Este mecanismo permite obtener información sobre la velocidad de otros vehículos, posicionamiento, etc.
Comunicación vehículo e infraestructura	***V2I***	Permite el intercambio de información entre el vehículo y la infraestructura. La infraestructura puede avisar sobre el estado de la carretera, posibles retenciones, accidentes, obras de mantenimiento, etc
Aviso de colisión por alcance / Rear collision warning,	***RCW***	Advierte al conductor de la proximidad de un obstáculo con el tiempo suficiente como para poder accionar el freno o incluso puede activar el frenado automático.

Tabla 4.Sistemas de asistencia al conductor

2.2. ESTUDIOS PREVIOS

A continuación, se muestra una visión general sobre algunos de los proyectos realizados sobre circulación automatizada, indicando los detalles que se tuvieron en cuenta y los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Se presentan 4 proyectos: PATH- Estudio realizado en California que se centra en la investigación de platooning como una forma de aumentar la capacidad de las carreteras; SARTRE- Estudio europeo sobre la circulación de vehículos guiados sin necesidad de modificar las infraestructuras; COMPANION-Estudio realizado por el grupo SCANIA con el interés de reducir el consumo de combustible en el sector del transporte de mercancías por carretera, muestra la estructura del sistema de a bordo; EUROPEAN TRUCK PLATOOING CHALLENGE 2016- Último estudio realizado que pone a prueba los sistemas de transporte inteligente circulando seis marcas de camiones diferentes por las carreteras europeas.

Como se ha mencionado anteriormente, existen diferentes visiones sobre el concepto de vehículos guiados o pelotón de vehículos; cuatro ejemplos de estas variaciones son: 1) SARTRE y PATH ofrecen automatización del control longitudinal y lateral, mientras que COMPANION y EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE automatizan solo el control longitudinal; 2) SARTRE asume pelotones mixtos tanto de vehículos pesados como de pasajeros, mientras que PATH, COMPANION Y EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE asumen pelotones homogéneos de un solo tipo de vehículo; 3) SARTRE, COMPANION y EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE no asumen ningún cambio en la infraestructura mientras PATH asume vías dedicadas con marcadores de referencia incrustados en la superficie de la carretera. 4) PATH y SARTRE estudia todo tipo de vehículos automatizados, mientras que COMPANION y EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE se centra en camiones guiados.

A. PATH

La investigación de PATH (Partners for Advanced Transportation Technology) fue una de las primeras grandes investigaciones acerca de sistemas automáticos de carreteras para pelotón de vehículos. Este estudio se realizó en 1997 por la Universidad de California, motivado inicialmente por la necesidad de producir un aumento significativo en la capacidad de sus carreteras, buscando gestionar la demanda de viajes con un mínimo gasto en construcción o modificación de las infraestructuras.

Los estudios mostraron que se podría aumentar la capacidad de la carretera en un factor de dos a tres sobre la capacidad actual si los vehículos fueran conducidos en pelotones de hasta diez coches. La separación entre vehículos sería la necesaria para asegurar que incluso en la peor condición, con las máximas desaceleraciones, el vehículo siguiente podría detenerse sin golpear al anterior, aunque pudiera haber choques a baja velocidad. Un extenso estudio de simulación y modelado de la seguridad y capacidad de choque mostró las ventajas del modo de pelotón sobre vehículos automáticos individuales. En este caso se supuso que todos los vehículos serían automatizados, incluyendo el primer vehículo del pelotón.

La primera prueba consistió en el control longitudinal de un pelotón de cuatro coches a una separación de 4 m a velocidades de autopista en 1994 y luego desarrolló el pelotón automatizado de ocho automóviles para la Demo 1997 del National Automated Highway System Consortium (NAHSC). Se realizaron una gran variedad de maniobras, incluyendo el cambio de carril y la unión y la salida del pelotón, así como el seguimiento normal del coche, todo bajo control completamente automático. Esto fue posible por la incorporación de tecnología tal como, señal de sensores, comunicación y coordinación V2V, y control lateral y longitudinal. Los espacios entre los vehículos dentro del pelotón se mantuvieron con un error RMS de 20 cm, lo suficientemente pequeño para que los ocupantes del vehículo sintieran como si tuvieran un acoplamiento mecánico con el vehículo precedente, manteniendo al mismo tiempo una calidad de conducción suave para el confort.

Posteriormente, las investigaciones de PATH se han centrado en vehículo pesado, truck platooning, debido a las ventajas que podrían suponer en el transporte de

mercancías. Los experimentos en pelotones de camiones han demostrado la viabilidad técnica de conducir dos camiones a una distancia de 3 m y tres camiones a una distancia de 4 m entre camiones. Estos experimentos también han mostrado un ahorro en el consumo de combustible de entre 5% a 15%.

B. SARTRE

SARTRE es un proyecto del VII Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2012) cofinanciado por la Comisión Europea que busca apoyar un cambio en la utilización de los transportes.

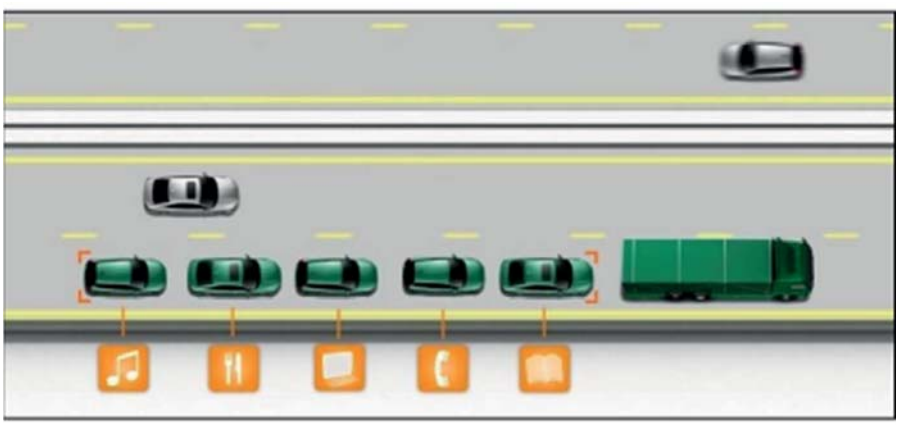


Figura 2. Vehículos guiados. Proyecto SARTRE

El objetivo de este proyecto es desarrollar soluciones que permitan la circulación de vehículos en pelotón por las autovías públicas sin la necesidad de modificar la infraestructura, tales como carriles o tramos exclusivos. SARTRE define un pelotón (convoy de carretera) como una colección de vehículos conducidos por un vehículo pesado conducido manualmente. Los vehículos detrás (camiones y coches de pasajeros) siguen el vehículo principal automáticamente; tanto lateral como longitudinalmente. Este estudio, se centra por tanto, en explorar la tecnología para incorporar el platooning en carreteras sin cambios en la infraestructura, sin afectar a la seguridad vial ni a la conducción simultánea con otros usuarios de las vías públicas. Las ventajas esperadas

del platooning incluyen una reducción en el consumo de combustible, un aumento de la seguridad, la eficacia del tráfico y mayor comodidad.

La coordinación entre vehículos se realiza gracias a un sistema de comunicación V2V basada en ITS-G5 (Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band). La comunicación *Vehicle to vehicle* permite el intercambio de información entre vehículos, como la velocidad, localización o datos recogidos por los sensores, permitiendo así, poder gestionar la velocidad de circulación, el espaciamiento entre vehículos, etc. Por tanto, el pelotón forma un sistema cooperativo de circulación. El control automático permite mantener la distancia especificada al vehículo delantero y la trayectoria seguida.

Se realizaron pruebas con 5 vehículos de diferentes tipologías (turismos, furgonetas, camiones) y diferentes características en pistas de prueba. Los sistemas utilizados en el ensayo consistían en controles de crucero y sistemas de dirección asistida eléctrica, controlando la posición longitudinal y lateral del vehículo. El control longitudinal marca el espacio entre vehículos usando sensores y datos V2V compartidos. Estos aspectos varían dependiendo del tipo de tráfico y la velocidad permitida, es decir, el propio controlador modifica la separación entre vehículos que permita en todo momento garantizar la seguridad en caso de emergencia. Se observa como con este sistema, seríamos capaces de frenar severamente en tiempos mucho más cortos de lo que podría lograr un conductor humano.

También se dispone de controles laterales, de manera que el vehículo tiene un sistema de dirección para seguir con la trayectoria automáticamente. En este caso, la corrección conseguida por el control automático es comparable o incluso mejor que las realizadas por el conductor.

Cuando los vehículos están siendo conducidos en modo automático, el conductor tiene la posibilidad de cambiar a modo manual en todo momento. Esta anulación se tomará en el sistema como un evento inusual y por tanto se aumentarán los márgenes de seguridad entre vehículos dentro del pelotón.

En este estudio, la incorporación de un vehículo no automatizado dentro del pelotón se toma como un evento aislado, entendiendo su incorporación como una maniobra de cambio de carril y por tanto de corta duración. En estos casos el vehículo

automatizado adaptaría su velocidad, aunque no sea constante y aumentaría la distancia de seguridad.

Los ensayos se realizaron en pistas de prueba con cinco vehículos de tipo mixto equipados con un alto sistema tecnológico que permitía la comunicación entre vehículos. Se obtuvieron resultados del tiempo necesario para cambiar la velocidad y el espaciamiento de manera simultánea entre vehículos. En 30 segundos los vehículos incrementan de 7 a 12 metros la distancia entre ellos, los vehículos en la parte trasera del pelotón se desacelerarán a una velocidad mayor que los de la parte delantera. Además, se comprueba la variación entre el control de la dirección de manera manual o automática, con resultados bastante similares. Por último, se comprobó la reducción del consumo de combustible al circular los 5 vehículos a 90 km/h con una distancia entre ellos de 4 m, donde se observaba un descenso de entre 8% y 16% de consumo.

Figura 3. Pelotón de vehículos de tipo mixto

C. COMPANION

El proyecto COMPANION es un estudio de investigación europeo sobre desarrollo de tecnología de movilidad para la circulación de vehículos pesados en pelotón. El proyecto se inició en octubre de 2013 y está dirigido por el Sr. Magnus Adolfson, de SCANIA, con la colaboración de varias empresas e institutos de investigación. El interés

principal de SCANIA en el platooning se centra en la reducción del consumo de combustible para disminuir costes en el transporte de mercancías.

En la puesta en práctica realizada, los camiones mantenían una distancia de 10 metros entre ellos, consiguiendo que el consumo de combustible descendiera un 12%.

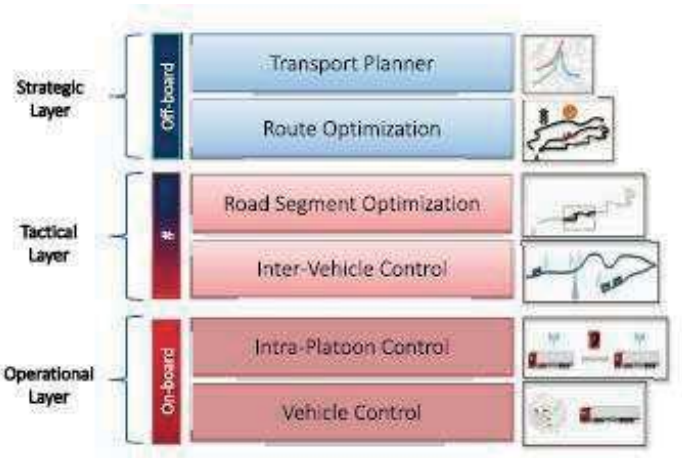


Figura 4. Estructura de la plataforma "on-board" - "off-board"

En este estudio se muestra la estructura de la plataforma incorporada en los vehículos para la gestión de la circulación guiada, llamada "on-board" y "off-board". El sistema consiste en un mecanismo de toma de decisiones que es responsable del control del vehículo, el control del pelotón y la comunicación entre los vehículos.

Antes de iniciar un transporte, se asigna el punto de inicio y destino de la ruta deseada. El sistema off-board calcula la ruta óptima para ese transporte, buscando los vehículos con la misma ruta para enlazarse a ellos, calculando los perfiles de velocidad y puntos de fusión y división de los pelotones, a esto se le conoce como "Plan de pelotón".

Al llegar al punto de fusión, se comunica al conductor la posibilidad de enlazarse al vehículo, adaptando su velocidad automáticamente. La automatización realiza solo el control longitudinal, por lo que el conductor es responsable del control lateral del vehículo. En caso de un frenado de emergencia de uno de los vehículos del pelotón, los siguientes activan el freno automáticamente.

Cuando el usuario desea salirse del pelotón para continuar con su ruta, el conductor simplemente tiene que realizar un movimiento longitudinal, permitiendo así la conducción manual como vehículo individual.

La planificación y control en el sistema COMPANION se subdivide en tres fases, la primera fase representa la planificación estratégica del viaje. Se ha creado una interfaz WEB donde se introducen inicialmente los puntos deseados de salida y llegada, de manera que la aplicación gestiona automáticamente la ruta óptima, teniendo en cuenta la situación del tráfico, los parámetros del vehículo (peso, longitud, etc) y las características de las carreteras. Se calculan los perfiles de velocidad óptimos y los puntos de fusión/división para pelotones. La segunda fase consiste en la parte táctica del sistema, donde se define la velocidad de circulación en cada tramo y el espaciamiento necesario entre vehículos. Por último, está la fase operativa, que comprende el control del pelotón y del propio vehículo. Esta última es la encargada de controlar la distancia entre vehículos y las maniobras oportunas para mantener la estabilidad del pelotón.

D. EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE 2016

El proyecto *European Truck Platooning Challenge 2016*, es la iniciativa más reciente enfocada al desarrollo de camiones guiados. El estudio se inicia en mayo de 2015 tras el Congreso Mundial de los Sistemas de Transporte en Burdeos, donde se decidió afrontar el desafío de los camiones guiados de manera conjunta entre los diferentes invitados. La propuesta está dirigida por el Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de los Países Bajos, junto con varios colaboradores, pertenecientes a institutos de investigación, la industria de la automoción, empresas del transporte de mercancías y asociaciones del automóvil. Todos ellos trabajando de manera coordinada para conseguir homogeneizar políticas y cuestiones técnicas.

Los holandeses iniciaron este reto como un primer experimento práctico en la conducción automatizada por las carreteras públicas europeas junto con la corriente de circulación ordinaria, basándose en la experiencia de los norteamericanos en su estudio *Advanced Transportation Technology* (PATH) mencionado anteriormente. Se planificó la

salida de camiones de seis fabricantes europeos diferentes: Scania y Volvo desde Suecia, MAN Truck & Bus y Daimler desde Alemania y DAF e IVECO desde Bélgica, para llegar a la terminal del Puerto de Rotterdam el día 6 de abril de 2016, recorriendo más de 2000 Km y cruzando cuatro fronteras.

Con este estudio se pretendía resolver muchas cuestiones que impiden avanzar en materia de movilidad inteligente como: el papel del conductor en la conducción guiada, las reacciones de otros usuarios con el paso del platooning, la reacción social, las opiniones de los transportistas, aspectos operacionales, etc., pero sobre todo para mostrar la eficiencia de los "truck platooning" y así poder llevar este tema a la agenda política de la Comisión Europea. Se busca eliminar las barreras legales que ralentizan el comercio internacional.

Figura 5. Pelotón de tres vehículos guiados

La distancia entre camiones a partir de la cual se considera una conducción segura se encuentra entre 0,5 y 0,8 segundos. Esto equivale a una distancia de 11 metros a una velocidad de 80 Km/h. Esta distancia también favorece que la comunicación inalámbrica sea más estable.

Los holandeses han creado "El Código de Prácticas" donde especifican normas sobre la circulación de los vehículos guiados en las carreteras. Los conductores que participaron en el estudio estaban obligados a acatar las normas que en él se establecían.

El resultado del estudio práctico realizado por *European Truck Platooning Challange 2016* fue positivo, el sistema de apoyo al platooning funcionó perfectamente y la comunicación entre los vehículos permitió una conducción cooperativa sin incidencias. Este grupo emitió un informe de las lecciones aprendidas tras la conducción de camiones guiados por las carreteras públicas europeas. El documento está basado en el análisis de los requisitos y recomendaciones realizados por los fabricantes, las políticas de transporte y los resultados obtenidos en las entrevistas realizadas a los conductores de los vehículos. El documento que emitieron con las conclusiones, llamado *Lecciones aprendidas* será la base para nuestro estudio. Algunas de las problemáticas citadas en el mismo, divididas en función del objeto afectado, se muestran a continuación:

- Conductores de los vehículos en pelotón
- Conductores del resto de vehículos.
- Características de la carretera y el tráfico
- Legislación

Conductores de los vehículos en pelotón

1) Los conductores sentían mayor responsabilidad que si circularan de manera aislada, ya que sabían que formaban parte de una sola entidad y cualquier movimiento afectaría al resto. Esto se agravaba en el caso del conductor del vehículo piloto.

2) El conductor guía debe conocer en todo momento la longitud total del pelotón y el número de vehículos enlazados para adaptar las maniobras de circulación.

3) Los conductores deben estar familiarizados con el sistema de a bordo, siendo capaces de cambiar de un modo a otro con facilidad.

4) En muchas ocasiones eran los propios conductores los que se desacoplaban, ya que tenían que ceder el paso en salidas o entradas a la autovía o por circunstancias que suponían algún riesgo.

5) La conexión era interrumpida por vehículos que se incorporaban entre los camiones, esto suponía un inquietud para los conductores y además, no permitía al conductor mantener su atención en otra actividad.

6) El conductor guía está conduciendo de manera manual, por lo que recae mucha responsabilidad sobre él.

7) El resto de vehículos enlazados debe conocer lo que sucede delante del vehículo guía, ya que al conducir muy próximo al vehículo precedente su campo de visión es limitado y esto genera inseguridad.

8) Los conductores deben comunicarse continuamente para conducir de manera cooperativa.

9) Cuando el pelotón se rompe, el conductor guía debe enterarse para reducir la velocidad y permitir de nuevo el enlace.

Conductores del resto de vehículos

1) Se observó que muchos usuarios tomaron más tiempo para decidir si adelantar al pelotón de camiones. Algunos incluso retrocedían al ver la longitud del pelotón.

2) Los camiones no equipados se quedaban atrapados detrás del pelotón, o necesitaban mucho tiempo para adelantar a todo el pelotón. Esto suponía un riesgo importante.

3) Los usuarios se introducían entre los vehículos conectados porque desconocían que estaban enlazados y la distancia con la que circulaban lo permitía.

4) Se observa que los vehículos aceleraban al encontrarse con el pelotón de camiones, con el fin de adelantarlo cuanto antes.

5) En muchas ocasiones, los carriles de salida no estaban anunciados con suficiente anticipación, lo que suponía un riesgo. Se observa cómo los vehículos que tenían intención de salirse aceleraban por miedo a perder la salida.

Características de la carretera y el tráfico

1) La efectividad del concepto de platooning de camiones se reduce considerablemente cuando hay un gran número de entradas y salidas juntas.

2) En túneles se podría perder la comunicación entre vehículos. Bélgica exigió que se desconectasen 200 metros antes de acceder a un túnel.

3) Se debe marcar mayor distancia en pendientes y curvas.

4) Los carriles de aceleración y desaceleración se quedaban cortos y tenían que desconectarse, ya que la intención es realizar el cambio de carril simultaneo en todos los vehículos.

5) Mayor desgaste de las carreteras y puentes. Se exigió que se desconectaran cuando pasaran por un puente.

6) Se requerirá de un mayor mantenimiento de la infraestructura, ya que el paso continuado de vehículos pesados supondrá un mayor desgaste

7) No se puede circular en pelotón en situaciones de tráfico complejo, como son: tráfico denso, atascos, obras de carretera, etc.

8) En condiciones climáticas adversas se deben aumentar las distancias entre vehículos.

Legislativo

1) La velocidad máxima que se aprobó fue la misma que la permitida para vehículos pesados en cada país, de 80 km/h, excepto en Bélgica que es de 90 km/h. Esta velocidad máxima provoca más maniobras de adelantamiento por parte de otros camiones que si el pelotón de camiones estuviera conduciendo de acuerdo a la velocidad real de conducción de los camiones no equipados. Se observó que los adelantamientos fueron menores en Bélgica, donde la velocidad máxima era superior.

2) La distancia aprobada entre camiones agrupados dependía de cada país, Suiza, Dinamarca y el sur de Alemania exigían una distancia mínima de 0,5 segundos, mientras que el norte de Alemania, Bélgica y los Países Bajos una distancia de entre 0,8 segundos y 1,2 segundos. En ciertas zonas, esta distancia era superior a la separación con la que circulaban el resto de camiones no equipados. Se observó como en los países donde se exigía menor distancia las interrupciones por vehículos que se fusionaban era menor.

3) Se requería de formación a los conductores.

4) La visualización y reconocimiento de los pelotones era un aspecto importante. Se dispusieron bandas informativas en los camiones y luces intermitentes. Esta última resulto ser la más efectiva.

5) Se aprobaron rutas específicas por las que podrían circular los camiones con modo automático.

Inicialmente se hablaba de ventajas como: mayor seguridad, rendimiento mejorado, ahorro de combustible, reducción de emisiones y menores costes de mano de obra. Dados los resultados del análisis, ¿se siguen consiguiendo los beneficios que se estimaron sobre el platooning?

- **Mejora de la seguridad:** En este caso debemos distinguir entre la seguridad del vehículo y la seguridad del tráfico. La primera está garantizada gracias al control longitudinal del vehículo y al sistema de frenado automático de emergencia. La seguridad del tráfico también se ve favorecida por el sistema de platooning, ya que los camiones están circulando a una velocidad constante que responde a los límites de seguridad. Además, se reduce el número de vehículos circulando de manera manual y por tanto, la probabilidad de fallo humano. Pero hay un aspecto donde esta seguridad no queda tan clara: las maniobras del resto de usuarios al encontrarse con un pelotón de camiones, especialmente en el caso de camiones no equipados con sistemas de guiado.
- **Rendimiento mejorado:** La mejora del rendimiento en la circulación de camiones hace referencia al aumento de la estabilidad del flujo de tráfico y la comodidad de una conducción guiada. Este aspecto se ve bastante afectado por los resultados del "European Truck Platooning Challenge 2016", ya que se produjeron más desacoplamientos de los esperados y por tanto el tiempo de circulación guiada fue menor. Además, fue necesario que los conductores de los vehículos guiados estuvieran atentos a la conducción, ya que en cualquier momento debían volver a coger el mando del vehículo.

- **Ahorro de combustible y reducción de emisiones:** La reducción en el consumo de combustible se ve favorecida por una conducción a velocidad constante y la proximidad del vehículo delantero. En el Desafío Europeo no se monitoreó el ahorro de combustible y por tanto, no hay datos concluyentes. La reducción de emisiones va asociada al menor consumo de combustible.
- **Menores costos laborales:** Esto se asocia a tres aspectos: el uso alternativo del tiempo de conducción, permitiendo realizar tareas adicionales, aumentar el tiempo de circulación de los camiones y reducir las paradas de descanso. Sin embargo, las entrevistas sugirieron que la tarea de conducción requería más atención de la prevista.

2.2.1. COMPARATIVA

A continuación, se muestra una tabla resumen de varios de los parámetros que se han tenido en cuenta en los distintos estudios especificados, con el fin de obtener una visión comparativa de las líneas de investigación y las conclusiones de los mismos. Los parámetros son:

- Tipo de vehículo, indica si el estudio se realiza tanto para vehículos ligeros como pesados o se centra solo en una tipología.
- Nivel de automatización, si el vehículo dispone de control longitudinal y/o lateral
- Requerimientos de la infraestructura, si se dedica algún carril exclusivamente para el pelotón de vehículos guiados o se necesita de alguna modificación.
- Distancias o parámetros resultantes en las pruebas o simulaciones del platooning, mostrando las distancias que se marcaron en cada estudio y el número de vehículos enlazados.
- Observaciones, donde se muestran los objetivos con los que se inició el estudio y algunos resultados obtenidos.

	Tipo de vehículo	Nivel de control	Exigencias de la infraestructura	Vehículos en platooning	Observaciones
PATH	Vehículos ligeros y pesados. Todos son automáticos, hasta el primero.	Control longitudinal y lateral	Sin cambios en la infraestructura	4 coches a 4 m 2 camiones a 3 m 3 camiones a 4 m	➢ Aumentar capacidad de las carreteras. ➢ Reducción del consumo entre un 5 y un 15%
SARTRE	Vehículos ligeros y pesados. El vehículo que guía debe ser un camión y conduce manualmente.	Control longitudinal y lateral	Carriles dedicados	5 vehículos a 4 m Observan cambio de velocidad y espacio según el vehículo precedente	➢ Estudios en pista de prueba ➢ Desarrollo del sistema de platooning ➢ Reducción consumo entre un 8 y un 16%
COMPANION	Vehículos pesados.	Control longitudinal	Sin cambios en la infraestructura	Distancia de 10 metros	➢ Reducción del consumo para reducir costes en transporte de mercancías. ➢ Reducción media de 12%
EU. TRUCK PLATOONING CHALLENGE	Vehículos pesados	Control longitudinal	Sin cambios en la infraestructura	Distancia que varía en función de la velocidad, de entre 0,3 y 0,5 segundos (Unos 6,5 m a 80 km/h)	➢ Proyecto práctico en las carreteras europeas. ➢ Mejora del transporte de mercancías por carretera

Tabla 5. Comparativa estudios sobre vehículos guiados

3. PROBLEMÁTICA DE LA CIRCULACIÓN DE CAMIONES GUIADOS

3.1. DIFERENCIAS ENTRE CAMIÓN Y PELOTÓN DE CAMIONES

Antes de estudiar la influencia que podría provocar la circulación de camiones guiados sobre las infraestructuras y el tráfico, es necesario especificar las diferencias existentes entre el paso de un camión convencional y el de esta nueva modalidad de vehículo. Se especifican sólo aquellos componentes que influyen en las variables de tráfico, obviando la diferencia fundamental del equipamiento tecnológico incorporado.

Son tres las características básicas: longitud total, velocidad de circulación y espaciamiento entre vehículos.

- **Velocidad de circulación:** La velocidad a la que pueden circular dependerá de la potencia del camión y de la carga que estén transportando. Al conducir de manera conjunta, el resto de vehículos tendrá que adoptar la velocidad máxima que alcanza el vehículo más lento. Además, la velocidad de circulación del pelotón dependerá, como para el resto de usuarios, del tipo de vía y de la densidad de tráfico existente.

- **Espaciamiento entre vehículos**: El objetivo del pelotón de camiones es conducir lo más cerca posible del vehículo precedente, con el fin de reducir el consumo de combustible. Esto se consigue, cuando el camión guía actúa como barrera, minimizando la resistencia al viento. A su vez, esta distancia debe ser tal que, en caso de que el vehículo de delante frene hasta detenerse, al encontrarse una situación de emergencia, el vehículo de atrás sea capaz de frenar también sin provocar ningún accidente. Por tanto, la separación dependerá de la velocidad alcanzada. En el caso de un segmento de carretera ideal, sin pendiente y en un tramo recto, el espaciamiento será:

$$s = \frac{V}{3{,}6} * t$$

donde,

s: espaciamiento entre vehículos (m)

V: velocidad de circulación del pelotón (km/h)

t: Distancia entre vehículos en función de la velocidad (segundos). Este tiempo viene marcado por el sistema inteligente incluido en el pelotón de camiones.

En el estudio *European Truck Platooning Challange* los permisos emitidos son para una distancia mínima de 0,5 segundos, por tanto, se tomará este valor para los siguientes supuestos. En la tabla que se muestra a continuación, se indican las distancias mínimas admitidas según la longitud del camión y la velocidad a la que está circulando el pelotón. La distancia entre vehículos la tomamos de 0,5 segundos para los camiones de menor longitud hasta 0,8 segundos para los Megatrucks:

Longitud camión	Velocidad	Espaciamiento	Distancia entre vehículos enlazados
m	Km/h	seg	m
12	70	0,5	9,7
12	80	0,5	11,1
12	90	0,5	12,5
16,5	70	0,6	11,7
16,5	80	0,6	13,3
16,5	90	0,6	15,0
18,75	70	0,7	13,6
18,75	80	0,7	15,6
18,75	90	0,7	17,5
25,25	70	0,8	15,6
25,25	80	0,8	17,8
25,25	90	0,8	20,0

Tabla 6. Distancia entre vehículos en función de la tipología de camión enlazado

- **Longitud total**: Cuando los vehículos se encuentran enlazados para realizar una circulación coordinada, se impide el acceso de otro vehículo entre ellos. Por tanto, su paso equivaldría al de un camión de longitud igual a la suma de las longitudes de los vehículos y el espacio marcado entre ellos. Dependiendo de la tipología de camión empleada y el número de vehículos enlazados, la longitud será diferente. En este documento solo se estudian pelotones de camiones de 2 o 3 vehículos enlazados. Por tanto, la longitud total quedaría:

$$L_{total} = n^{\underline{o}} veh.\, enlazados * long.\, camión + distancia\ entre\ camiones$$

Nº vehículos enlazados	Longitud camión	Velocidad	Espaciamiento	Distancia entre camiones enlazados	Longitud total del pelotón
	m	Km/h	s	m	m
2	12	70	0,5	9,7	33,7
2	12	80	0,5	11,1	35,1
2	12	90	0,5	12,5	36,5
3	12	70	0,5	9,7	55,4
3	12	80	0,5	11,1	58,2
3	12	90	0,5	12,5	61,0
2	16,5	70	0,6	11,7	44,7
2	16,5	80	0,6	13,3	46,3
2	16,5	90	0,6	15,0	48,0
3	16,5	70	0,6	11,7	72,8
3	16,5	80	0,6	13,3	76,2
3	16,5	90	0,6	15,0	79,5
2	18,75	70	0,7	13,6	51,1
2	18,75	80	0,7	15,6	53,1
2	18,75	90	0,7	17,5	55,0
3	18,75	70	0,7	13,6	83,5
3	18,75	80	0,7	15,6	87,4
3	18,75	90	0,7	17,5	91,3
2	25,25	70	0,8	15,6	66,1
2	25,25	80	0,8	17,8	68,3
2	25,25	90	0,8	20,0	70,5
3	25,25	70	0,8	15,6	106,9
3	25,25	80	0,8	17,8	111,3
3	25,25	90	0,8	20,0	115,8

Tabla 7. Longitud total del pelotón de camiones en función de la tipología de camión enlazado

Figura 6. Ejemplo vehículo pesado guiado de 12 metros a 90 km/h

No existen, por tanto, datos fijos para los pelotones de camiones. Para este estudio se toman los datos mostrados en las tablas anteriores, simulando que los vehículos enlazados son de la misma tipología de camión y que se encuentran cargados con su tonelaje máximo.

Las características de este nuevo vehículo modifican las variables de tráfico, y por tanto, influirán en el estado del tráfico y en la infraestructura. Se pretende estimar, a partir del Highway Capacity Manual 2010 ó Manual de Capacidad de Carreteras Americano, la influencia que tendría la circulación de vehículos guiados en aspectos como la capacidad de la vía, el nivel de servicio que ofrece o el tiempo de adelantamiento necesario. Por otro lado, interesa comprobar el trazado necesario de la vía para permitir la correcta conducción, de esta nueva tipología de vehículo, sin incidencias. De este modo, se podrá identificar aquellos aspectos que deberán ser modificados en caso de poner en práctica la circulación de vehículos guiados.

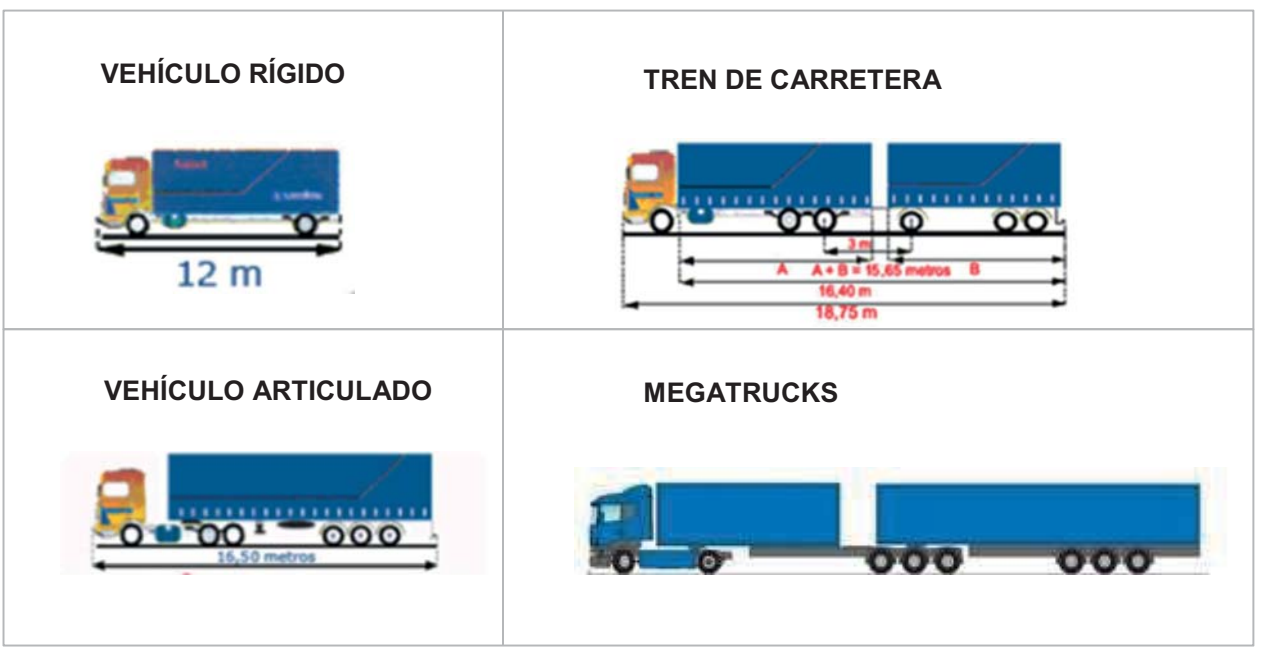
Para estudiar la influencia en el tráfico y en la infraestructura se tomará el conjunto del pelotón como un único vehículo de mayores dimensiones.

3.1.1. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS PATRÓN

Las longitudes de los vehículos que se tienen en cuenta en este estudio corresponden a las indicadas por el Ministerio de Fomento y por la Instrucción de Carreteras 3.1. Trazado (3.1. I.C.).

CARACTERÍSTICA		TURISMO	VEHÍCULO RÍGIDO	VEHÍCULO ARTICULADO		TREN DE CARRETERA		MEGATRUCK
				TRACTORA	SEMIRRE-MOLQUE	CAMIÓN	REMOLQUE	
Anchura (m)		1,8	2,45 / 2,55	2,44	2,55	2,45	2,55	2,6
Longitud (m)	Unidad	4,8	12,0	6,3	13,6	10,5	7,25	25,25
	Total			16,5		18,75		
Altura (m)			2,79 / 4,04	2,79	4,04	2,79 / 4,04	4,04	4,15
Masa máxima autorizada (Tn)	2 Ejes		18					
	3 Ejes		25 / 26	36 / 38				
	4 Ejes		31 / 32	40		36		
	Más de 4 Ejes					40		60

Tabla 8. Características vehículos pesados. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1.I.C



Se incluye en el estudio los Megatrucks, ya que, a pesar de que no están aún muy presentes en nuestras carreteras, las Directivas Europeas ya permiten la circulación de estos vehículos por diversos países europeos.

3.2. IMPACTO SOBRE EL TRÁFICO

Al tratarse de una tipología de conducción diferente a la convencional, es necesario realizar un primer análisis de la influencia que podría provocar su incorporación en el tráfico. En este caso, se profundiza acerca de dos factores importantes: **el estado del tráfico**, entendiéndolo como la capacidad de una vía y el nivel de servicio que ofrece, y **los adelantamientos**. Se intentará cuantificar estos dos factores, pero el paso de un conjunto de vehículos circulando de manera coordinada podrá influir en otras conductas presentes en las vías, como son las incorporaciones y salidas de la vía. Estas maniobras se estudiarán más adelante por medio de un análisis del tráfico real.

3.2.1. ESTADO DEL TRÁFICO

El estado del tráfico hace referencia a la **capacidad** de una vía y por tanto, al **nivel de servicio** en el que está operando la vía o cada uno de los segmentos que conforman la carretera. Este análisis tiene como objetivo estimar el número de vehículos que una carretera es capaz de acoger sin suponer un riesgo durante un periodo específico de tiempo.

Para su estudio nos hemos basado en el Highway Capacity Manual 2010 o Manual de Capacidad de Carreteras Americano, al que nos referiremos más adelante como *HCM 2010*. Se trata de una publicación estadounidense realizada por la Junta de Investigación del Transporte de la Academia Nacional de Ciencias, cuyo documento incluye conceptos, guías y procedimientos para calcular la capacidad y calidad de servicio de las vías. Las fórmulas utilizadas hacen referencia a valores de longitud en millas, por lo que se indicará primero el resultado en dichas unidades y posteriormente la conversión en unidades del sistema internacional.

A. Capacidad.

La capacidad de una carretera se define como el máximo número de vehículos ligeros equivalentes que pueden atravesar una sección de la vía en un determinado periodo de tiempo, en unas condiciones determinadas de la propia vía y del tráfico en vehículos/hora. Se expresa en vehículos ligeros equivalentes debido a la disparidad de vehículos presentes en la carretera. Bajo estas condiciones, el *HCM 2010* estima que las vías de calzadas separadas con una velocidad de flujo libre de 75 mi/h (120,7 km/h) tienen una capacidad de 2.400 vehículos ligeros por carril por hora. Su valor depende de los siguientes factores:

- *Factores que dependen de la carretera*: Anchura de carril, existencia de obstáculos laterales o el trazado de la vía son algunos de los factores que influyen en la velocidad de flujo libre, *FFS (Free-flow speed)*. Esta velocidad se define como la velocidad media de los coches cuando el tráfico es ligero. Su valor equivale a:

$$FFS = 75.4 - f_{LW} - f_{LC} - 3.22\, TRD^{0.84}$$

donde,

FFS: Velocidad de flujo libre (mi/h)

f_{LW}: Factor de corrección por anchura de carril (mi/h)

f_{LC}: Factor de corrección por obstáculos laterales (mi/h)

TRD: Existencia de accesos o salidas de vía por milla (accesos/mi)

- *Factores que dependen del tráfico*: Hacen referencia a la distribución del tráfico entre carriles, variación del tráfico durante periodos cortos de tiempo (Factor de Hora Punta), tipo de conductor (habitual o no) y la proporción de vehículos pesados que circulan por la vía. Estos factores permiten estimar la intensidad de tráfico equivalente, medida en vehículos ligeros por hora, a partir del volumen de tráfico de una carretera:

$$I_{eq} = \frac{I}{FHP * n * f_{HV} * f_P}$$

donde,

I_{eq}:Intensidad de tráfico equivalente ($V_{eq}/h/carril$)

I: Intensidad de tráfico real (veh/h)

FHP: Factor de hora punta. Parámetro que relaciona la intensidad horaria de la hora punta y cuatro veces la intensidad del cuarto de hora más cargado de esa hora punta:

$$FHP = \frac{I_{60}}{4 * I_{15}}$$

En las autovías el valor de FHP se encuentra entre 0,85 y 0,98, ya que la corriente de tráfico suele ser homogénea.

n: Nº de carriles

f_{HV}: Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.

f_P: Factor de conductores habituales. Este parámetro tiene en cuenta la conducción de usuarios no familiarizados con la carretera. En general se adopta el valor de 1.

Por tanto, como la intensidad de tráfico equivalente depende de los vehículos pesados, la capacidad se verá modificada por el paso de vehículos pesados guiados:

- *Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados* (f_{HV}): Los valores de capacidad, que definen el máximo número de vehículos ligeros que pueden circular en un punto dado durante un determinado periodo de tiempo, se dan en vehículos ligeros y por tanto se debe conocer la equivalencia de un vehículo pesado a vehículos ligeros.

El HCM 2010 toma por vehículo pesado cualquier vehículo con más de cuatro ruedas. Estos vehículos generalmente se clasifican como camiones, autobuses o vehículos

recreativos. Los camiones cubren una amplia variedad de vehículos, desde camiones de una unidad hasta combinaciones de tractor-remolque de tres unidades. Los vehículos recreativos hacen referencia a autocaravanas y camiones pequeños con remolque (para barcos, vehículos todoterreno, etc.). El efecto de los vehículos pesados se tiene en cuenta aplicando el siguiente factor de ajuste:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde,

f_{HV}: Factor de ajuste de vehículos pesados

P_T: Proporción de camiones y autobuses en la corriente de tráfico

P_R: Proporción de vehículos recreativos en la corriente de tráfico

E_T: Vehículos ligeros equivalentes para camiones y autobuses

E_R: Vehículos ligeros equivalentes para vehículos recreativos

Estos vehículos equivalentes representan el número de vehículos ligeros que ocuparían el mismo tramo de autopista que un camión, autobús o vehículo recreativo en las condiciones ideales. Pero el efecto de los vehículos pesados sobre el flujo de tráfico depende, a su vez, del terreno y la proporción que suponen dentro de la corriente de tráfico. Por tanto, su efecto varía dependiendo de:

- Terreno llano
- Terreno ascendente
- Terreno descendente

Se hace referencia al tipo de terreno por la influencia que tiene sobre la velocidad máxima que los camiones pueden mantener en el tramo de carretera. Si el terreno es descendente obligará a los camiones a desacelerar mientras que en un tramo montañoso serán incapaces de mantener la velocidad deseada. El HCM 2010 (*Highway Capacity*

Manual) muestra los siguientes valores de equivalencia para las diferentes condiciones de carretera:

	VEHÍCULOS LIGEROS EQUIVALENTES		
Vehículos	**Llano**	**Ondulado**	**Montañoso**
Camiones y autobuses. E_T	1,5	2,5	4,5
Vehículos de recreo. E_R	1,2	2,0	4,0

Tabla 9. Vehículos equivalentes según HCM 2010

Estos valores corresponden a vehículos pesados que circulan individualmente. En el caso del pelotón de camiones los vehículos equivalentes serán inferiores, ya que con el sistema platooning la separación entre vehículos es menor.

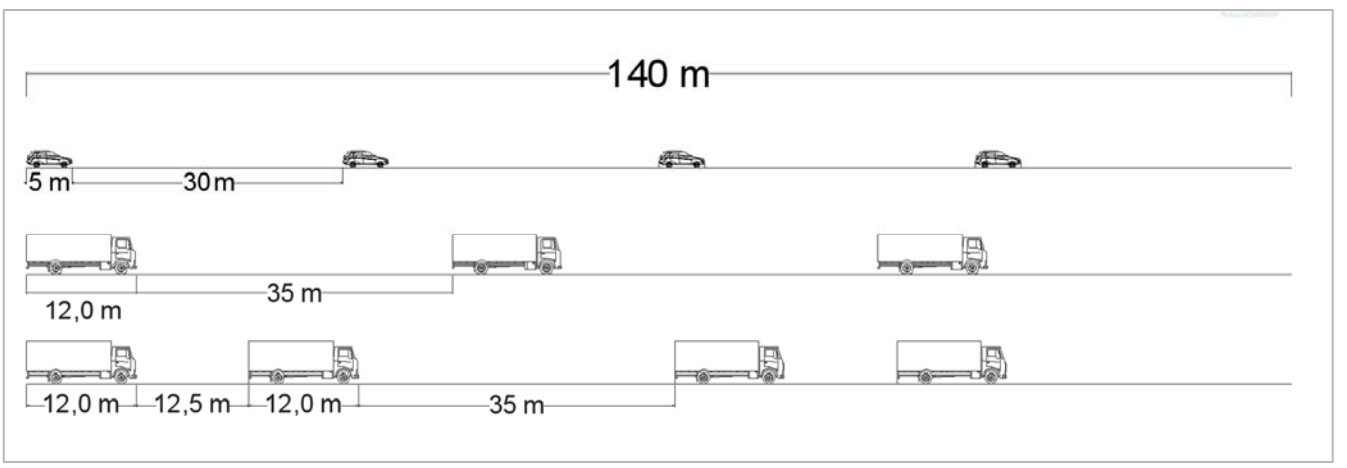


Figura 7. Esquema ilustrativo de la capacidad en vehículos/km

Como se observa en la figura 7, los vehículos pesados guiados ocuparían menor longitud de carretera. Para tener en cuenta esta variación en el cálculo de la intensidad de tráfico de una carretera, se podría incluir el factor de ajuste correspondiente a vehículos guiados en la fórmula de vehículos equivalentes, quedando:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_{TNG}(E_T - 1) + P_G(E_G - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde,

P_{TNG}: Proporción de vehículos pesados no guiados en la corriente de tráfico

P_G: Proporción de vehículos pesados guiados en la corriente de tráfico.

E_G: Vehículos ligeros equivalentes para pelotón de camiones.

En terreno llano los vehículos pesados pueden mantener una velocidad de operación similar a los vehículos ligeros, por lo que de forma simplificada, se podría asimilar, a falta de estudio más detallado, que los factores de equivalencia en terreno llano del Manual de Capacidad responden a condiciones geométricas de ocupación de la calzada.

En este documento, se propone estimar los posibles factores de equivalencia en función de la tipología de camión en terreno llano tanto para vehículos pesados guiados ($\boldsymbol{E_G}$) como para vehículos pesados convencionales ($\boldsymbol{E_T}$), ya que el Manual de Capacidad no especifica el tipo de vehículo pesado. En la siguiente figura se muestra la metodología empleada para obtener el factor de equivalencia:

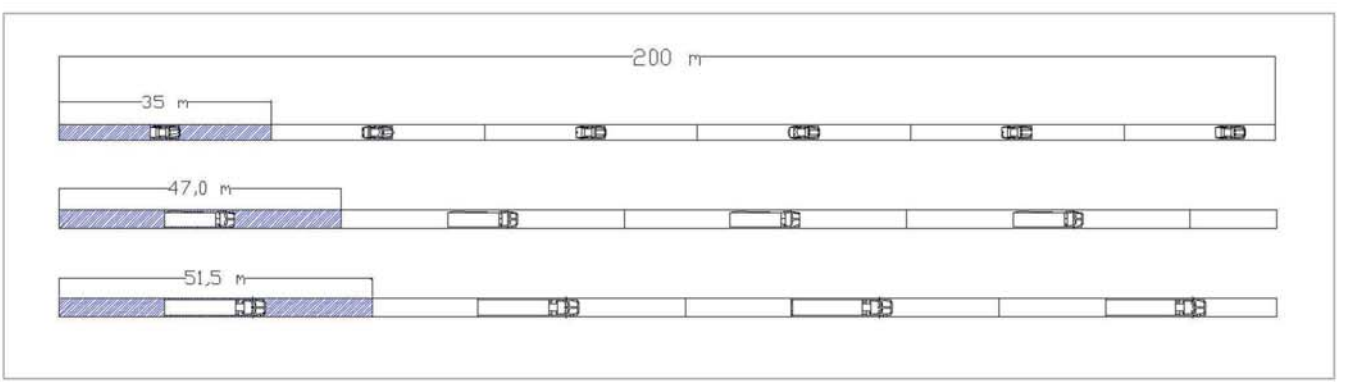


Figura 8. Esquema ilustrativo del área de ocupación para el cálculo de factores de equivalencia

	Longitud vehículo	Separación entre vehículos no enlazados	Densidad (veh/km)	E_T $\left(D_{v.ligero}/D_i\right)$
Vehículo ligero	5 m	30 m	28	1,0
Vehículo pesado	12 m	35 m	21	1,34
	16,5 m		19	1,47
	18,75 m		18	1,54
	25,25 m		16	1,72

Tabla 10. Factor de equivalencia para vehículos pesados convencionales. Tabla asociada a las figuras 7 y 8

Lo mismo ocurre en el caso de vehículos guiados:

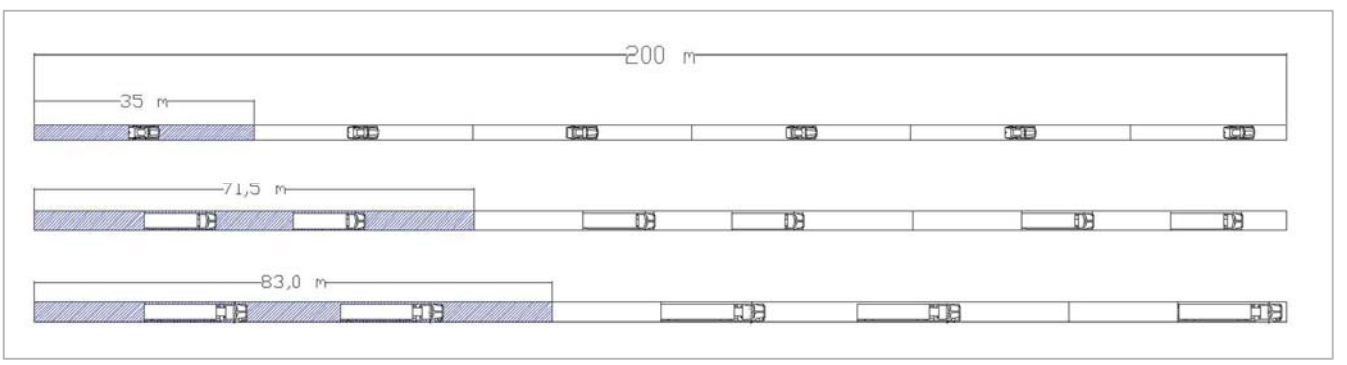


Figura 9. Esquema ilustrativo del área de ocupación para el cálculo de factores equivalentes de vehículos guiados

	Longitud vehículo	Separación entre vehículos no enlazados	Densidad (veh/km)	E_G Pelotón $\left({D_{v.ligero}}/{D_i}\right)$	E_G Indiv. $\left({E_{G,pelotón}}/{nº\ veh}\right)$
Vehículo ligero	5 m	30 m	28	-	-
Pelotón de 2 vehículos	12 m	35 m	14	2,04	1,02
	16,5 m		12	2,37	1,18
	18,75 m		11	2,57	1,28
	25,25 m		9	3,01	1,51
Pelotón de 3 vehículos	12 m	35 m	12	2,74	0,91
	16,5 m		10	3,27	1,09
	18,75 m		9	3,61	1,20
	25,25 m		8	4,31	1,44

Tabla 11. Factor de equivalencia para vehículos pesados guiados. Tabla asociada a las figuras 7 y 9

Para la obtención de estos factores de equivalencia se ha considerado que no hay ninguna rampa o pendiente con una longitud o inclinación que suponga un impacto significativo en las condiciones de operación del tramo.

Estos factores se han obtenido mediante correlación geométrica, a partir del espacio que ocuparía cada vehículo en el carril de estudio, teniendo en cuenta que la capacidad máxima, según el HCM 2010 es de 28 vehículos ligeros por kilómetro.

A modo de ejemplo, se va a comprobar la variación de intensidad de tráfico equivalente que resultaría de una intensidad de tráfico real en carretera en terreno llano de 1.500 vehículos/hora por carril. En el eje de abscisas se representa la proporción de vehículos pesados presentes en el tráfico, como es lógico, a medida que su representación aumenta, la intensidad de tráfico equivalente también. Las distintas líneas indican la

variación de intensidad de tráfico equivalente en función del porcentaje de vehículos pesados que se encuentran guiados del total de vehículos pesados.

	VEHÍCULOS PESADOS CONVENCIONALES	VEHÍCULOS PESADOS GUIADOS
Ningún vehículo guiado	20%	0%
Vehículos guiados 10%	18%	2%
Vehículos guiados 20%	16%	4%
Vehículos guiados 30%	14%	6%
Vehículos guiados 40%	12%	8%
Vehículos guiados 50%	10%	10%

Tabla 12. Proporción de vehículos pesados convencionales y vehículos pesados guiados para un 20 % de vehículos pesados totales

Para su representación se ha fijado que los vehículos guiados están formados por dos vehículos pesados de 12 metros, utilizando por tanto, un valor $\boldsymbol{E_G = 1,02}$. Por tanto, la intensidad de tráfico equivalente para este caso quedaría:

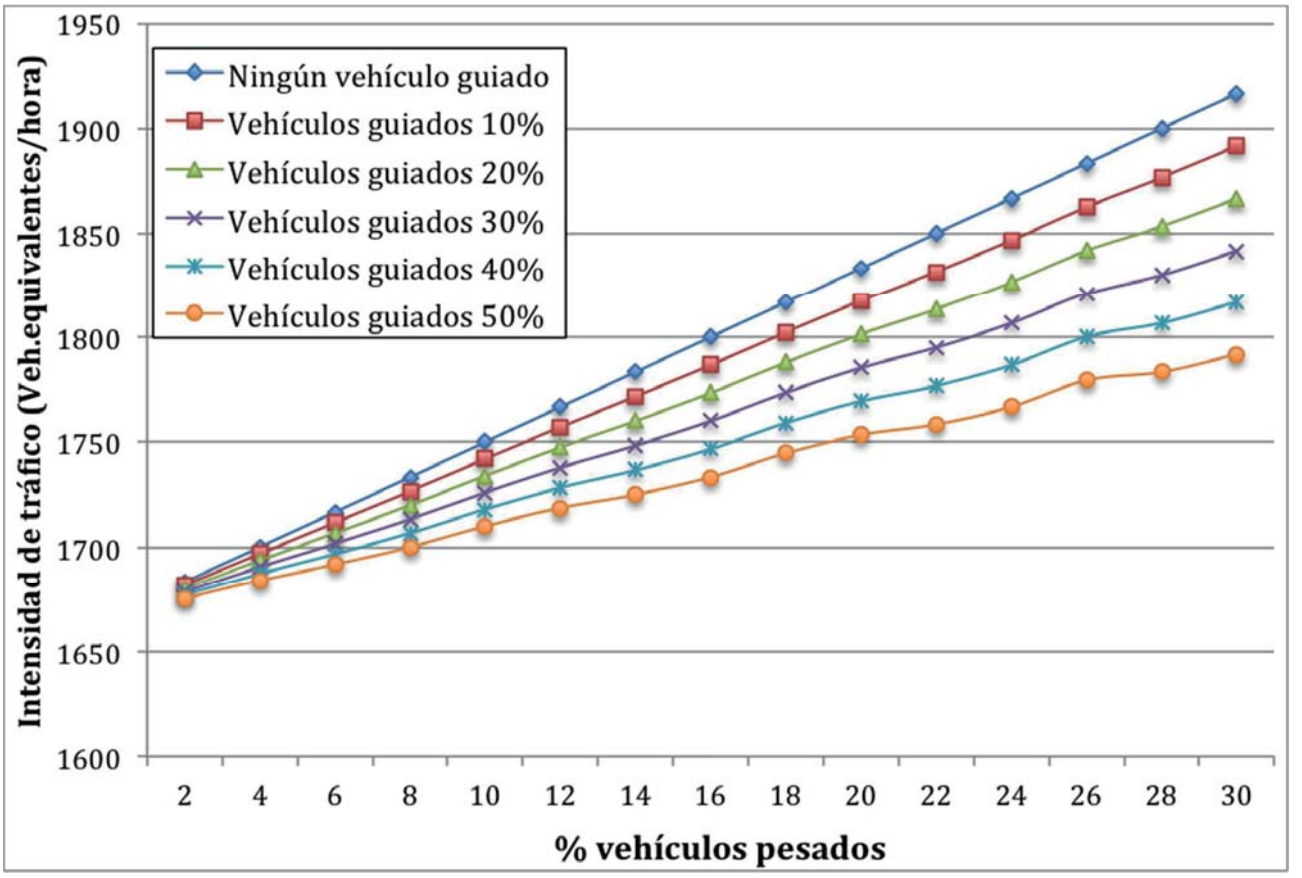


Figura 10. Variación de la Intensidad de tráfico equivalente en función del % vehículos pesados y proporción de estos guiados. Suponiendo pelotones de 2 vehículos pesados de 12 metros.

A la vista de la figura anterior, podemos concluir que para un mismo porcentaje de vehículos pesados, se obtiene una menor intensidad de tráfico equivalente cuanto mayor es el número de estos vehículos pesados que van guiados, para el mismo número de vehículos pesados en calzada. Como hemos indicado que la capacidad de una carretera se define como el máximo número de vehículos que pueden atravesar una sección de la vía durante un periodo de tiempo, podemos concluir que el aumento del uso de vehículos guiados aumentará la capacidad de la vía, al circular algunos vehículos pesados más juntos, manteniendo las condiciones de circulación de la vía.

Como es lógico, cuanto mayor es la proporción de vehículos pesados en la vía, mayor es la influencia de los vehículos guiados en la intensidad de tráfico en vehículos equivalentes.

B. Nivel de servicio

El nivel de servicio define las condiciones de funcionamiento de la red viaria y la percepción del estado del tráfico por los conductores. Estas condiciones dependen de la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, las interrupciones de la circulación, la comodidad y la seguridad vial.

La variable básica para la determinación del nivel de servicio en autopistas y autovías es la densidad y se define como:

$$D = \frac{I_{eq}}{V_{LO}}$$

donde,

D: Densidad en pc/mi/ln (veh.ligeros/km/carril)

I_{eq}: Intensidad de tráfico equivalente en pc/h/ln (veh.ligeros/h/carril)

V_{LO}: Velocidad de operación bajo las condiciones de tráfico establecidas en mi/h (km/h)

Se diferencian seis niveles de servicio, nombrados en el HCM 2010 como LOS (en sus siglas en inglés, *Level of Service*) identificados con las siglas A, B, C, D, E y F. Las ideas principales de cada uno de estos niveles son:

- Nivel de Servicio A: Describe la circulación en flujo libre. La velocidad media de los vehículos es próxima a la velocidad libre de circulación. Cuando un vehículo alcanza a otro más lento puede adelantarle prácticamente sin sufrir ninguna demora.
- Nivel de Servicio B: Sigue produciéndose flujo libre de vehículos y las velocidades de circulación se mantienen. La capacidad de maniobra dentro del flujo de tráfico es sólo un poco restringida.
- Nivel de servicio C: Describe la situación de circulación con velocidades cercanas a la velocidad en flujo libre de la autopista. La libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico es notablemente más restringida, y los cambios de carril requieren más atención y vigilancia por parte del conductor.

- Nivel de servicio D: Es el nivel en el que las velocidades comienzan a disminuir ligeramente con el aumento de los flujos y la densidad comienza a aumentar un poco más rápido. La libertad de maniobra dentro del flujo de tráfico es notablemente más limitada.
- Nivel de Servicio E: Describe el funcionamiento al límite de capacidad. Las operaciones en este nivel son volátiles, ya que prácticamente no hay espacios libres en el flujo de tráfico. Los vehículos están muy próximos entre sí y queda poco espacio para maniobrar y se circula a velocidades superiores a 80 km/h. Cualquier interrupción del flujo de tráfico, tales como los vehículos que entran por un acceso, puede establecer una onda de perturbación que se propaga aguas arriba.
- Nivel de Servicio F: Describe interrupciones en el flujo vehicular. Estas condiciones en general, existen cuando se está dentro de la formación de colas después de haber alcanzado la situación de congestión.

Los valores para definir el nivel de servicio de una vía quedan definidos por:

NIVEL DE SERVICIO EN SEGMENTOS BÁSICOS DE TRONCO DE AUTOVÍA / AUTOPISTA		
NIVEL DE SERVICIO	**DENSIDAD**	
	Veh/ mi/ ln	**Veh/ km / carril**
A	≤ 11	≤ 7
B	> 11- 18	> 7- 11
C	> 18- 26	> 11- 16
D	> 26- 35	> 16- 22
E	> 35- 45	> 22- 28
F Demanda excede la capacidad	> 45	> 28

Tabla 13. Niveles de servicio según densidad

La siguiente gráfica define los niveles de servicio en función de la velocidad y la intensidad de tráfico equivalente:

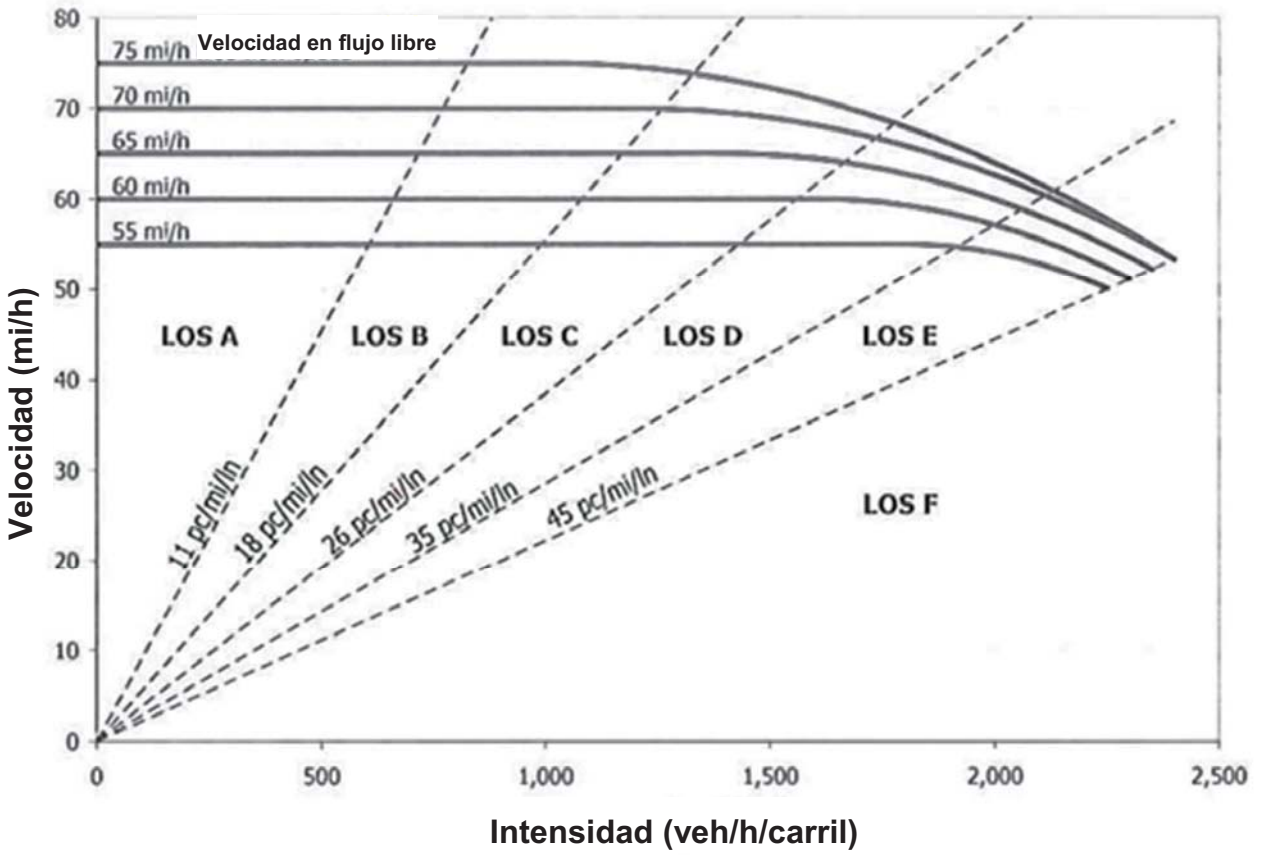


Figura 11. Gráfica velocidad-intensidad equivalente. Niveles de servicio

Utilizando la formulación del apartado anterior para calcular la intensidad de tráfico equivalente y considerando una velocidad libre de operación de 120 km/h, valor ideal en las vías de alta capacidad, podemos obtener la densidad de tráfico en vehículos equivalentes/kilómetro. Como en el caso del apartado anterior, se ha partido de una intensidad de tráfico horaria de 1.500 vehículos ligeros/hora.

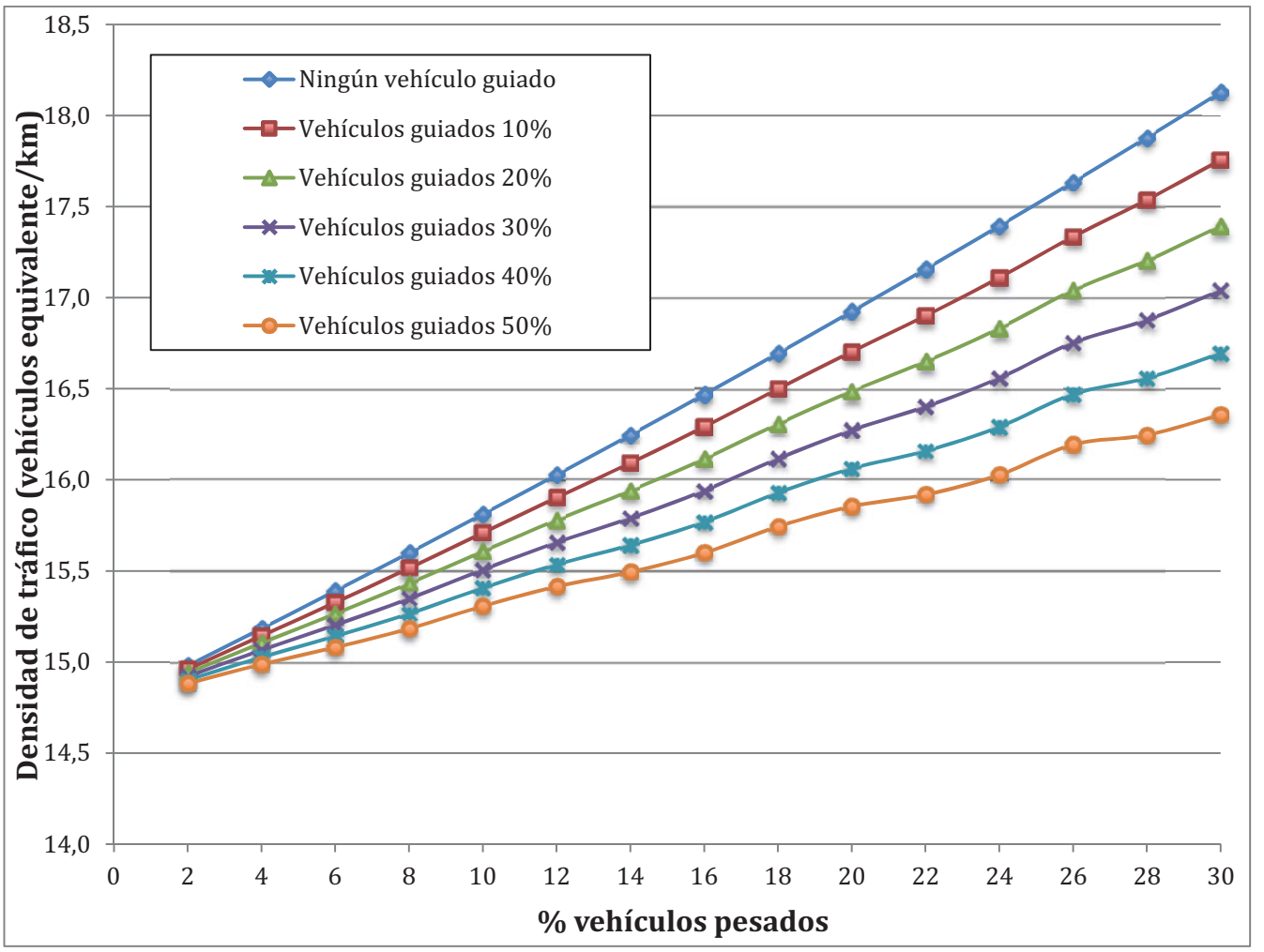


Figura 12. Variación de la densidad del tráfico en función del % de vehículos pesados y proporción de pesados guiados suponiendo pelotones de 2 vehículos pesados de 12 metros

Observamos que la incorporación de vehículos pesados guiados reduce la densidad de tráfico, debido a que los vehículos pesados guiados disponen de sistemas que les permiten ir más próximos. Los vehículos guiados suponen una ocupación menor de la calzada, dejando más espacio en un tramo de calzada para un mismo número de vehículos circulando.

En la gráfica anterior queda patente que esta mejora en la densidad de tráfico es mayor cuando nos encontramos en vías con altas intensidades de tráfico pesado.

% Vehículos pesados	Ningún vehículo guiado	NS	Vehículo guiado 10 %	NS	Vehículo guiado 20 %	NS	Vehículo guiado 30 %	NS	Vehículo guiado 40 %	NS	Vehículo guiado 50 %	NS
4%	15,2	C	15,1	C	15,1	C	15,1	C	15,0	C	15,0	C
8%	15,6	C	15,5	C	15,4	C	15,4	C	15,3	C	15,2	C
12%	16,0	C	15,9	C	15,8	C	15,7	C	15,5	C	15,4	C
16%	16,5	D	16,3	D	16,1	D	16,0	C	15,8	C	15,6	C
20%	16,9	D	16,7	D	16,5	D	16,3	D	16,1	D	15,9	C
24%	17,4	D	17,1	D	16,9	D	16,6	D	16,3	D	16,1	D
28%	17,9	D	17,6	D	17,2	D	16,9	D	16,6	D	16,3	D

Tabla 14. Densidad de tráfico en función del % de vehículos pesados y proporción de pesados guiados

En la tabla anterior se aprecia cómo la incorporación de vehículos guiados en el tráfico mejora en nivel de servicio para un mismo porcentaje de vehículos pesados. En el ejemplo analizado se observa cómo puede obtenerse nivel de servicio C en tramos de carretera que tendrían nivel de servicio D si no existiesen vehículos guiados.

Tal y como se apuntó al referirnos a la densidad de tráfico, este efecto de mejora en las condiciones de circulación es más notable en vías con altas intensidades de tráfico pesado.

3.2.2. ADELANTAMIENTOS

Uno de los aspectos más representativos en la operatividad de una carretera son los adelantamientos, ya que la mayor o menor facilidad para rebasar los vehículos que circulan a velocidad inferior refleja el nivel de servicio de la misma.

Un pelotón de camiones, al igual que los camiones individuales, circulan a menor velocidad que la velocidad media de operación de la autovía. Es por ello, que muchos conductores se ven obligados a realizar maniobras de adelantamiento. En este caso, el adelantamiento se produce a un conjunto de camiones circulando de manera coordinada, lo que influye directamente en el tiempo necesario para realizar la maniobra.

Conocer el tiempo necesario para adelantar a un vehículo permite al conductor decidir el momento más adecuado para realizar la maniobra, sin que ésta influya en la fluidez del tráfico. Esto resulta aún más importante en el caso en el que el conductor que realiza la maniobra desee coger una salida próxima. Actualmente, la Instrucción de Carreteras establece en 1.000 metros la distancia mínima a la que debe colocarse la señalización que indica la proximidad a una salida. Por tanto, será necesario comprobar si estas distancias mínimas podrían mantenerse o, por el contrario, sería necesario modificar la señalización de la vía.

Para conocer el tiempo que tardaría en adelantar un vehículo ligero o un vehículo pesado al pelotón de camiones, se han realizado los siguientes cálculos y supuestos:

A. Adelantamiento de un vehículo ligero

En este supuesto, el vehículo que tiene intención de adelantar al pelotón de camiones es un vehículo ligero. Se van a mostrar los tiempos y las longitudes recorridas durante el adelantamiento para varios escenarios en los que varía la longitud de los camiones enlazados y las velocidades de circulación de ambos.

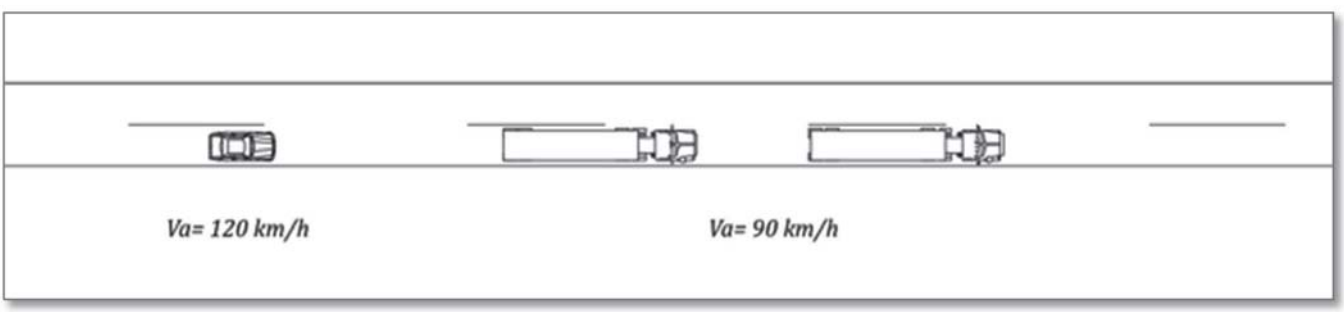


Figura 13. Esquema adelantamiento de un vehículo ligero al pelotón de camiones

El tiempo de adelantamiento se obtiene de las siguientes operaciones:

$$t = \frac{D}{\Delta V / 3{,}6}$$

donde,

t: tiempo empleado durante la maniobra (segundos)

D: Distancia total mínima (metros). $D = d_1 + d_2 + d_3$

ΔV: Diferencia de velocidad entre el vehículo que adelanta y el adelantado. (km/h)

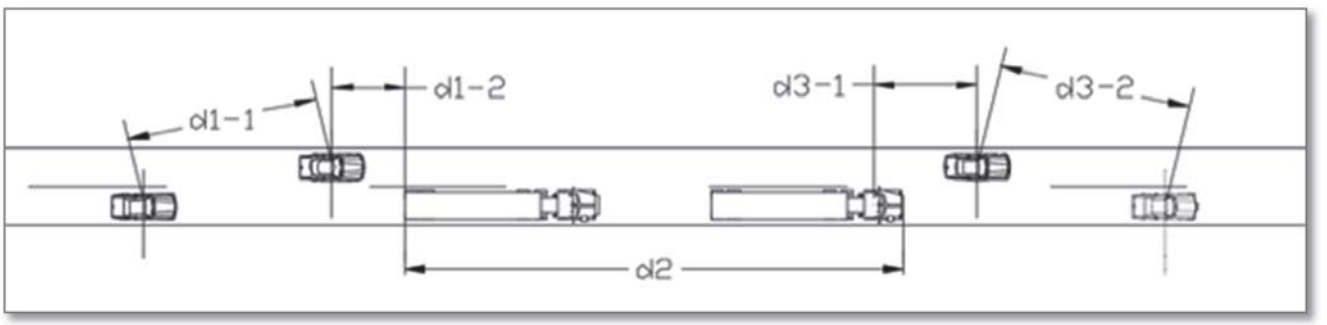


Figura 14. Distancias requeridas en la maniobra de adelantamiento

Siendo:

d₁ → Distancia recorrida durante la maniobra. Esta distancia incluye el tiempo de percepción y de reacción (se supone de 2 segundos), depende de la distancia de seguridad marcada respecto al vehículo que circula más lento. *En la figura 14 corresponde a la suma de d1-1 y d1-2.*

d₂ → Longitud vehículo lento. En este caso hace referencia a la longitud total del pelotón, que como se ha mencionado anteriormente corresponde a la longitud de cada camión enlazado más la distancia marcada entre ambos.

d₃ → Distancia de seguridad marcada al vehículo adelantado una vez finalizada la maniobra de adelantamiento. *En la figura 14 corresponde a la suma de d3-1 y d3-2.*

Para los cálculos, se supone una longitud media del vehículo ligero de 5 metros, un ancho de carril de 3,6 metros y que cuando el conductor decide realizar la maniobra se encuentra a 10 metros del pelotón de camiones. En la siguiente tabla se muestra el tiempo que tardaría y la longitud que recorrería un vehículo ligero al adelantar a un pelotón de camiones que circula desde 70 km/h hasta los 90 km/h:

		Velocidad pelotón ADELANTADO (Km/h)					
		70	80	90	70	80	90
Velocidad vehículo que ADELANTA(Km/h)	CARACTERÍSTICAS VEHÍCULOS DEL PELOTÓN	DURACIÓN ADELANTAMIENTO (segundos)			LONGITUD RECORRIDA ADELANTAMIENTO (metros)		
120	1 x 12	2,8	3,5	4,7	93,1	116,4	155,2
	2 x 12	4,4	5,6	7,6	145,3	185,7	253,2
	3 x 12	5,9	7,7	10,5	197,4	255,1	351,2
	1 x 16,5	3,1	3,9	5,2	103,9	129,9	173,2
	2 x 16,5	5,1	6,6	9,0	171,5	219,4	299,2
	3 x 16,5	7,2	9,3	12,8	239,1	308,9	425,2
	1 x 18,75	3,3	4,1	5,5	109,3	136,7	182,2
	2 x 18,75	5,6	7,2	9,8	187,0	239,6	327,2
	3 x 18,75	7,9	10,3	14,2	264,7	342,5	472,2
	1 x 25,25	3,7	4,7	6,2	124,9	156,2	208,2
	2 x 25,25	6,7	8,6	11,7	222,9	285,2	389,2
	3 x 25,25	9,6	12,4	17,1	320,8	414,3	570,2

Tabla 15. Tiempo (segundos) y longitud recorrida (metros) al adelantar a un vehículo ligero

Se ha tomado una velocidad del vehículo ligero de 120 km/h, por lo que cualquier velocidad inferior a ésta influirá negativamente a la maniobra.

Se observa que los tiempos y distancias de adelantamiento aumentan notablemente con la velocidad del pelotón de vehículos. Podría ser necesario limitar la velocidad de los pelotones de camiones con mayor número de vehículos acoplados y vehículos más largos, con el objetivo de facilitar su adelantamiento. Aunque esta reducción de la velocidad tendría efectos negativos sobre la condiciones de circulación del resto de usuarios.

B. Adelantamiento de un vehículo pesado

En el caso en el que el vehículo con intención de adelantar sea otro vehículo pesado, la maniobra se dificultaría. Para obtener el tiempo de adelantamiento y la longitud

recorrida se suponen velocidades del pelotón de camiones de 70 y 80 km/h, mientras que el vehículo pesado con intención de adelantar circularía a 90 km/h:

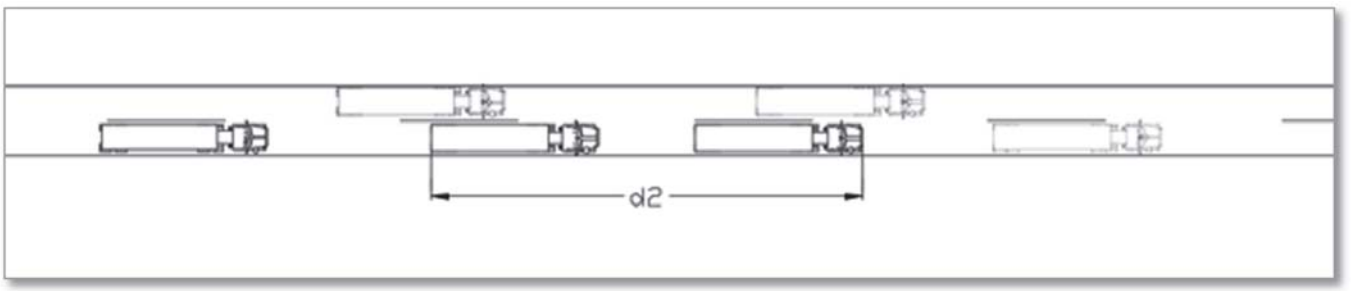


Figura 15. Maniobra de adelantamiento de un camión al pelotón de camiones

		Velocidad pelotón ADELANTADO (Km/h)			
		70	80	70	80
Velocidad vehículo que ADELANTA (Km/h)	CARACTERÍSTICAS VEHÍCULOS DEL PELOTÓN	DURACIÓN ADELANTAMIENTO (Segundos)		LONGITUD RECORRIDA ADELANTAMIENTO (metros)	
90	1 x 12	8,2	16,5	206,1	412,2
	2 x 12	12,2	24,8	303,9	620,2
	3 x 12	16,1	33,1	401,6	828,2
	1 x 16,5	9,1	18,1	226,4	452,7
	2 x 16,5	14,1	28,8	353,1	721,2
	3 x 16,5	19,2	39,6	479,9	989,7
	1 x 18,75	9,5	18,9	236,5	473,0
	2 x 18,75	15,3	31,3	382,1	781,7
	3 x 18,75	21,1	43,6	527,7	1090,5
	1 x 25,25	10,6	21,3	265,7	531,5
	2 x 25,25	18,0	36,7	449,4	918,7
	3 x 25,25	25,3	52,2	633,0	1306,0

Tabla 16. Tiempo (segundos) y longitud recorrida (metros) al adelantar a un vehículo pesado

En este caso podemos observar la problemática que supone el adelantamiento de un pelotón de camiones para un vehículo pesado, al aumentar considerablemente los

tiempos y distancias de adelantamiento con el número y longitud de los vehículos guiados, con respecto a que esta maniobra la realice un vehículo ligero.

3.2.3. CONCLUSIONES

Tras comprobar de manera teórica la influencia del paso de vehículos guiados en el tráfico, podemos concluir que, los **vehículos guiados mejorarían la capacidad de la vía,** permitiendo un mayor número de vehículos circulando por las mismas. Los vehículos guiados pueden conseguir reducir la densidad de tráfico en la calzada, **mejorando el nivel de servicio e influyendo menos en la velocidad media de operación de la vía**. Pero, como se ha mencionado anteriormente, el nivel de servicio también viene definido por la maniobrabilidad que ofrece la vía. Por tanto, la operatividad de la carretera descendería al tener que realizar maniobras de adelantamiento de mayor duración que las actuales, especialmente cuando la maniobra es realizada por otro vehículo pesado.

A pesar de que el adelantamiento de vehículos pesados guiados puede reducir el nivel de servicio de la carretera, no reducirá la capacidad de la vía, ya que a partir de ciertos niveles de congestión se reducen los adelantamientos, ocurriendo que la circulación se realiza por los distintos carriles y se reducen las maniobras de cambio de carril. Podemos concluir que en vías muy congestionadas, con niveles de servicio bajos y velocidades de operación inferiores a las velocidades libres de operación, el efecto de los vehículos pesados guiados será positivo, ya que la parte negativa del adelantamiento no será preponderante en estas condiciones de tráfico.

Los efectos negativos de los vehículos pesados guiados se presentarán en niveles de servicio intermedios (C ó D) donde la capacidad de maniobra se encuentra restringida, por lo que la presencia de un pelotón de camiones podría dificultar las condiciones de la circulación. Puede resultar necesario establecer un mayor número de carriles adicionales que permitan el adelantamiento de los pelotones de camiones.

Los vehículos pesados guiados pueden resultar una solución eficiente en carreteras de gran capacidad que alberguen itinerarios de tráfico de mercancías y que soporten, por tanto, un alto porcentaje de vehículos pesados. Sería recomendable realizar estudios exhaustivos de las carreteras por las que circularía el pelotón de camiones, para garantizar que su paso no complique las condiciones de circulación y produzcan demoras en los tiempos de viaje.

3.3. IMPACTO SOBRE LA INFRAESTRUCTURA

Otro aspecto que debe ser analizado con detenimiento será la influencia en la infraestructura, ya que al tratarse de una conducción coordinada estos vehículos se comportarán como un único vehículo, de mayores dimensiones que los vehículos patrón utilizados en el diseño de carreteras. En este caso se estudia la influencia en carriles adicionales en **rampas, carriles de cambio de velocidad, carriles de trenzado, vías colectoras-distribuidoras, confluencias y bifurcaciones** y la influencia que tendrían estos cambios en la **señalización**.

Su estudio se realiza teniendo en cuenta lo establecido en la Norma de *Trazado 3.1*. de la Instrucción de Carreteras y la *8.1.* de *Señalización Vertical*, publicada por el Ministerio de Fomento.

3.3.1. RAMPAS

Los tramos de carretera con pendientes elevadas pueden producir una reducción en la velocidad de los vehículos pesados, y como consecuencia, retenciones en el tráfico. La norma de trazado exige disponer un carril adicional en aquellas zonas cuyo nivel de servicio en la rampa sea C o D. Estos carriles pueden ser de dos tipos:

- **Carriles para circulación rápida**: se disponen por la izquierda de la calzada (preferible).

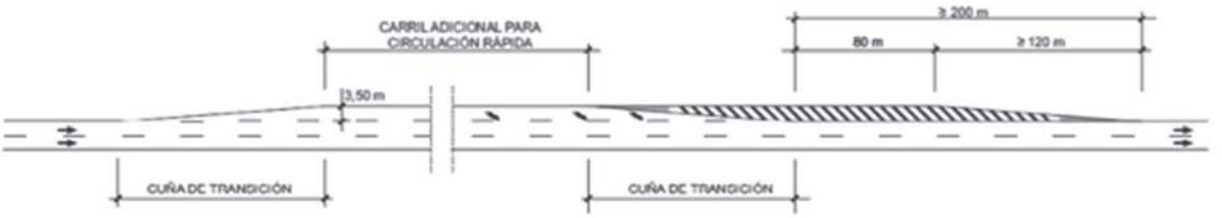


Figura 16. Carril adicional de circulación rápida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1. Trazado

- **Carriles para circulación lenta**: se disponen por la derecha de la calzada (excepcionalmente, cuando se justifique suficientemente).

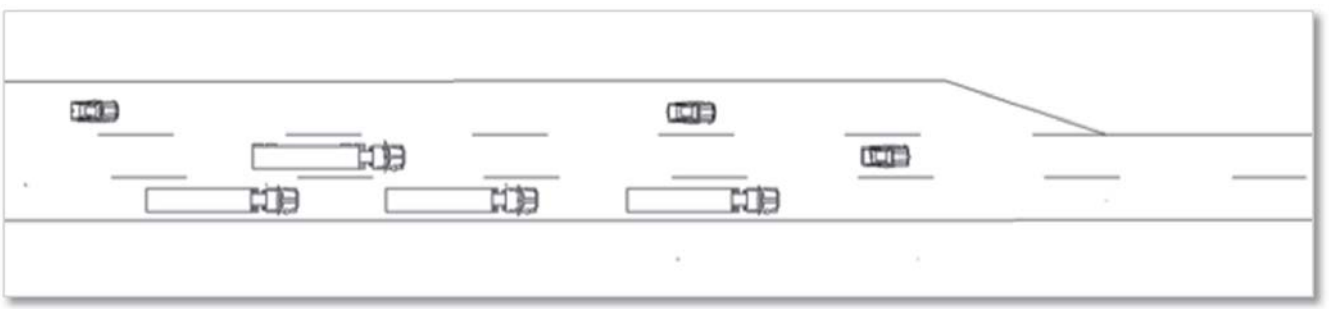
Figura 17. Carril adicional de circulación lenta. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1. Trazado

Los carriles en rampa o pendiente deben tener el mismo ancho que los carriles básicos y, en curvas, dicho ancho más el sobreancho correspondiente. Para definir la longitud necesaria del carril adicional se tiene en cuenta:

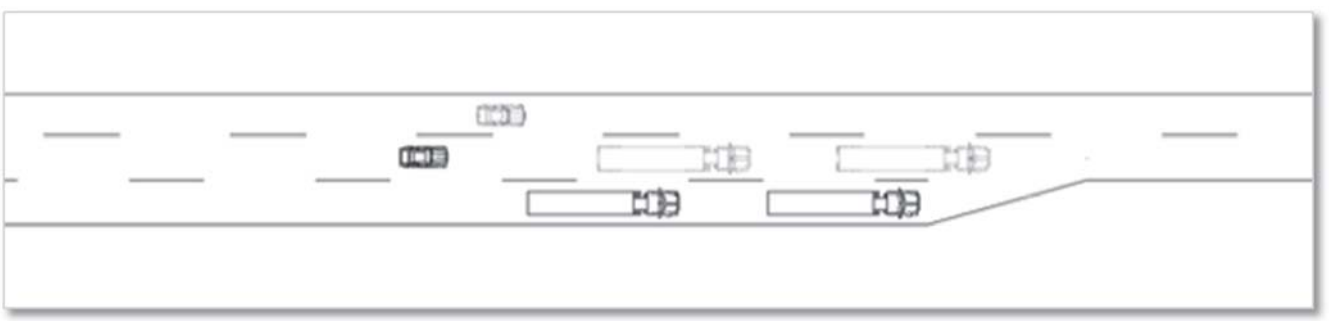
- El inicio del carril adicional se situará donde los vehículos pesados reduzcan su velocidad en diez kilómetros por hora (10 km/h) respecto de la velocidad de proyecto , sin considerar velocidades iniciales mayores que cien kilómetros por hora 100 km/h).
- El final del carril adicional se situará donde, una vez superado el vértice del acuerdo, el vehículo pesado recupere la velocidad correspondiente que hizo necesario el establecimiento del carril adicional.

Antes del inicio y después del final de los carriles adicionales en rampa se dispondrán cuñas de transición cuyas longitudes dependerán de la velocidad de proyecto de la carretera. En el caso de carriles de circulación rápida, es necesario disponer un tramo de cebreado con una longitud mayor o igual que doscientos metros (≥ 200 m).

En vías de alta capacidad se recomienda que los carriles adicionales se dispongan por la izquierda. Con la presencia de vehículos guiados este aspecto adquiere una mayor importancia ya que los pelotones de vehículos tienen una menor maniobrabilidad y es recomendable que las maniobras las realicen vehículos más ágiles. Se busca evitar el cambio de carril del pelotón de camiones, ya que esta maniobra puede suponer un riesgo para el resto de usuarios. Por tanto, **se deberá disponer de un carril adicional de circulación rápida en todas aquellas secciones cuyo nivel de servicio sea C o D.**



(a) Carril circulación rápida



(b) Carril circulación lenta

Figura 18. Carriles adicionales en rampa con vehículos pesados en pelotón

Las figuras anteriores muestran un tramo de una calzada de dos carriles con los dos tipos de carril adicional: (a) con carril para circulación rápida y (b) con carril para circulación lenta. En el primero de los casos, la maniobra de incorporación a la vía no

involucra al pelotón de camiones, mientras que en el segundo caso, el pelotón de camiones tendría que incorporarse a la vía una vez finalice el carril adicional. Esta maniobra obliga al resto de usuarios a modificar su velocidad o en su caso, cambiarse al carril izquierdo.

Las maniobras realizadas por los vehículos pesados guiados pueden suponer un riesgo en la carretera, al comportarse como un único vehículo pesado de mayor longitud. Por ello, se recomienda que, en la medida de lo posible, el pelotón conserve el mismo carril de circulación durante el mayor tiempo posible.

3.3.2. CARRILES DE CAMBIO DE VELOCIDAD

El paso de vehículos guiados también influirá en las dimensiones de los carriles de cambio de velocidad, ya que, al realizar las maniobras de manera coordinada, la longitud del pelotón se deberá tener en cuenta.

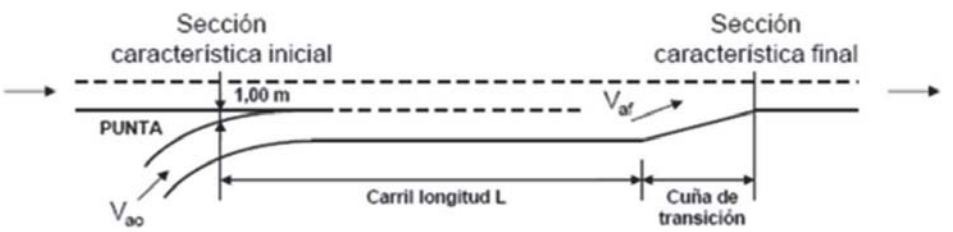
Los carriles de cambio de velocidad son un elemento de transición de las condiciones de circulación, facilitando los movimientos de entrada y salida de los vehículos. Su función es permitir incrementar o reducir la velocidad para adecuarla a la correspondiente en la vía a la que se incorporan.

Existen dos tipos de carriles de cambio de velocidad:

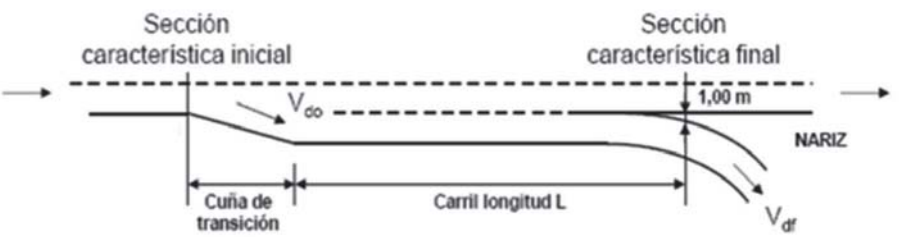
- ***Paralelo*****,** en el que el carril de cambio de velocidad esta adosado al borde de la calzada principal, y consta de: el carril de cambio de velocidad y una cuña triangular de transición en su extremo; sus dimensiones varían en función de la velocidad de circulación.
- ***Directo,*** en el que el carril de cambio de velocidad es tangente al borde de la calzada o forma un ángulo cuya cotangente se encuentra entre 20 y 35, con el fin de que sea apreciable para los conductores. Solo se permite para los carriles de deceleración con velocidad de proyecto inferior a 100 km/h.

Para definir las longitudes de este tipo de vías, la Instrucción define tres secciones características:

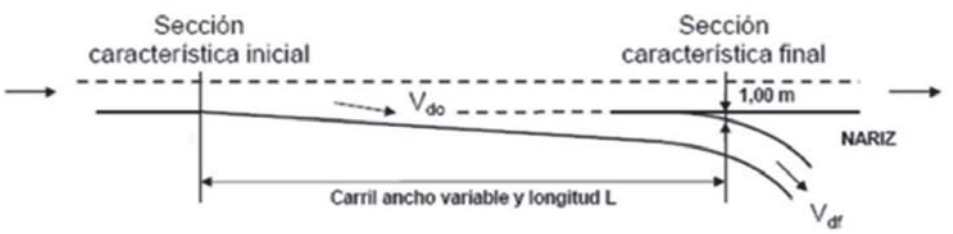
- Punta o nariz: sección de 1.00 m que separa los bordes del carril de cambio de velocidad y de la calzada principal, medida perpendicularmente al eje de ésta. Se denomina punta en el caso del carril de aceleración y nariz en el carril de deceleración.
- Cuña de transición, situados en el extremo inicial de los carriles de deceleración y en el extremo final de los carriles de aceleración. La sección, medida perpendicularmente al eje de la calzada, es de 1.50 m. Su longitud depende de la velocidad de proyecto de la calzada principal.
- Carril de aceleración o deceleración.



(a) Carril de aceleración de tipo paralelo



(b) Carril de deceleración de tipo paralelo



(c) Carril de deceleración de tipo directo

Figura 19. Carriles de cambio de velocidad

La longitud de los carriles de cambio de velocidad de tipo paralelo se mide desde la sección característica de un metro hasta la cuña de transición, sin considerar esta última. Los de tipo directo se miden desde el inicio de cambio de ancho de la calzada principal, tal y como muestran las imágenes anteriores. La Instrucción de Carreteras 3.1. I.C. define la longitud en función de la velocidad de entrada y de salida necesarias, teniendo en cuenta una aceleración y deceleración uniforme, sin considerar las resistencias aerodinámicas ni de rozamiento según el firme. La Instrucción no incluye en sus cálculos la longitud de los vehículos, y, en este caso, es un aspecto muy importante.

A. Vías de aceleración

Se va a analizar el comportamiento de los vehículos pesados guiados incorporándose a una vía de alta capacidad.

Al igual que en los carriles adicionales de circulación lenta, el pelotón de camiones realizaría la maniobra de manera coordinada, es decir, el vehículo guía no cambiará su velocidad hasta que no se encuentre todo el pelotón de camiones en el carril de aceleración o deceleración y, el cambio de carril se realizará teniendo en cuenta que el último vehículo enlazado saldrá del carril de aceleración mucho antes del final del tramo.

La longitud del carril de aceleración se calcula según la *Instrucción de Carreteras 3.1IC "Trazado"*:

$$L = 1120\frac{1-2*i}{(1+2{,}65*i)^3}*\ln\frac{175*(1-2*i)-V_0*(1+2{,}65*i)}{175*(1-2*i)-V_f*(1+2{,}65*i)} - 6{,}4*\frac{V_f-V_0}{(1+2{,}65*i)^2} - \frac{V_f^2-V_0^2}{96*(1+2{,}65*i)} \geq 200\ m$$

donde,

L: es la longitud del carril de aceleración en metros.

V_0: es la velocidad inicial en la punta, expresada en km/h.

V_f: es la velocidad final en la cuña, expresada en km/h.

i: es la inclinación longitudinal de la rasante, medido en tanto por uno.

En este caso nos interesa conocer el tiempo que tardaría un pelotón de camiones en cambiar su velocidad inicial hasta una velocidad final de 90 km/h, que corresponde a la velocidad máxima. De esta manera tendríamos unas longitudes de carril de aceleración de:

Velocidad final de 90 km/h					
Velocidad inicial	Rasante				
	-4%	-2%	0%	2%	4%
0	124	135	148	165	186
30	115	126	139	155	176
40	108	118	130	146	166
50	97	106	118	132	151
60	81	89	100	113	129

Tabla 17. Longitud carril de aceleración

La tabla refleja varios escenarios en función de la pendiente de la carretera y la velocidad inicial de la que parte el vehículo que requiere modificar su velocidad.

A esta distancia se le debe añadir la longitud del pelotón de camiones, ya que al tener que realizar las maniobras de manera coordinada, el vehículo guía no aceleraría hasta que no se encontrara todo el pelotón en el carril de cambio de velocidad. Tal y como indica la imagen siguiente:

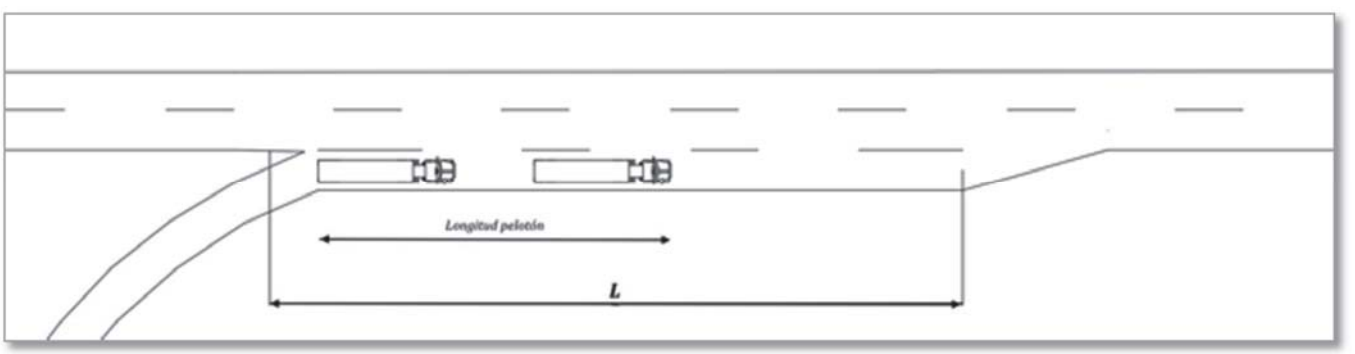


Figura 20. Pelotón de camiones en carril de aceleración

Para una velocidad inicial de 0 km/h y una final de 90 km/h, la longitud mínima total del carril de cambio de velocidad para que un pelotón de camiones pudiera realizar la transición de velocidad sería:

Tipo vehículo	Rasante				
	-4%	-2%	0%	2%	4%
Vehículo ligero	124	135	148	165	186
2 x 12	161	172	185	202	223
3 x 12	185	196	209	226	247
2 x 16,5	172	183	196	213	234
3 x 16,5	204	215	228	245	266
2 x 18,75	179	190	203	220	241
3 x 18,75	215	226	239	256	277
2 x 25,25	195	206	219	236	257
3 x 25,25	240	251	264	281	302

Tabla 18. Longitud mínima del carril de aceleración para permitir el paso de un pelotón de camiones

La Instrucción de Carreteras limita el carril de aceleración a una longitud mínima o igual a 200 metros, por tanto, los casos indicados de color verde entrarían dentro de este criterio. Para el resto de casos debería comprobarse la longitud de los carriles de cambio de velocidad de las carreteras por las que fuera a circular el pelotón de camiones y comprobar que son superiores a las indicadas en la tabla anterior. En caso de que no se cumpla, se deberá ampliar hasta la longitud establecida.

Aunque las longitudes obtenidas en algunos casos no superan las prescritas por la normativa técnica, hay que tener en cuenta que el análisis realizado parte de la situación ideal en la que las condiciones de tráfico del tronco permiten la incorporación del pelotón de camiones. En caso contrario, el pelotón deberá pararse al inicio del carril para ceder el paso, situación que no es recomendable ya que podría generar problemas de seguridad o afectar a la circulación de otros elementos del enlace.

La incorporación de los pelotones de camiones a vías de alta capacidad con altas intensidades de tráfico será uno de los aspectos más conflictivos. En los inicios de este tipo de transporte es de prever que estas composiciones partirán de centros logísticos que

tendrán que adaptar su conexión a la red de alta capacidad para que la incorporación del pelotón se realice en condiciones de seguridad, afectando lo menos posible a otros usuarios. La tecnología puede permitir que estos vehículos se acoplen dentro de la propia vía, de tal forma que en las incorporaciones se comporten como el resto de vehículos.

B. Vías de deceleración

La longitud del carril de deceleración se calcula según la I.C. 3.1:

$$L = \frac{V_0^2 - V_f^2}{254 * i + 50} \geq 100\ m$$

donde,

L: es la longitud del carril de deceleración en metros.

V_0: es la velocidad inicial en la cuña, expresada en km/h.

V_f: es la velocidad final de la nariz, expresada en km/h.

i: es la inclinación longitudinal de la rasante, medida en tanto por uno.

La longitud del carril para una velocidad inicial de 90 km/h quedaría:

Velocidad inicial de 90 km/h					
Velocidad final	**Rasante**				
	-4%	**-2%**	**0%**	**2%**	**4%**
30	181	160	144	131	120
40	163	145	130	118	108
50	141	125	112	102	93
60	113	100	90	82	75

Tabla 19. Longitud carril de deceleración

Al igual que para el caso anterior, la longitud total del carril de deceleración deberá ser igual a la suma del pelotón de camiones más el mínimo mostrado en la tabla anterior.

Por ejemplo, para obtener una velocidad final de 40 km/h, la longitud quedaría:

Tipo vehículo	Rasante				
	-4%	-2%	0%	2%	4%
Vehículo ligero	163	145	130	118	108
2 x 12	200	182	167	155	145
3 x 12	224	206	191	179	169
2 x 16,5	211	193	178	166	156
3 x 16,5	243	225	210	198	188
2 x 18,75	218	200	185	173	163
3 x 18,75	254	236	221	209	199
2 x 25,25	234	216	201	189	179
3 x 25,25	279	261	246	234	224

Tabla 20. Longitud mínima carril de deceleración para permitir el paso de un pelotón de camiones

Por tanto, se deberá comprobar que la longitud de los carriles de deceleración de la carretera por la que vaya a circular el pelotón de camiones sea superior a la indicada en la tabla anterior. En caso de que no se cumpla, se deberá ampliar hasta la longitud establecida.

C. Carriles de trenzado

En aquellas zonas donde existen un carril de aceleración seguido de otro de deceleración con menos de 1.200 metros de separación entre ambos, se debe realizar un carril adicional en el que se produzca el cruce entre los dos flujos de tráfico.

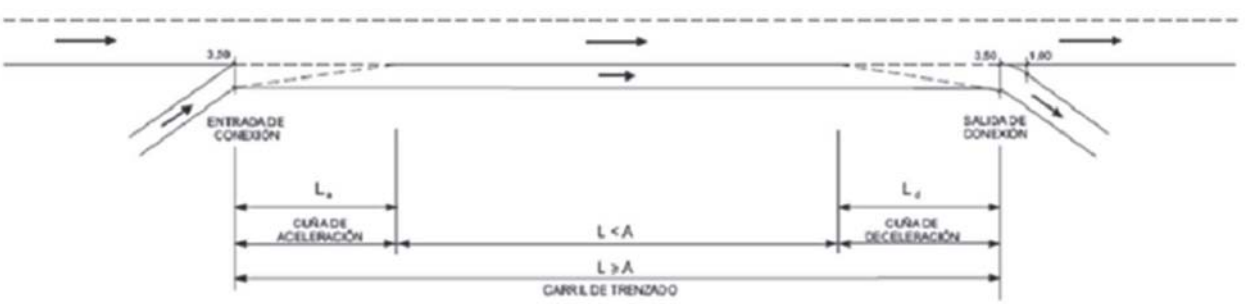


Figura 21. Carril de trenzado. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1.I.C

Como la circulación de camiones guiados se realiza sobre carreteras ya construidas, es posible que la ampliación de los carriles de aceleración y deceleración origine la necesidad de unirlos por medio de carriles trenzados. La longitud mínima del carril deberá ser de 1.000 metros. Cuando la longitud del carril resulte inferior, se deberá proyectar una vía colectora-distribuidora.

En estos carriles se debe garantizar que el nivel de servicio del tramo sea compatible con el de la propia carretera donde queda integrado, con adecuada visibilidad durante todo el tramo.

Debido a la gran longitud de los pelotones de vehículos pesados las maniobras de trenzado se complicarán, debido al efecto pantalla que supondrán cuando circulen por el tronco, ya que lo normal es que no cambien de carril por las implicaciones que ello tendría para el tronco. Esta circunstancia es más compleja si el pelotón es el que quiere entrar o salir de la vía, ya que con situaciones de alta intensidades de tráfico no dispondría de suficiente hueco para realizar la maniobra.

A pesar de los 1.000 m. que prescribe la normativa, hay que tener en cuenta que en buena parte de la red de carreteras existente, las longitudes de trenzado son muy escasas, en particular en algunas tipologías de enlace donde trenzan los propios ramales.

En algunos casos será necesario remodelar algún enlace y, desde luego, en los nuevos diseños de enlace es necesario considerar este tipo de circulaciones que en el futuro discurrirán por la red de carreteras. Habrá que pensar en tipologías de enlace que simplifiquen las maniobras de este tipo de vehículos, recurriendo, por ejemplo, a vías colectoras distribuidoras, en lugar de carriles de trenzado.

D. Vía colectora-distribuidora

Por otro lado, en el caso en el que un carril de trenzado suponga un riesgo en la seguridad vial como consecuencia de los cruces de trayectoria de los vehículos de entrada y de salida o la distancia entre ambos sea inferior a 1.000 metros, se deberá realizar una vía colectora-distribuidora. Esta vía consiste en una calzada con sentido único de

circulación, sensiblemente paralela a la carretera principal y separada físicamente de ella, cuyo objeto es independizar de dicha carretera las zonas de conflicto que se originan en tramos con salidas y entradas consecutivas.

Existen muchas tipologías de vías colectoras-distribuidoras, un ejemplo sería:

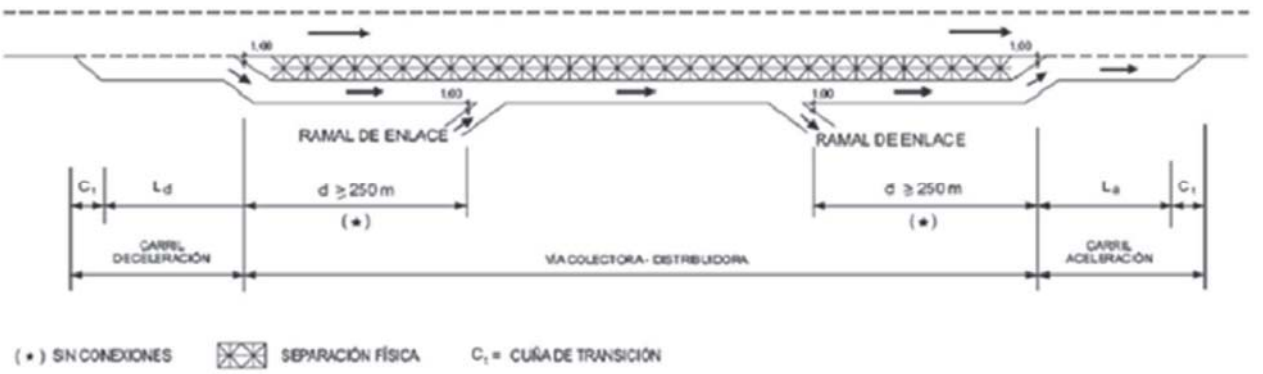


Figura 22. Vía colectora-distribuidora. Fuente: Instrucción de carreteras 3.1 I.C

La existencia de este tipo de vías en los enlaces facilita los movimientos de los vehículos pesados guiados, puesto que sus movimientos están canalizados y no es necesario maniobrar ni coordinarse con otros vehículos. Además, el tráfico más afectado sería el de la vía colectora, y no el del tronco.

3.3.3. CONFLUENCIAS Y BIFURCACIONES

Las confluencias y bifurcaciones se realizan donde se producen elevados flujos de tráfico similares. Las velocidades específicas de los elementos que concurren en una confluencia o bifurcación deberán ser similares, pudiendo disminuirse o incrementarse, si fuese necesario, de forma gradual el número de carriles en la calzada común.

Por tanto, los carriles de confluencia hacen mención a aquellos carriles que después de una confluencia se suprimen progresivamente hasta alcanzar el número de carriles básicos en la calzada y los carriles de bifurcación son aquellos carriles que se añaden progresivamente a los carriles básicos de la calzada antes de efectuar una bifurcación.

En el caso de **confluencias** con disminución del número de carriles mediante carriles de ancho constante, la transición se realiza de la forma siguiente:

- Después de una confluencia se mantendrán cuatro carriles en una longitud de quinientos metros (500 m) y posteriormente se suprimirá un carril con una cuña de longitud doscientos cincuenta metros (250 m).
- Si fuese necesario suprimir un segundo carril se mantendrán los tres carriles durante una longitud de quinientos metros (500 m) para, mediante otra cuña de longitud doscientos cincuenta metros (250 m), pasar de tres a dos carriles.

Hay tres tipos de confluencias:

a. Tramo de confluencia con disminución del número de carriles por la izquierda
b. Tramo de confluencia con disminución del número de carriles por la derecha
c. Tramo de confluencia con disminución del número de carriles utilizando carriles de ancho variable.

(a) Tramo de confluencia con disminución del número de carriles por la izquierda

(b) Tramo de confluencia con disminución del número de carriles por la derecha

(c) Tramo de confluencia con disminución del número de carriles utilizando carriles de ancho variable

Figura 23. Tramos de confluencia

Estos tramos pueden ser realmente conflictivos para la circulación de vehículos guiados. En el primer caso (a), cuando el pelotón circule por la vía izquierda deberá realizar dos cambios de carril para permanecer al margen derecho de la vía. Lo mismo ocurre en el segundo caso (b) si el pelotón circulase por el carril derecho, aunque en este caso el movimiento es más favorable al ser desplazamientos hacia la izquierda en el exterior derecho de la calzada, que suelen ser más habituales. El último caso (c), de perdida de carril utilizando carriles de ancho variable, a pesar de necesitar un solo cambio de carril, supone la concentración en un mismo carril de un pelotón de vehículos con una longitud no convencional con otro tipo de vehículos. Esta tipología no es la más recomendable, y sus inconvenientes se agudizan con la presencia de vehículos guiados.

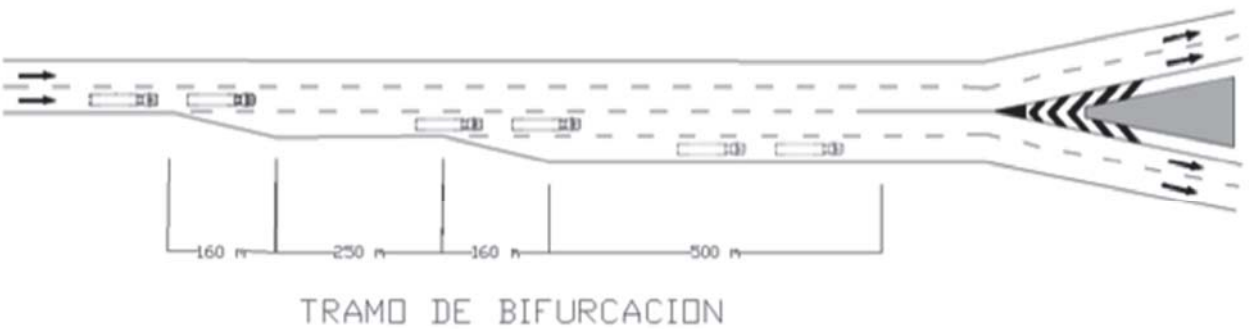
Estas maniobras requieren de tramos de mayor longitud, de manera que el tráfico disponga de suficiente tiempo para adaptarse y permitir los cambios. Estas secciones deberán ser estudiadas con mayor detalle dado el riesgo que suponen.

La normativa técnica indica que las **bifurcaciones** con incremento del número de carriles utilizando carriles de ancho constante se efectuarán de la siguiente manera:

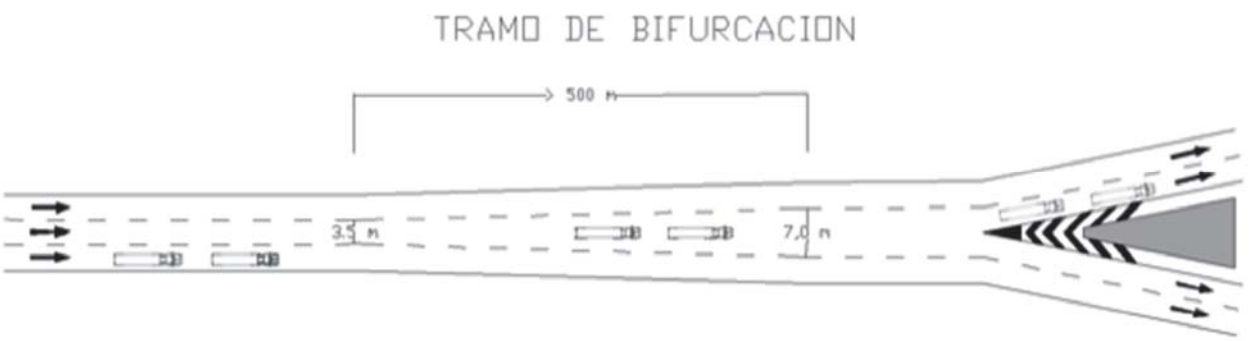
- Para pasar de tres a cuatro carriles, se añadirá un carril por la derecha con una cuña de longitud ciento sesenta metros (160 m), manteniendo los cuatro carriles en una longitud de quinientos metros (500 m) y posteriormente proceder a la bifurcación.

- Para pasar de dos a cuatro carriles, se añadirá un carril por la derecha con una cuña de longitud ciento sesenta metros (160 m), manteniendo los tres carriles en una longitud de doscientos cincuenta metros (250 m), agregando posteriormente un segundo carril por la derecha con otra cuña de longitud ciento sesenta metros (160 m), manteniendo los cuatro carriles en una longitud de quinientos (500 m) y posteriormente proceder a la bifurcación.

Existen las siguientes tipologías de tramos de bifurcación:



(a) Tramo de bifurcación con incremento del número de carriles utilizando carriles de ancho constante



(b) Tramo de bifurcación con incremento del número de carriles utilizando carriles de ancho variable

Figura 24. Tramos de bifurcación

Las maniobras a realizar en el caso a) son desplazamientos del pelotón de vehículos hacia la derecha donde se añaden nuevos carriles, no siendo una maniobra especialmente delicada.

En las bifurcaciones el problema radica en los desplazamientos hacia el lado izquierdo, como en el caso b). Además, se añade la dificultad de existir carriles de ancho variable donde pueden coexistir los vehículos guiados con otros usuarios. Esta tipología no es la más recomendable, y sus inconvenientes se agudizan con la presencia de vehículos guiados.

En general las bifurcaciones presentan menos problemas que las confluencias, pero también se requiere de un estudio más exhaustivo sobre la longitud necesaria y las recomendaciones de conducción en estas zonas.

3.3.4. SEÑALIZACIÓN

Otro aspecto que se verá influenciado por la circulación de vehículos pesados en pelotón es la señalización, ya que, los tiempos requeridos para maniobrar pueden verse incrementados. La señalización supone un elemento importante para garantizar la seguridad, la eficiencia y la comodidad de la circulación, proporcionando a los conductores la información necesaria para recordar las prescripciones del Reglamento General de Circulación. Es por ello que cualquier modificación significativa en la composición del tráfico debe ser tenida en cuenta para garantizar su funcionalidad. La longitud total del nuevo conjunto de vehículos provoca modificaciones en dos aspectos:

- **Influencia en la señalización lateral.**
- **Influencia en la distancia de las señales.**

A. Influencia en la señalización lateral

Los vehículos pesados dificultan la visualización de las señales y los carteles laterales como consecuencia de sus dimensiones. Esto se agrava en el caso de vehículos pesados que circulan en pelotón como consecuencia de la proximidad entre vehículos.

Estamos haciendo referencia a la señalización vertical que se encuentra situada en el margen derecho de la carretera, apoyada sobre uno o más postes metálicos.

Si se tiene un pelotón de camiones circulando en el carril derecho y otro vehículo ligero en el carril central, circulando ambos a sus velocidades máximas, la distancia que el vehículo ligero recorrerá adelantando al pelotón sin posibilidad de distinguir señalización lateral será de:

nº vehículos enlazados	Tipología camión	ΔV	Tiempo	Longitud recorrida
	m	km/h	s	m
2	12	30	7,6	253,2
3	12	30	10,5	351,2
2	16,5	30	9,0	299,2
3	16,5	30	12,8	425,2
2	18,75	30	9,8	327,2
3	18,75	30	14,2	472,2
2	25,25	30	11,7	389,2
3	25,25	30	17,1	570,2

Tabla 21. Tiempos y distancias medias de adelantamiento

A estos tiempos de adelantamiento, habría que añadirle el tiempo mínimo que emplea un conductor que circula a velocidad máxima en percibir la señal o cartel, interpretar su mensaje, decidir la maniobra que debe ejecutar y llevarla a cabo.

Las modificaciones o adaptaciones que se deberían realizar en el caso de poner en práctica la circulación de vehículos guiados podrían ser:

- Duplicar la señal o cartel al otro margen de la calzada.
- Duplicar la señal o cartel, con una distancia entre ellas de cómo mínimo la longitud máxima requerida por un vehículo al adelantar al pelotón de camiones.
- Cambio del cartel lateral a banderola o pórtico, situados sobre calzada.

B. Influencia en la distancia de las señales.

Como se ha mencionado anteriormente, los vehículos guiados influirían en las maniobras realizadas en enlaces, carriles adicionales y en las confluencias y bifurcaciones, por tanto, también influirá en la señalización de estas zonas:

1. Enlaces, diferenciando entre la señalización de proximidad a un carril de divergencia o de convergencia:

En los carriles de convergencia se preavisa a los usuarios la proximidad de un carril de aceleración mediante señalización de advertencia de proximidad, que se encuentra a 200 metros, y sólo en el margen derecho del tronco, para que los vehículos se trasladen de carril, si las condiciones del tráfico lo permiten, y faciliten el acceso de los vehículos que se incorporen. En el caso de los vehículos guiados esta maniobra no resulta aconsejable, por lo que esta señalización puede resultar suficiente. Esto puede provocar que el pelotón de camiones no tenga libertad de maniobra y como consecuencia, obstaculicen la incorporación de los vehículos procedentes del ramal, que será necesario resolver actuando sobre el propio ramal, para no afectar a la circulación del tronco.

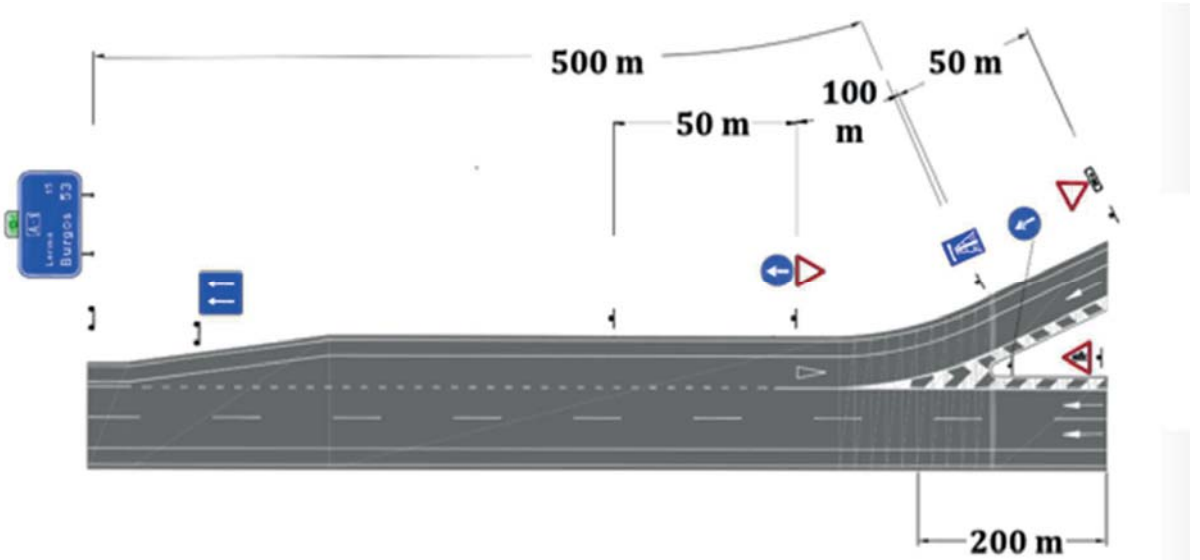
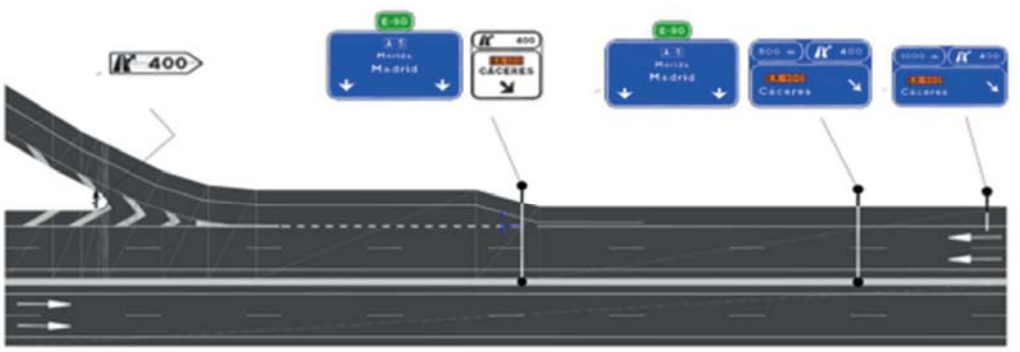


Figura 25. Señalización en carril de convergencia

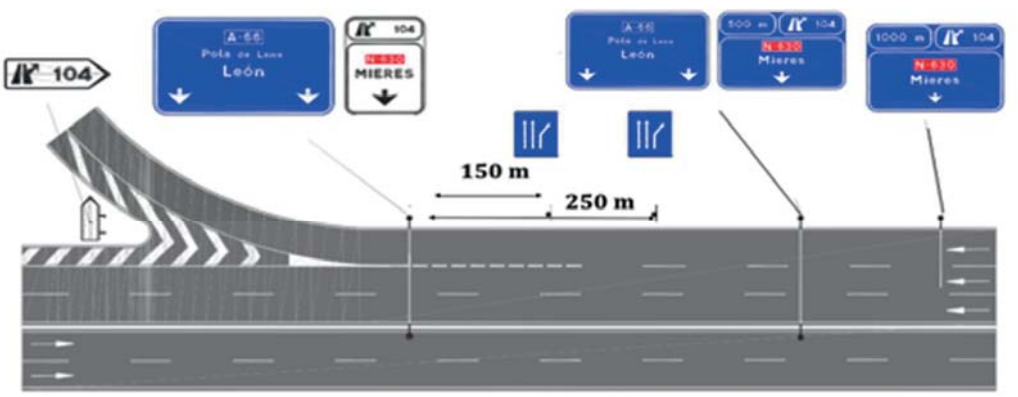
En los carriles de divergencia, es al resto de vehículos a quienes influye el paso de un pelotón de camiones al necesitar ser conscientes del tiempo que necesitan para realizar la maniobra que permita situarse en el carril derecho con suficiente tiempo como para incorporarse al carril de deceleración al inicio del mismo.

Se avisa de la proximidad de un **carril de divergencia** mediante tres carteles situados aproximadamente a 1.000 metros antes de la salida, 500 metros y un último cartel de salida inmediata. Sería conveniente complementar las señalización, en aquellos tramos con una alta intensidad de tráfico, con una advertencia a 1.500 metros.

Este enlace podrá ser con carril de deceleración o con pérdida de carril directo:



(a) Salida con carril de deceleración



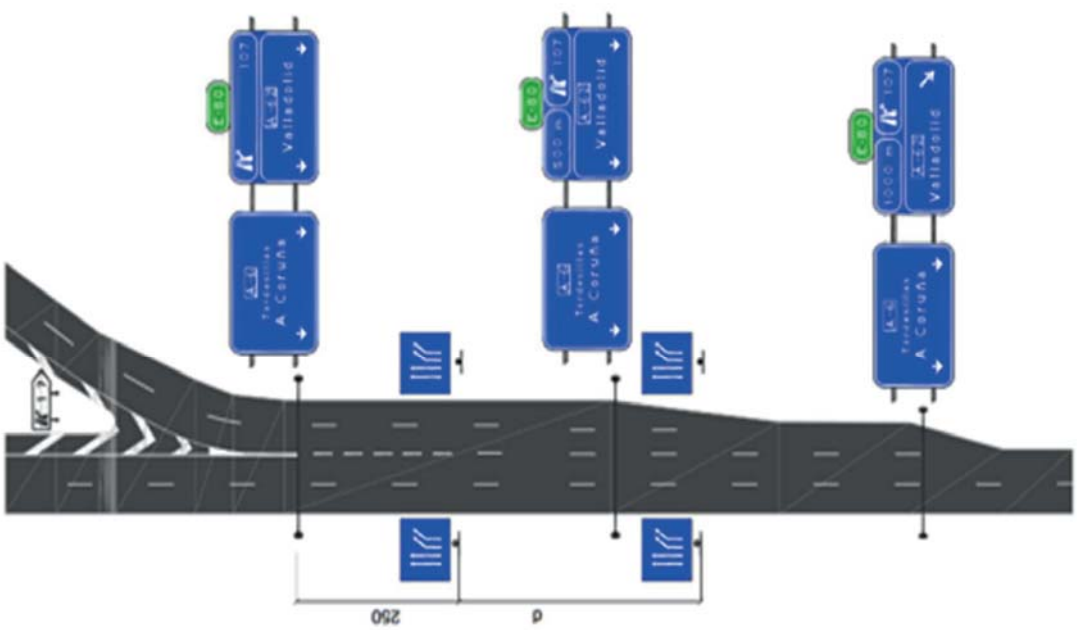
(b) Salida con perdida de carril directo

Figura 26. Señalización en carril de divergencia

En el caso de pérdida de carril, el pelotón deberá trasladarse al carril central para seguir su trayectoria. El conjunto de vehículos deberá indicar su intención de cambio de carril con suficiente antelación para que el resto de usuarios permitan dicha maniobra. Este tipo de salidas no son aconsejables con el uso de vehículos guiados por lo que será necesario considerar este aspecto en futuras infraestructuras y estudiar el funcionamiento de las existentes en la red.

- **Confluencias y bifurcaciones:**

Según la Norma 8.1.-IC Señalización vertical, el primer aviso de proximidad a un tramo de confluencia o bifurcación se realiza a 1.000 metros, es decir, al inicio de la disminución del número de carriles o al inicio de la ampliación del carril. Esta señalización se realiza sobre pórticos.



(a) Bifurcación con ampliación del carril lateral

(b) Bifurcación con ampliación del carril central

Figura 27. Señalización en las bifurcaciones

Algunas de estas zonas, como se ha mencionado anteriormente, con la implantación de vehículos guiados, requieren de mayor longitud de la establecida en la Instrucción de Carreteras 3.1. Trazado. Por tanto, la señalización en esta zona también deberá ser modificada. Además, al tratarse de una maniobra conflictiva, la señalización de aviso por proximidad deberá ser aumentada.

- **Carril adicional:**

En carreteras con calzadas separadas, se realiza la preseñalización de final de un carril adicional a 100 m y a 300 m, acompañando esta última con un panel complementario con la distancia. En alguno de los casos se complementa con otra señal a 500 m.

Como se indicó en el apartado de influencia en la infraestructura, el pelotón de camiones realiza las maniobras de manera coordinada por lo que la salida del último camión del pelotón del carril adicional para circulación lenta se realizará mucho antes de que éste finalice. En aquellos carriles donde no se incluya la señal complementaria a 500 metros se deberá incorporar o, en su caso, trasladar la señalización como mínimo a 500 metros, de manera que el conductor guía sea capaz de decidir el momento óptimo para

incorporarse al carril derecho del tronco de la vía. En aquellos casos en que exista un carril de vehículos rápidos también es conveniente avisar con anterioridad de la finalización del carril para tomar las decisiones oportunas en caso de existir en calzada un pelotón de vehículos.

Tras analizar los criterios actuales de señalización, con la implantación de vehículos guiados será necesario revisar los criterios de la Norma 8.1-IC "Señalización vertical" y la Norma 8.2-IC "Marcas viales" de la instrucción de carreteras. Además, será necesario incorporar señales en los propios vehículos pesados guiados. Algunas recomendaciones serían:

- Diseño de señales especiales incorporadas en la parte trasera del último vehículo pesado indicativa del número de vehículos acoplados.
- Indicar la longitud total del pelotón de camiones y su velocidad.
- Señales luminosas de balizamiento, como mínimo al principio y al final del pelotón, de manera que se pueda identificar la longitud del pelotón incluso en condiciones nocturnas.

3.3.5. CONCLUSIONES

Como se ha podido observar en los diferentes apartados anteriores, el paso de vehículos pesados guiados requeriría la modificación de diferentes secciones de la carretera, que serán de mayor o menor alcance en función de la intensidad de tráfico de la vía. De todos los elementos analizados, se observa que será necesario actuar fundamentalmente sobre aquellos que requieran maniobras por parte de los vehículos guiados pesados. Será necesario prolongar los carriles de cambio de velocidad, en especial los de aceleración, convirtiéndolos en carriles de convergencia o divergencia con una longitud que será función de las condiciones de tráfico en calzada. En zonas con enlaces muy próximos será necesario recurrir a vías colectoras-distribuidoras, evitando los

tramos de trenzado debido a la dificultad de maniobra que tienen los vehículos guiados, en particular en condiciones con altas intensidades de tráfico.

Las bifurcaciones se recomienda adaptarlas para que el incremento de carriles se realice por la derecha y en confluencias será necesario estudiar el comportamiento de los vehículos guiados cuando confluyen por la izquierda y tienen que realizar 2 cambios de carril, que requerirá en muchos casos disponer de mayores longitudes para realizar los movimientos.

Todos estos aspectos deberán ser estudiados con detenimiento para aquellas carreteras sobre las que circularán los pelotones. Además, al incluir una tipología de conducción diferente, será necesario modificar las normas generales de circulación, para asegurar que los usuarios de la vía se comporten de forma que no entorpezcan la circulación ni causen peligro.

La señalización deberá ajustarse a las nuevas necesidades de este tipo de vehículos circulando por la red de carreteras, aumentando las señalización y disponiéndola con mayor anticipación. También jugará un papel importante la versatilidad de la señalización variable, que cada vez se encuentra más instaurada en la red.

Independientemente de las mejoras que se puedan realizar en la señalización de la propia infraestructura, cabe mencionar que será casi más importante la propia señalización que conviene que lleven este tipo de vehículos, de tal forma que cualquier usuario sepa que se encuentra ante un tipo de vehículo especial.

3.4. IMPACTO SOBRE LA SEGURIDAD VIAL

La seguridad vial puede entenderse como la implementación de estrategias o acciones que permita minimizar los accidentes de tráfico, con el fin de conseguir un sistema viario más seguro. Estas acciones se desarrollan y efectúan a través del Plan

Estratégico de Seguridad Vial que se realiza anualmente, en el que se fijan un conjunto de objetivos, áreas estratégicas y líneas de intervención.

Se denominan accidentes de tráfico aquellos que reúnen las siguientes circunstancias:

- Producirse o tener su origen en una de las vías o terrenos objeto de la Legislación de Trafico y Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial.
- Producirse a consecuencia de los mismos una o varias personas muertas o heridas y/o solo daños materiales.
- Estar implicados al menos un vehículo en movimiento.

Un accidente de tráfico se considera un suceso eventual, de origen mecánico, ambiental o humano, no intencionado, que se produce como consecuencia o con ocasión del tráfico de vehículos. Pero, un accidente no puede tomarse como un suceso eventual como tal, ya que en la mayoría de los casos son consecuencia de algún fallo evitable. Es por ello que existe un interés continuo en determinar los factores que ocasionan estos accidentes con el fin de minimizarlos. Es importante conocer **las fases de un accidente, los elementos que intervienen y las posibles causas de los accidentes** para poderse hacer una idea de la influencia que tendría la incorporación de un alto sistema tecnológico en la accidentabilidad.

Un accidente de tráfico es un proceso dinámico en el que, a pesar de su brevedad, se desarrollan tres **fases**:

1. *Fase de percepción*: hace referencia al punto en el que el conductor percibe por primera vez un peligro que puede desembocar en accidente. La fase abarca desde el momento en el que el conductor se da cuenta del peligro, hasta que reacciona para poner en marcha mecanismos con el fin de evitarlo o minimizarlo. Este periodo de tiempo se denomina tiempo de reacción y suele oscilar entre 0,75 y 1 segundo, en función de cada persona.

2. *Fase de decisión*: es aquella en la que el conductor reaccionan ante el peligro. Las maniobras de evasión pueden clasificarse en simples pasivas (tocar el claxon, luces, etc.) simples activas (reducir la velocidad, detener el vehículo, cambiar la dirección,

etc.) y complejas (combinaciones de las anteriores). Esta fase podría no existir por la rapidez de los acontecimientos.

3. *Fase de conflicto*: La fase de conflicto supone la última fase en la evolución del accidente. Dentro de esta fase se distinguen tres puntos, la zona de conflicto, entendiendo como tal el espacio donde existe la mayor posibilidad de que ocurra el accidente, el punto de conflicto y la posición final en la que se encuentran los vehículos implicados.

Por otro lado, para que se produzca un accidente se debe dar la simultaneidad de varias **causas**. Éstas se pueden dividir en dos grupos:

- *Causas inmediatas:* hacen referencia a la causa principal que produce el accidente. La causa más común es la imprudencia originada por el ser humano. Algunos ejemplos son: infracciones de tráfico, velocidad excesiva o inadecuada, deficiencias en la percepción, errores en la evasión, condiciones negativas del conductor, etc.
- *Causas mediatas*: circunstancias que influyen en su ocurrencia, pero no se relacionan con el accidente de un modo directo. Pueden ser:
    1. Relativas al vehículo (freno, suspensión, dirección, etc.)
    2. Relativas a la carretera (mal estado, señalización, defectos del trazado, etc.)
    3. Relativas a fenómenos atmosféricos
    4. Relativas al conductor o peatón (físicas, psíquicas, experiencia, etc.)

Los **factores que intervienen** en un accidente de tráfico pueden clasificarse en:

- *Factor humano*: es uno de los factores de mayor responsabilidad en los accidentes de tráfico, siendo el causante de la mayoría de ellos. Entre los tipos de fallos humanos encontramos los fallos de percepción y reacción, deficiencias físicas (cansancio, somnolencia, enfermedad, etc), distracciones o agentes inhibidores de

la prudencia que hacen sobreestimar la propia habilidad del conductor y disminuir el riesgo.

- *El vehículo*: El diseño del vehículo ya cuenta con una serie de sistemas de seguridad activa capaces de reducir la posibilidad de que se produzca un accidente, algún ejemplo sería: sistema de frenado, adherencia de los neumáticos, amortiguación, elementos que mejoran la visibilidad, etc. Pero, todos ellos pueden sufrir un fallo mecánico y ocasionar un accidente de tráfico. En la mayoría de los casos, estos fallos mecánicos, son responsabilidad directa del conductor por falta de mantenimiento, antigüedad del vehículo o desconocimiento del funcionamiento de éste y sus sistemas de seguridad. Estos factores pueden producir problemas en los frenos, mal estado de los neumáticos, fallos en la iluminación, etc. que suponen un riesgo en la circulación. El vehículo supone entre el 5 y el 13% de las causas de accidente registradas.
- *La vía*: El tipo de vía es también un motivo claro de riesgo de accidente, se produce un mayor número de accidentes en carreteras convencionales de calzada única con enlaces al mismo nivel que en carreteras de calzadas separadas. El trazado de la vía, pavimentación, anchura de los carriles, resistencia al deslizamiento, el peralte, etc. son factores que intervienen en la probabilidad de ocurrencia de un accidente. Además, hay que incluir la señalización de la misma y la visibilidad e iluminación de la vía. Según la DGT, en el año 2015 el 8,5% de los accidentes se produjeron en puntos negros, lo que demuestra la implicación directa del diseño de la vía. Estos puntos deben ser analizados para minimizar el riesgo.

3.4.1. DATOS DE ACCIDENTABILIDAD

Los vehículos que conformarían los llamados pelotones de camiones estarían equipados con un alto sistema tecnológico. Este sistema realiza de manera automática todas las maniobras necesarias, disminuyendo así la influencia del factor humano en la

accidentabilidad. Por tanto, reducimos la posibilidad de provocar un accidente por dos aspectos:

- Menor número de conductores controlando las tareas de conducción de un vehículo pesado
- Alto equipamiento tecnológico que permite prever un riesgo y anticiparse en la actuación.

Según indica la Dirección General de Tráfico en el anuario estadístico de accidentes, en el año 2015 se han producido en vías interurbanas un total de 1.248 personas fallecidas, 4.744 personas con necesidad de hospitalización y más de 48.036 personas heridas no hospitalizadas en los 34.558 accidentes de tráfico con víctimas ocurridos durante todo el año, que suponen el 35% de los accidentes en vías urbanas e interurbanas. Los datos recogidos en vías interurbanas engloban carreteras convencionales, autovías, autopistas, camino vecinal, vías de servicio, ramales de enlace y otro tipo.

Por el momento, los vehículos guiados solo circularían por vías interurbanas de alta capacidad (autovías o autopistas), por lo que, centrándonos en los datos acerca de estas vías, tenemos:

	Autopista	Autovía	TOTAL	% Vía interurbana
Accidentes con víctimas	2.398	8.431	10.829	31,3%
Fallecidos	75	202	277	22,2%
Heridos hospitalizados	223	741	964	20,3%
Heridos no hospitalizados	3.694	12.839	16.533	34,4%

Tabla 22. Siniestralidad en autovías y autopistas. Representación con respecto a las vías interurbanas.

El 11% del total de accidentes de tráfico con víctimas se desarrollan en autovías o autopistas. La mayor parte de los accidentes se concentran en carreteras convencionales y en vías urbanas.

La tipología de accidentes producidos según el anuario estadístico de accidentes 2015 son:

VÍAS INTERURBANAS				
TIPO DE ACCIDENTE	Accidentes con víctimas			
	TOTAL	Fallecidos	Heridos hospitalizados	Heridos no hospitalizados
Frontal	1.445	195	545	2.406
Fronto-lateral	4.074	129	558	6.174
Lateral	2.293	11	158	3.193
Por alcance	6.554	89	308	10.551
Múltiple o en caravana	2.621	47	210	5.793
Colisión contra obstáculos o elementos de la vía	531	9	33	696
Atropello a personas	679	97	191	481
Atropello a animales	320	5	26	381
Vuelco	972	12	77	1.023
Caída	992	18	152	949
Sólo salida de la vía	0	0	0	0
Salida de la vía por la izquierda con colisión	1.769	98	269	2.206
Salida de la vía por la izquierda con despeñamiento	219	21	61	246
Salida de la vía por la izquierda con vuelco	1.311	60	209	1.573
Salida de la vía por la izquierda, de otro tipo	881	26	108	1.019
Salida de la vía por la derecha con colisión	2.274	128	393	2.658
Salida de la vía por la derecha con despeñamiento	338	28	94	375
Salida de la vía por la derecha con vuelco	2.022	68	273	2.434
Salida de la vía por la derecha, otro tipo	3.438	35	212	4.195
Otro tipo de accidente	1.825	172	847	1.683
TOTAL	**34.558**	**1.248**	**4.744**	**48.036**

Tabla 23. Tipo de accidente en vías interurbanas según el anuario estadístico de accidentes en 2015

El tipo de evento que más se repite es el causado por alcance de un vehículo a otro, seguido de accidentes fronto-laterales, salida de vía por la derecha, o de tipo múltiple o en caravana. Uno de los elementos subjetivos que interviene con mayor frecuencia en

estos accidentes es la distracción, provocando un mayor tiempo de reacción del conductor ante una situación inesperada.

Según la DGT, los vehículos pesados intervienen en el 7% de los accidentes con víctimas en vías interurbanas.

3.4.2. CONCLUSIONES

Los sistemas tecnológicos que incorporan los pelotones de camiones podrían evitar o reducir las consecuencias de aquellos accidentes que han sido provocados por una mala decisión del conductor, ya sea por mantener una distancia de seguridad insuficiente, pérdida del control del vehículo o velocidad de circulación inadecuada. Estos motivos representan una buena parte de los accidentes mostrados en la tabla anterior.

Analizando los accidentes en los que se ha visto implicado un vehículo pesado, se obtienen los siguientes resultados:

ACCIDENTES CON VÍCTIMAS		VEHÍCULOS PESADOS IMPLICADOS	
Vías interurbanas y urbanas	Vías interurbanas	Vías interurbanas y urbanas	Vías interurbanas
97.756	34.558	6.068	4.103

Tabla 24. Vehículos pesados implicados en accidentes con victimas

A pesar de que en vías de alta capacidad sólo se registran un 11% de los accidentes con víctimas, se observa que la implicación de vehículos pesados en accidentes con víctimas es mayor en vías interurbanas, registrándose una parte importante en las vías de alta capacidad. Considerando que la responsabilidad del conductor del

vehículo pesado es causa de algunos de estos accidentes, la utilización de vehículos equipados con un alto sistema tecnológico podría reducir una buena parte de ellos, dependiendo de la proporción de vehículos pesados que fuesen guiados.

En este caso se han tenido en cuenta solo los accidentes de tráfico con víctimas, pero no hay que olvidar la cantidad de daños materiales que se producen diariamente como resultado de accidentes y la consecuencia económica que suponen. La implantación de estos sistemas tecnológicos también reduciría las causas que originan esta tipología de accidente, mejorando la seguridad de la vía.

4. ESTUDIO PRÁCTICO: AUTOVÍA A-7

4.1. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO QUE SIMULAN ACTUALMENTE LOS PELOTONES DE CAMIONES EN LAS AUTOVÍAS.

Los pelotones de camiones se caracterizan por el hecho de circular varios vehículos pesados a una distancia inferior a la recomendada en el Código de Circulación. Actualmente, se observa que muchos vehículos no respetan esta distancia de seguridad durante la conducción, lo que da lugar a los denominados pelotones de camiones. Estas formaciones permiten simular el paso de los pelotones de camiones guiados estudiados. Por ello, en los apartados siguientes se va a realizar un análisis observacional del tráfico actual de un tramo de carretera de alta capacidad con un elevado tráfico pesado, con el fin de comprobar los tipos de pelotones formados en una carretera, analizando los patrones de comportamiento establecidos en la conducción al encontrarse con uno de estos pelotones de camiones.

Se estudian las características de los pelotones formados, indicando el número de vehículos que conforman el pelotón, la distancia establecida entre vehículos y las longitudes medias del conjunto. A través de las cámaras fijas establecidas en una carretera de alta capacidad, se observan las maniobras realizadas por el resto de usuarios al encontrarse con un pelotón de camiones en los accesos y salidas de la vía. Además, se comprobarán los tiempos medios de adelantamiento para los vehículos pesados.

El análisis del tráfico actual permitirá comprobar la importancia de las diversas maniobras en la seguridad vial, así como la implicación de los vehículos pesados en la misma. Para ello, se analiza el historial de accidentes registrados en la misma carretera durante todo un año.

Con estos resultados podremos contrastar y comprobar las ventajas de una conducción guiada con respecto a la circulación convencional de los vehículos pesados.

4.2. RED DE ALTA CAPACIDAD EN ESPAÑA

La red española de carreteras está formada actualmente por 166.003 kilómetros, de los cuales 26.329 están gestionados por la Administración Central y recogen el 51,8% del tráfico total y el 63,3% del tráfico pesado. Asimismo hay 71.324 km que están gestionados por las Comunidades Autónomas y soportan el 42,5% del tráfico, y 68.349 por las Diputaciones, que suponen el 5,7% del tráfico restante.

Además de este viario, los ayuntamientos tienen a su cargo unos 489.698 km de los cuales 361.517 km son interurbanos. Finalmente, existen 11.355 km de viario dependiente de otros organismos. De la totalidad de la red, 17.021 km son vías de gran capacidad (autopistas de peaje, autopistas libres, autovías y carreteras multicarril), de las cuales 11.942 km pertenecen a la Red de Carreteras del Estado. Estos datos sitúan a España como el país con mayor longitud de este tipo de vías en Europa. En segunda posición se encuentra Alemania, con 12.879 km seguida de Francia con 11.465 km.

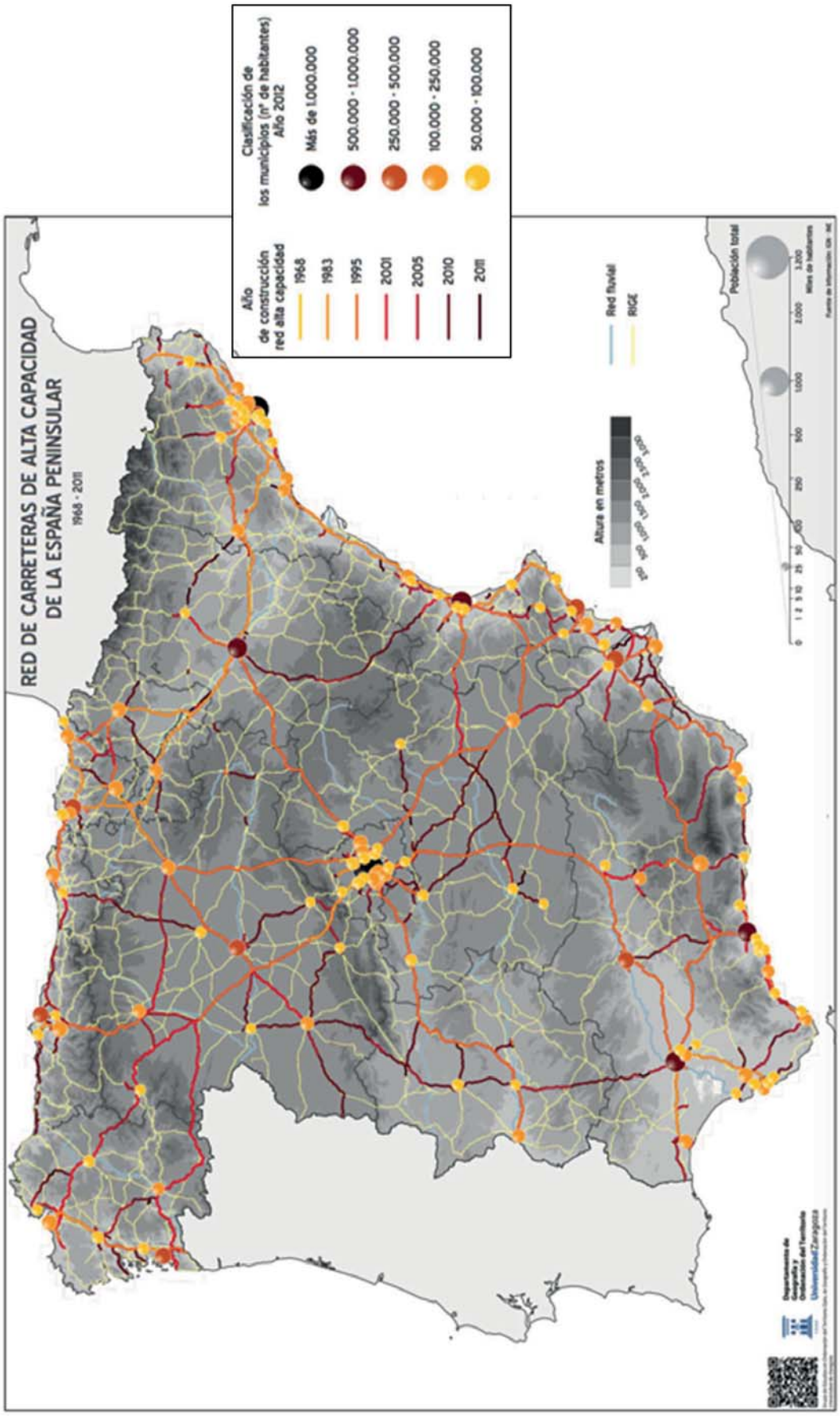


Figura 28. Evolución Red de alta capacidad en España.

Fuente: Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza.

Algunas carreteras españolas de alta capacidad conectan puntos de gran interés en el transporte de mercancías, lo que produce un elevado tráfico pesado circulando por las mismas. Un alto porcentaje de vehículos pesados genera la formación de pelotones de camiones en los carriles derechos de las carreteras como consecuencia de su menor velocidad máxima de circulación y de la potencia de estos vehículos. Así, durante un adelantamiento, deben permanecer durante un largo tiempo en el carril izquierdo o central de la vía, lo que puede producir demoras en la conducción. Este hecho, por otra parte, supone un problema en el ámbito de la seguridad vial, dado que, al tratarse de vehículos de mayores dimensiones y tonelaje que efectúan conducciones de largo recorrido, produce un aumento de los riesgos habituales en todo tipo de vías.

Un ejemplo claro de esta situación es la autovía A-7, cuyas vías recogen una elevada intensidad de tráfico con un alto porcentaje de pesados. Se ha seleccionado esta carretera en este estudio, ya que registra un tráfico importante de pesados que en muchas ocasiones circulan excesivamente juntos, situación asimilable al funcionamiento de los vehículos guiados. A partir de un estudio observacional del comportamiento real de los vehículos que circulan en pelotón y del resto de usuarios, podremos llegar a conclusiones que complementarán a las obtenidas previamente desde el punto de vista teórico.

(a) Autovía A-7 a la altura de Bétera - Burjassot

(b) Autovía A-7 en el cruce con la CV-35

Figura 29. Autovía A-7 a su paso por Valencia

4.3. CARRETERA DE ESTUDIO. AUTOVÍA A-7

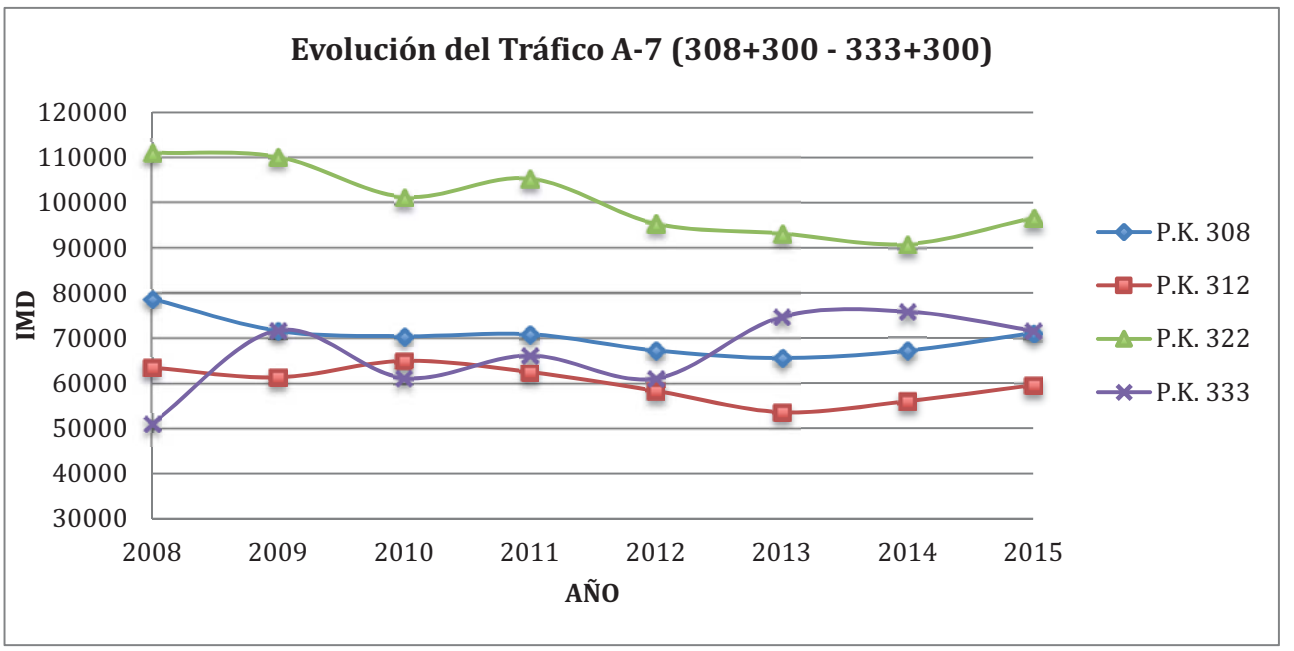
La autovía del Mediterráneo o A-7 forma parte del itinerario transeuropeo E-15, que discurre desde Algeciras hasta la frontera francesa a través de la costa mediterránea.

Figura 30. Autovía A-7 y tramo de estudio

El tramo de estudio, denominado By-pass de Valencia, es el tramo de la A-7 que comienza al norte de Valencia, entre los términos municipales de Sagunto y Puzol (P.K. 307) y finaliza en el encuentro de la A-7 con la V-31 a la altura de Silla-Picasent (P.K. 355). El tramo conforma un total de 48 kilómetros, de tres carriles por sentido, sirviendo de circunvalación de la ciudad de Valencia por el oeste.

Esta carretera soportó en el año 2015 un total de 59.561 vh/día en el P.K. 312+054, de los cuales 14.524 vh/día era tráfico pesado (24,3%). En el P.K. 322+035 la intensidad aumenta a 96.604 vh/día y un total de 20.677 vehículos pesados al día (21,4%). Es por ello que se toma esta autovía como carretera de referencia para el estudio.

El tráfico en esta zona se ha visto incrementado en los últimos años y como consecuencia, su accidentabilidad. En las siguientes gráficas, elaboradas a partir de los Mapas de Tráfico del Ministerio de Fomento y de la DGT, podemos observar su evolución desde el 2008 hasta el 2015:



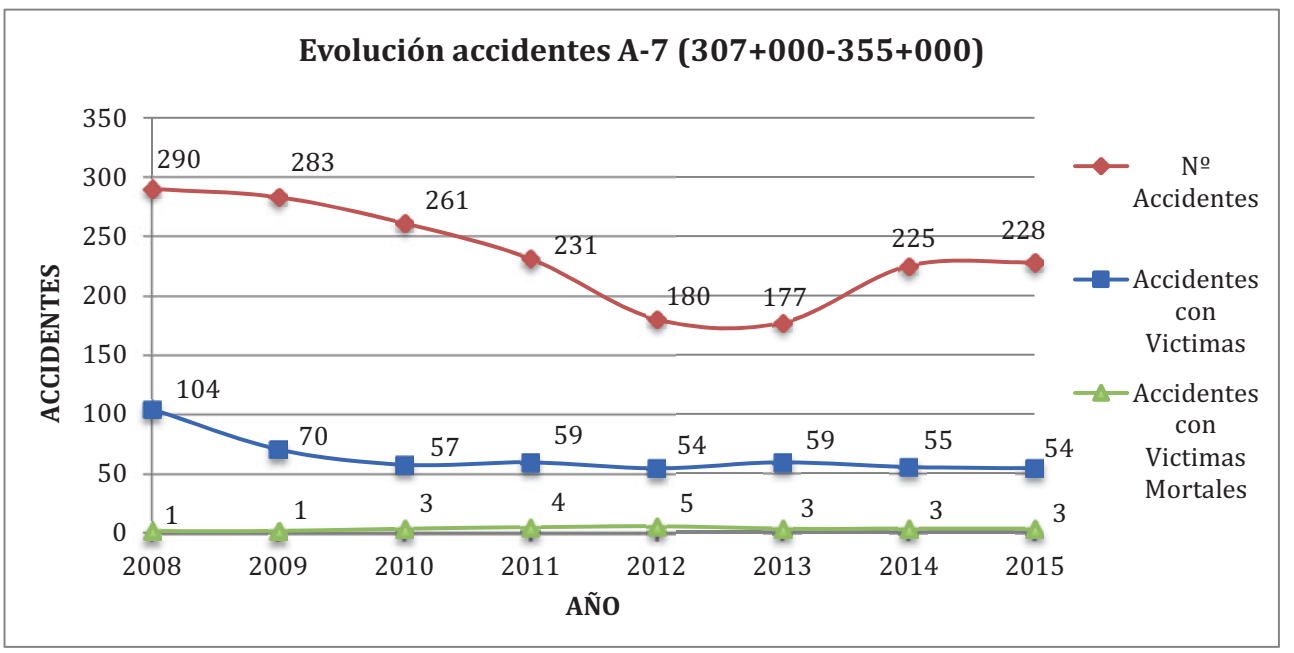


Figura 31. Evolución del tráfico y de la accidentabilidad en la autovía A-7

La sección transversal de la Autovía E-15/A-7 es de tres carriles por sentido en la mayor parte del trazado. Cada calzada cuenta con tres carriles de 3,5 metros de ancho, con arcenes exteriores de entre 1,5 y 2,5 metros de ancho e interiores de entre 1 y 1,5 metros de ancho. El trazado de la autovía discurre por zona llana con sucesión de zonas terraplenadas intercaladas con algunos desmontes de carácter suave.

Figura 32. Sección transversal autovía A-7

4.3.1. DATOS DISPONIBLES Y PERIODO DE ESTUDIO

Se pretende analizar el comportamiento del resto de usuarios al encontrarse con un pelotón de camiones y la influencia de los mismos en la seguridad vial. Para ello se han estudiado los siguientes datos:

- El Centro de Gestión de Tráfico ha facilitado las imágenes recogidas por las cámaras de tráfico permanentes situadas entre los PK. 315 y 336 de la A-7, que van desde la intersección de A-7 con la A-3, hasta Puzol.

- La Dirección General de Carreteras publica cada año el tráfico registrado a partir de las estaciones de aforo instaladas en la Red de Carreteras. Se dispone, por tanto, de seis estaciones de aforo de la carretera de estudio.

- El Centro de Conservación del Sector V-1 de Valencia ha aportado los datos disponibles relacionados con la seguridad vial, permitiéndonos acceder al registro de partes de accidentes ocasionados entre los P.K. 307 hasta el 355 de la A-7.

Más adelante se detalla la metodología de análisis empleada en este estudio, así como el periodo de análisis acorde a la información que se pretende recoger.

Estos datos serán suficientes para tomar consciencia de la situación actual en las vías de alta capacidad que presentan un alto porcentaje de vehículos pesados. Sólo así podremos sugerir las posibles diferencias que hallaríamos al adaptar ciertos vehículos pesados al caso de vehículos guiados, que cuentan con un alto equipamiento tecnológico.

A. Cámaras de video

El Centro de Gestión de Tráfico nos ha proporcionado las imágenes de seis cámaras de tráfico. En ellas se visualizan las horas de mayor intensidad de tráfico (de 8 a 20h) correspondientes a todo un mes, desde el 26 de noviembre hasta el 26 de diciembre de 2016. La siguiente imagen refleja la localización geográfica de cada una de ellas:

Figura 33. Localización de las cámaras de tráfico

La tabla que se muestra a continuación recoge el nombre asignado a cada una de las cámaras, indicando el punto kilométrico en el que se encuentra y, en el caso de tratarse de un enlace, las carreteras con las que conecta. Por otro lado, se indican los segmentos de carretera que se pueden estudiar a partir de las mismas:

NOMBRE	P.K.	ENLACES	ACCESO	SALIDA	TRONCO
C4	306+900C	V-21 / V-23 / AP-7			X
C5	315+350	CV-32 / CV-305 / CV-315	X	X	
C6	321+200D	CV-310	X	X	
C7	324+080C	CV-35	X	X	
C8	330+400C				X
C9	336+100C	A-3			X

Tabla 25. Resumen de las cámaras proporcionadas

En las siguientes imágenes podemos observar la vista de cada una de éstas cámaras:

A. Cámara C4. PK. 306+900C

B. Cámara C5. PK. 315+350

C. Cámara C6. PK. 321+200D

D. Cámara C7. PK. 324+080C

E. Cámara C8. PK. 330+400C

F. Cámara C9. PK. 336+100C

Figura 34. Visión de las cámaras proporcionadas

Teniendo en cuenta la información que se quiere recoger para el estudio (características de los pelotones de camiones, interferencias en accesos y salidas de vía y adelantamientos), las cámaras que interesa visualizar son la C5 (P.K. 315+350) y la C6 (P.K. 321+200). El resto de cámaras se encuentran enfocando a secciones de carretera muy amplias que impiden percibir las maniobras realizadas, o con una perspectiva que dificulta la caracterización de los vehículos y la formación de pelotones.

Es importante subrayar que, en este caso, interesa realizar el estudio empleando datos obtenidos de un **día laborable**, que presenta un mayor tráfico de vehículos pesados, y en **condiciones climatológicas favorables**, de manera que no se alteren los resultados por factores externos. Además, las cámaras no siempre enfocan hacia el mismo sitio, por lo que la selección del periodo de estudio está condicionada por estos tres aspectos. Por tanto, el periodo de análisis para cada una de las cámaras será el siguiente:

- **Cámara C5:** Esta es la cámara que permite recoger información relativa a las características de los pelotones de camiones, ya que la posición de la cámara permite observar la longitud completa de los vehículos. Se visualiza el día 5 de diciembre para el periodo de mayor intensidad de tráfico (8:30 a 10:30h). Dado que solo interesa conocer la proximidad que mantienen unos vehículos pesados con otros y la cantidad de vehículos que se encuentran circulando en pelotón, no es necesario estudiar un elevado periodo de tiempo, sino un gran número de pelotones de camiones para ver su variabilidad. El sentido estudiado será el descendente, es decir, que observaremos los vehículos con dirección Barcelona. También se analizarán los adelantamientos que se han producido en este mismo periodo de tiempo.
- **Cámara C6:** De esta cámara se obtienen las maniobras realizadas durante las incorporaciones a la vía. En este caso, interesa visualizar dos días laborables para comparar las intensidades de tráfico y las maniobras realizadas. El periodo de análisis será de 5 horas, desde las 8:00 hasta las 13:00 del carril descendente, correspondiente al periodo de mayor intensidad de tráfico para los días 29 de noviembre y 9 de diciembre.

B. Datos de aforo

El Ministerio de Fomento publica cada año los datos de tráfico recogidos por las estaciones de aforo instaladas en los distintos puntos kilométricos de la Red de Carreteras. Para la autovía de estudio se han tomado seis estaciones de aforo, desde el punto kilométrico 308, hasta el 352. En la siguiente imagen se muestra la localización de cada estación de aforo mediante un cuadro rojo que enmarca otro cuadro verde, lo que indica que se trata de una estación de control secundaria:

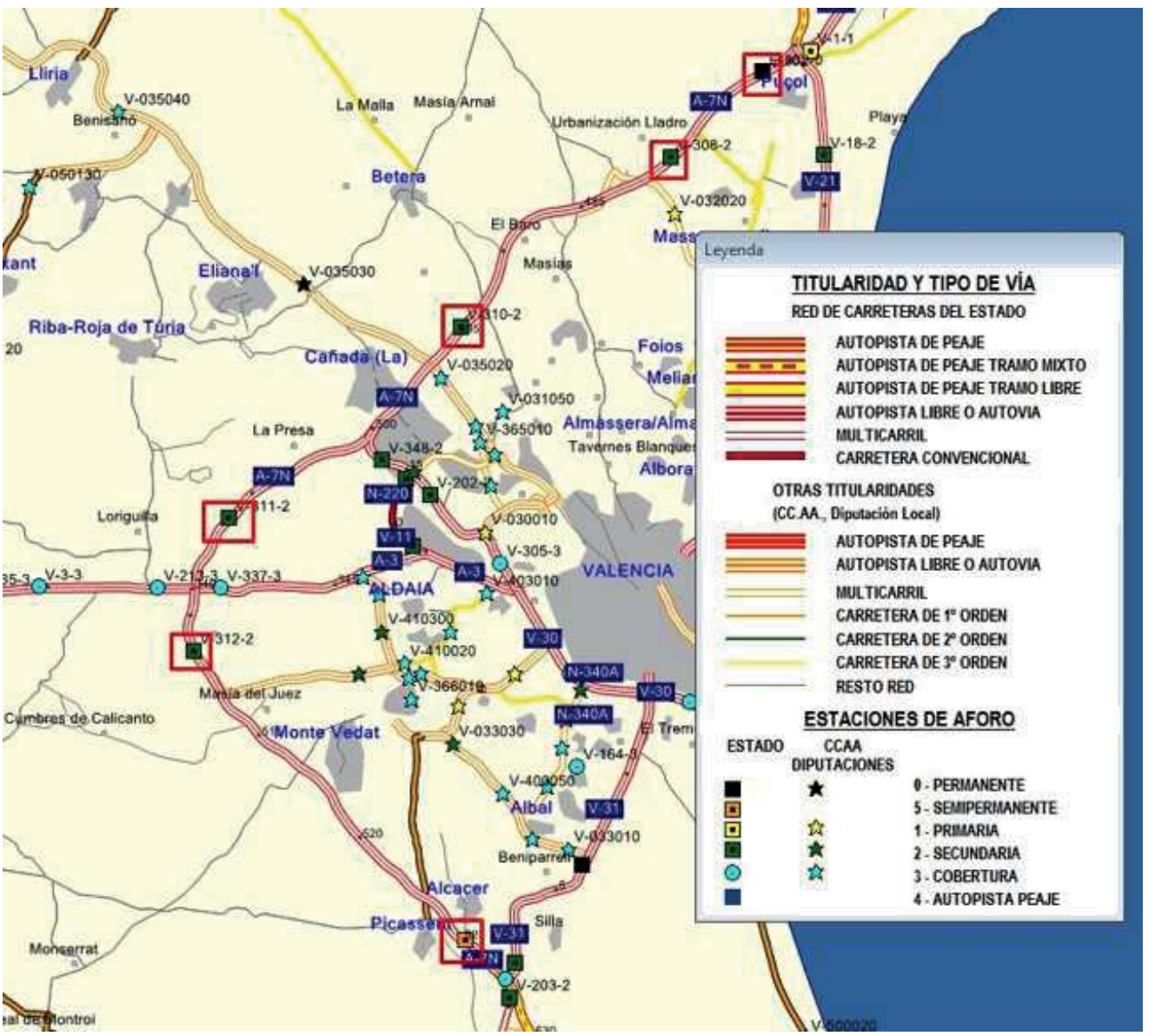


Figura 35. Localización geográfica de las estaciones de aforo

La intensidad media diaria para el año 2015 de las distintas estaciones queda:

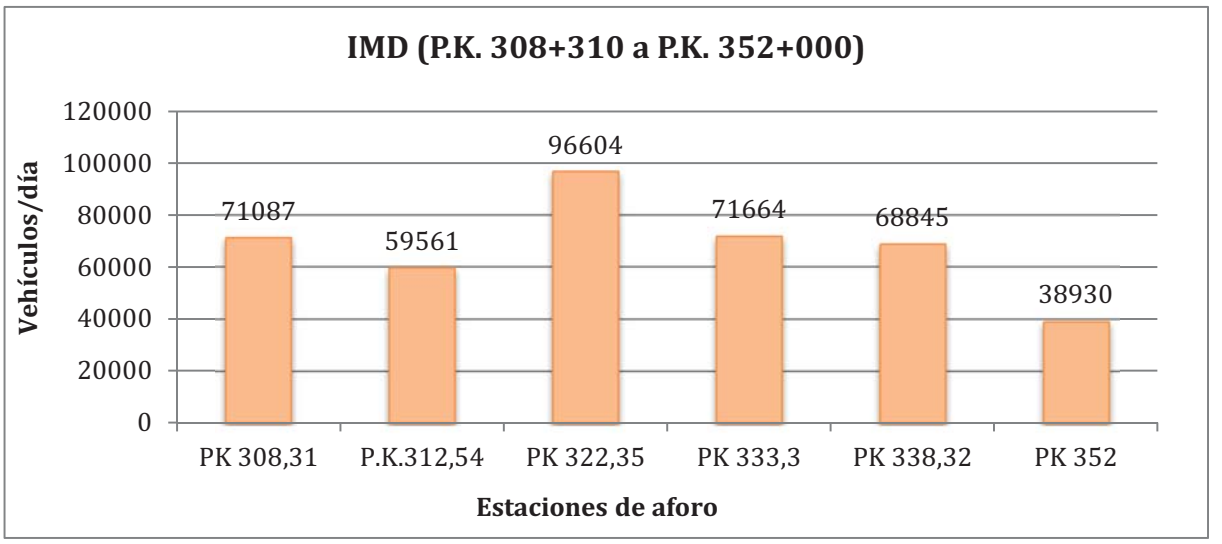


Figura 36. Intensidad media diaria en las estaciones de aforo del By-pass de Valencia

Como se ha indicado anteriormente, los puntos kilométricos que estudiaremos para el análisis de comportamiento serán el 315 y el 321, por lo que tomaremos las dos estaciones más próximas: P.K. 312+540 y P.K. 322+350:

Figura 37. Localización estación de aforo y cámara fija C5

Figura 38. Localización estación de aforo y cámara fija C6

C. Historial accidentes

El Centro de Conservación del Sector V-1 de Valencia ha facilitado los estudios de accidentabilidad de la autovía A-7 de los años 2014 y 2015, así como el historial de accidentes registrados por la DGT dentro de su zona de gestión.

El tramo de autovía estudiado abarca desde el P.K. 307+000 hasta el 355+200, es decir, todo el denominado By-pass de Valencia. Discurre desde el cruce de la A-7 con la V-21 y V-23 a la altura de Puzol hasta el encuentro de la A-7 con la V-31 a la altura de Silla-Picassent, lo que conforma un total de 48 kilómetros de carretera.

Figura 39. Tramo de estudio para análisis de accidentabilidad

La información recogida en cada uno de los partes de accidente es muy amplia, si bien para nuestro caso de estudio nos interesaría conocer concretamente el número de accidentes en los que se haya visto involucrado un vehículo pesado, la gravedad del mismo y las posibles causas que lo provocaron. Para el análisis se estudiarán los accidentes ocasionados durante todo un año, desde el 31 de octubre de 2015 hasta el 31 de octubre de 2016 (último periodo registrado).

4.4. ANÁLISIS COMPORTAMIENTO DEL RESTO DE USUARIOS FRENTE AL CONVOY DE CARRETERA. AUTOVÍA A-7

Para poder realizar un estudio de la influencia del paso de vehículos en pelotón por las autovías, se han utilizado las imágenes recogidas por las grabaciones de video de las cámaras mencionadas en el apartado anterior. Se observarán los patrones de comportamiento realizados por los diversos vehículos al encontrarse con un pelotón de camiones en los accesos y salidas de la vía principal, así como la influencia en los adelantamientos. La toma de datos se ha realizado entendiendo como pelotón de camiones a cualquier vehículo pesado que circule a menos de 80 metros de otro vehículo pesado (esta cifra representa la distancia de seguridad mínima que aconseja el Reglamento de Circulación para vehículos que circulan a 90 km/h).

A. METODOLOGÍA

Se opta por las cámaras C5 y C6, cuya localización se ha podido observar en la figura 33, debido a que enfocan hacia secciones que nos proporcionan mayor información sobre las diferentes conductas de circulación presentes en la carretera.

Con los resultados de dicho análisis se pretende estimar las posibles modificaciones necesarias en caso de poner en práctica la circulación de vehículos pesados guiados y su influencia en la seguridad vial.

Las herramientas informáticas utilizadas en el estudio han sido, en primer lugar, el programa de análisis de video KINOVEA y, en segundo lugar, el programa de diseño AUTOCAD, que nos da la posibilidad de conocer con mayor detalle las distancias entre vehículos.

En primer lugar, resulta necesario conocer las características de los pelotones de camiones que circulan en la autovía A-7 para poder identificar las maniobras realizadas en función del tipo de pelotón presente, ya que estas, pueden depender de la distancia marcada entre los vehículos pesados y el número de vehículos enlazados. Estos datos permitirán, a su vez, estimar la influencia de los mismos en la seguridad vial.

El Reglamento de Circulación de Tráfico establece que todo vehículo que circule detrás de otro debe hacerlo manteniendo una distancia de seguridad que le permita detenerse en caso de frenazo brusco, sin colisionar con él, teniendo en cuenta especialmente la velocidad, las condiciones de frenado y adherencia. Se estima que la distancia de seguridad que permite reaccionar ante un suceso inesperado y frenar el vehículo para una circulación de 90 km/h es de 80 metros. Por tanto, se toma como pelotón de camiones aquellos vehículos pesados que se encuentren circulando a una distancia inferior del vehículo precedente.

Las variables estudiadas han sido el número de vehículos circulando en pelotón, la distancia entre vehículos y la longitud total de los pelotones formados.

4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PELOTONES DE CAMIONES

En la sección objeto de estudio hallamos una intensidad media diaria de 59.561 vehículos/día [Datos estación de aforo 2015], con un 75,7% de vehículos ligeros y un 24,3% de vehículos pesados. Como se trata de una estación de aforo secundaria, no se tienen datos de intensidades horarias medias, por lo que se calculan a través de las grabaciones aportadas. Para la fecha de estudio, día 5 de diciembre, la evolución del tráfico en la zona para las horas de luz (8:00 – 18:00 h) queda de la siguiente manera:

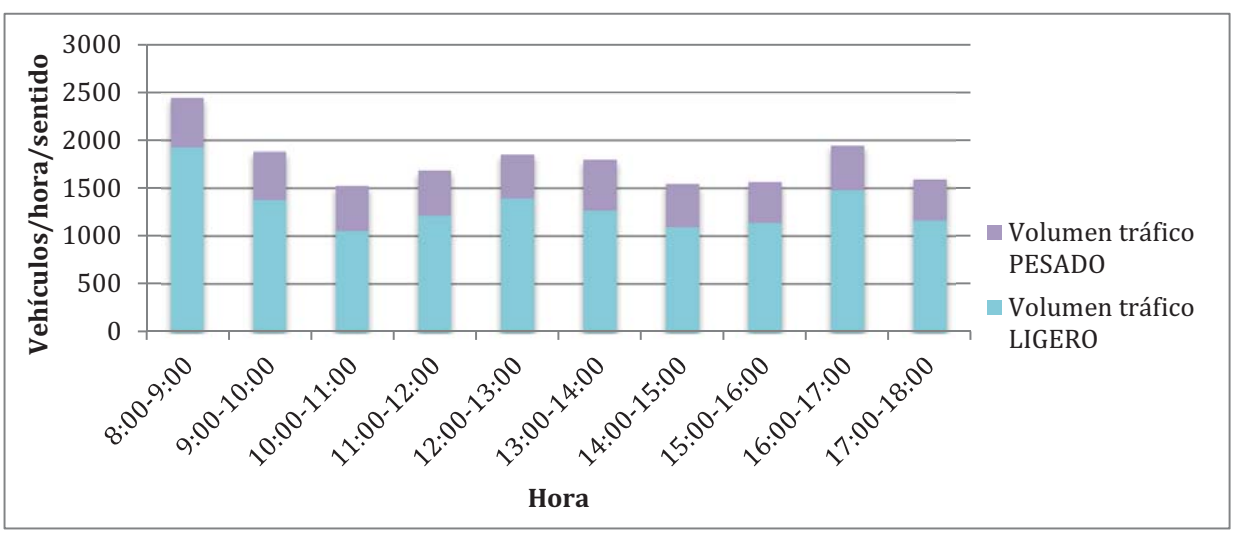


Figura 40. Intensidades horarias en la sección C5 (vehículos/hora/sentido)

Se tiene en cuenta solo las horas de luz debido a la imposibilidad de caracterizar el tráfico y los pelotones de camiones en condiciones nocturnas. Además, con la ausencia de luz natural, asumimos que las intensidades de tráfico descienden y, por su parte, las distancias marcadas entre vehículos aumentan debido a la disminución de la visibilidad. La evolución del tráfico es previsible al tratarse de una carretera que sirve de circunvalación a la ciudad de Valencia. Por ello, el tráfico ligero aumenta a primera hora de la mañana, al medio día y a última hora de la tarde, siendo el tráfico pesado prácticamente constante durante todo el día.

Se tiene una intensidad horaria máxima de 2.440 vehículos/hora a primera hora de la mañana, entre las 8:00 y las 9:00 horas. Cabe mencionar que, las intensidades de tráfico mostradas son para una única dirección dentro de la sección de estudio, en este caso en dirección Barcelona.

	VEHÍCULOS/HORA SECCIÓN C5		
	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico LIGERO	Volumen tráfico PESADO
8:00-9:00	2440	1922	518
9:00-10:00	1884	1385	499
10:00-11:00	1526	1053	473
11:00-12:00	1683	1213	470
12:00-13:00	1853	1399	454
13:00-14:00	1799	1267	532
14:00-15:00	1544	1098	446
15:00-16:00	1564	1142	422
16:00-17:00	1942	1480	462
17:00-18:00	1597	1165	432
MÁXIMO	**2440**	**1922**	**532**
MEDIA	**1783**	**1312**	**471**

Tabla 26. Intensidades horarias en sección C5

En la siguiente imagen se muestra una serie de ejemplos de pelotones de camiones formados en la A-7:

Figura 41. Formación de pelotones en autovía A-7.

Para realizar un registro de las características anteriormente mencionadas, se han visualizado imágenes de distintos días y se ha considerado representativas las horas de mayor tráfico, entre las 8:30 a 10:30 h (cámara C5). [Se ha rechazado la primera media

hora de la mañana por la falta de precisión en la toma de datos debido a la baja luminosidad.]

Así, se han observado 55 pelotones de camiones, lo que conforma un total de 133 vehículos pesados circulando en pelotón, si tenemos en cuenta que durante las dos primeras horas de grabación el volumen de tráfico pesado ha sido de un total de 1.152 vehículos pesados, supone que el 12% de los vehículos pesados se encuentran circulando en pelotón. Los pelotones observados estaban compuestos, cómo máximo, por 5 vehículos pesados. La distribución de los pelotones queda como sigue:

	TIPO DE PELOTÓN				
	2	3	4	5	TOTAL
8:30-9:30	13	7	1	2	23
9:30-10:30	24	8	0	0	32
TOTAL	37	15	1	2	55

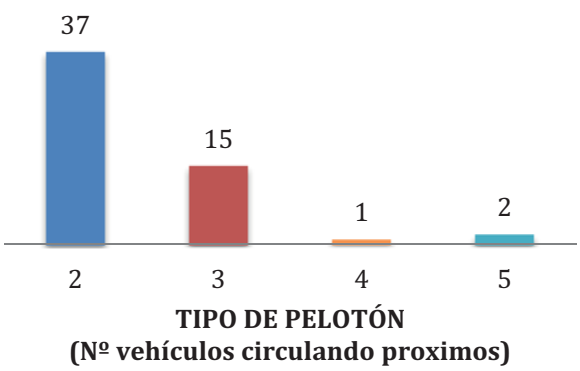


Figura 42. Número y tipo de pelotones formados

En la gráfica anterior se muestra el número de pelotones observados para cada tipo de pelotón. Por tanto, los resultados indican que la mayoría de los pelotones que circulan guardando una distancia de seguridad inferior a la recomendada están compuestos solo por dos vehículos pesados, lo que representa el 67,5% del total de pelotones observados. Por su parte, los pelotones formados por 3 vehículos representan el 27,5%, mientras que los pelotones de más de 3 vehículos alcanzan tan solo el 5%. En la siguiente tabla se muestran los promedios de las distancias entre vehículos, así como las longitudes totales de pelotón en función del número de vehículos que se encuentran enlazados:

	NÚMERO VEHÍCULOS EN PELOTÓN				
	2	3	4	5	MEDIA
DISTANCIA MEDIA ENTRE VEH (m).	31,9	39,6	37,7	36,0	36,3
LONGITUD MEDIA PELOTÓN (m)	64,1	131,3	173,1	209,4	144,5
MIN	35,4	92,4	173,1	177,9	35,4
MAX	103,7	175,4	173,1	240,8	240,8

Tabla 27. Características medias de los pelotones observados

En la tabla anterior observamos que la distancia entre vehículos no depende del número de vehículos que constituyen el pelotón, ya que la distancia media del conjunto de pelotones se aproxima a la media individual. Por tanto, teniendo en cuenta los porcentajes que representan cada tipo de pelotón, la longitud media de pelotón con la que pueden encontrarse en una autovía será de 90 metros.

Por otra parte, se han contabilizado las distancias marcadas en función de rangos de proximidad:

	DISTANCIAS ENTRE VEHÍCULOS			
	< 20	20-40	40-60	60-80
TOTAL	15	37	18	8
%	19	48	23	10

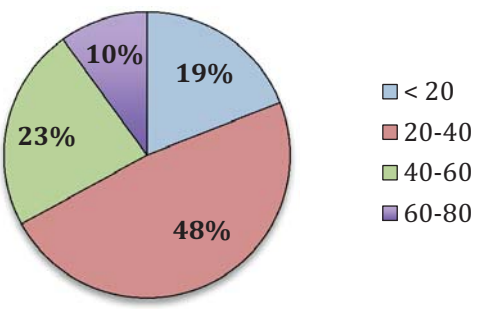


Figura 43. Distancias entre vehículos

Estos datos se han obtenido realizando un análisis fotogramétrico de las imágenes recogidas de las grabaciones, mediante el programa AUTOCAD. El método utilizado consiste en aplicar la perspectiva a la imagen mediante dos puntos de fuga. Las referencias utilizadas en la imagen son, por un lado las líneas de la propia carretera (Punto de fuga 1) y por otro lado la paralela a las líneas discontinuas (Punto de fuga 2). De esta manera podemos, por medio del abatimiento de la carretera, obtener las medidas reales de la misma. Para mayor comprensión se muestran las siguientes imágenes:

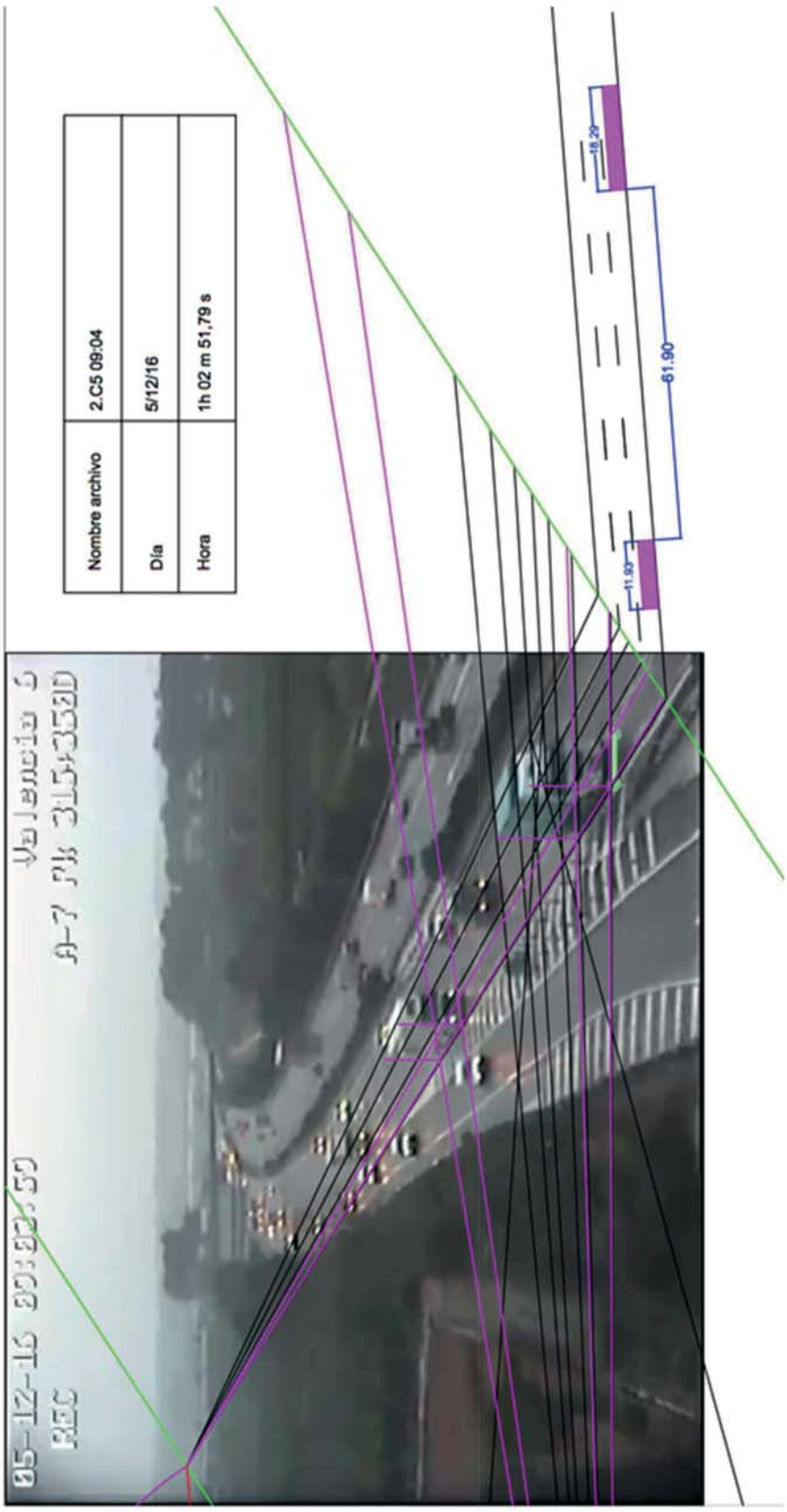


Figura 44. Cálculo distancias mediante programa AUTOCAD

Figura 45. Cálculo distancias mediante programa AUTOCAD

A la vista de los datos podemos observar cómo el 67% de los vehículos en pelotón se encuentran circulando a una distancia inferior a 40 metros, lo que supone un riesgo en la seguridad vial. Cabe mencionar además, que el valor más bajo obtenido es de 7,3 metros de distancia para un pelotón de camiones compuesto por dos vehículos pesados, uno de 18,75 metros seguido por otro de 12,00 m.

Si se muestran estos mismos datos junto con la intensidad de tráfico circulante, podemos observar la relación directa con la misma:

	VOLUMEN TRÁFICO			TIPO PELOTÓN				FORMACIÓN PELOTONES
	Total	Pesado	%	2	3	4	5	Total
8:30 - 9:30	2219	503	22,6	13	7	1	2	23
9:30 - 10:30	1797	470	26,1	24	8	0	0	32

Tabla 28. Relación del volumen de tráfico con la formación de pelotones

A medida que el tráfico pesado aumenta, la formación de pelotones aumenta. Además, los pelotones de más de 3 vehículos se producen cuando la intensidad de tráfico es elevada, ya que ésta impide el adelantamiento entre camiones.

4.4.2. INCORPORACIONES Y SALIDAS

Otro aspecto de estudio importante es el constituido por las diferentes maniobras realizadas por los vehículos en los accesos y salidas de la vía principal en presencia de pelotones de camiones en condiciones ideales de circulación. Para ello, se han visualizado las horas de luz de la cámara C6 de dos días laborables, que se han considerado representativas.

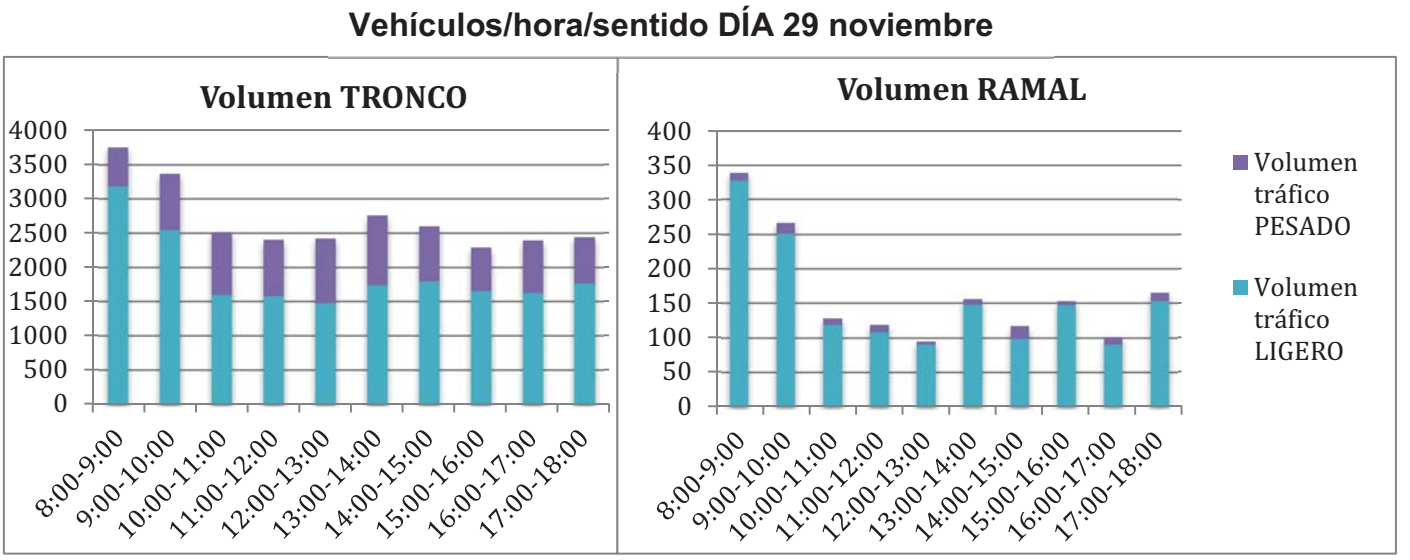
A. Incorporaciones.

Cuando un vehículo pretende incorporarse a la vía y se encuentra con un pelotón de camiones ocurren estas tres situaciones:

- El vehículo que se incorpora a la vía adapta su velocidad dependiendo de si puede alcanzar al pelotón de camiones o si debe esperar para cederles el paso.
- Algún vehículo del pelotón cambia su posición al carril central para permitir la incorporación de los vehículos que acceden.
- El vehículo se introduce entre el pelotón de camiones, a pesar de la escasa distancia que mantienen entre sí.

Por tanto, durante la visualización se distinguirá en cuatro maniobras bien diferenciadas: (a) incorporación adelantando al pelotón, (b) incorporación frenando para dejar pasar al pelotón, (c) incorporación entre vehículos del pelotón y (d) cambio de carril de uno de los vehículos que formaban el pelotón.

Cabe destacar que la intensidad de tráfico en la vía principal es, al igual que la presencia de vehículos pesados, un factor muy influyente en el desarrollo de las incorporaciones y salidas a/de la misma. Por esta razón, primero se debe caracterizar el tramo de estudio, mostrando las intensidades horarias tanto de la vía principal como del ramal. La sección C6 tiene una IMD (intensidad media diaria) de 96.604 v/día [Datos estación de aforo 2015]. A través de la cámara se observa el acceso de los vehículos procedentes de la carretera CV-310 con la A-7 en dirección Barcelona, en el cual los volúmenes de tráfico para las horas de luz de los días 29 de noviembre y 9 de diciembre son:



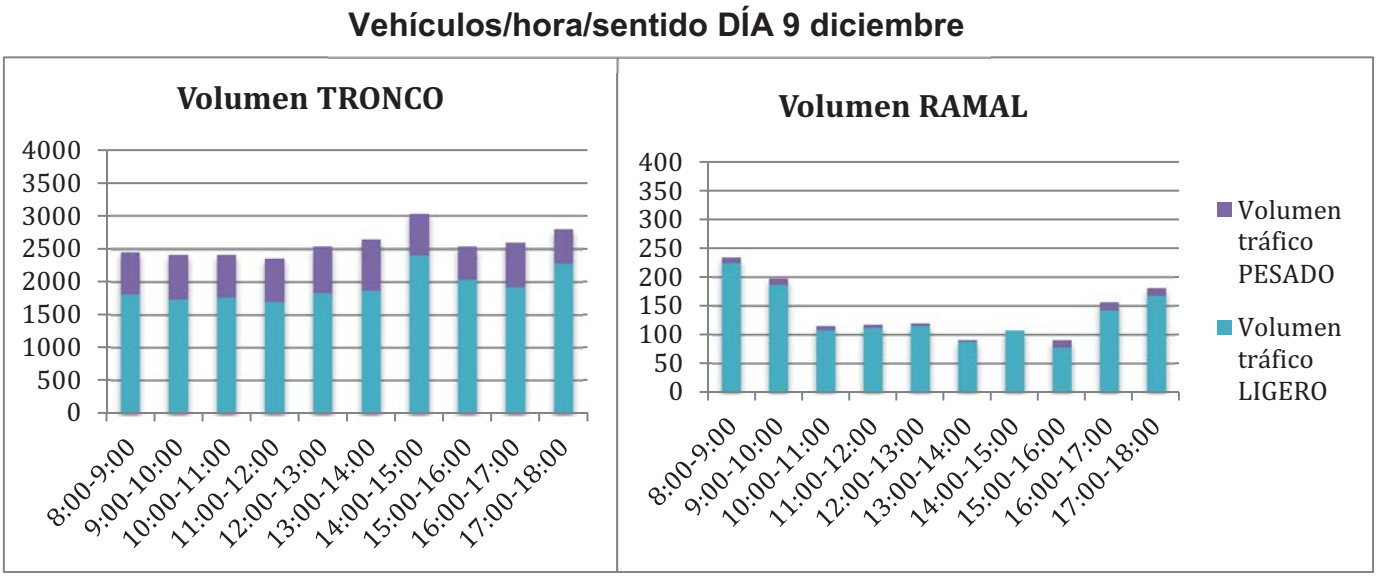


Figura 46. Intensidad de tráfico en tronco y ramal. Sección C6 (vehículos/hora/sentido)

Se toman solo las horas de luz por dos motivos: por un lado, debido a la imposibilidad de caracterizar el tráfico correctamente, y, por otra parte, porque en condiciones nocturnas los conductores modifican sus velocidades y maniobras de circulación. Estos valores nos dan, para el día 29 de noviembre, una IMH máxima en el tronco de 3.666 vh/hora/sentido a primera hora de la mañana (8:00 a 9:00), coincidiendo con la hora de máxima intensidad en el ramal, con 338 vehículos accediendo. Para el día 9 de diciembre se tiene una IMH (Intensidad Media Horaria) máxima de 3030 vehículos/hora

entre las 14:00 y 15:00 horas del mediodía y una IMH máxima en el ramal de 234 vehículos/hora a primera hora de la mañana. Los datos de intensidades horarias se muestran en la siguiente tabla:

	VOLUMEN TRÁFICO DÍA 29 NOVIEMBRE					
	TRONCO			RAMAL		
	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	% Tráfico Pesado	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	% Tráfico Pesado
8:00-9:00	3666	570	15,5	338	11	3,3
9:00-10:00	3366	822	24,4	266	15	5,6
10:00-11:00	2520	918	36,4	128	9	7,0
11:00-12:00	2406	822	34,2	119	12	10,1
12:00-13:00	2418	942	39,0	95	5	5,3
13:00-14:00	2754	1014	36,8	156	9	5,8
14:00-15:00	2604	804	30,9	117	18	15,4
15:00-16:00	2286	630	27,6	153	6	3,9
16:00-17:00	2394	768	32,1	102	12	11,8
17:00-18:00	2442	666	27,3	165	12	7,3
MÁXIMO	**3666**	**1014**	**39,0**	**338**	**18**	**15,4**
MEDIA	**2686**	**796**	**30,4**	**164**	**11**	**7,5**

	VOLUMEN TRÁFICO DÍA 9 DICIEMBRE					
	TRONCO			RAMAL		
	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	% Tráfico Pesado	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	% Tráfico Pesado
8:00-9:00	2454	648	26,4	234	10	4,3
9:00-10:00	2412	678	28,1	197	11	5,6
10:00-11:00	2412	654	27,1	116	8	6,9
11:00-12:00	2352	660	28,1	118	6	5,1
12:00-13:00	2532	708	28,0	120	5	4,2
13:00-14:00	2646	780	29,5	90	3	3,3
14:00-15:00	3030	624	20,6	108	0	0,0
15:00-16:00	2538	504	19,9	90	12	13,3
16:00-17:00	2598	678	26,1	156	14	9,0
17:00-18:00	2808	528	18,8	180	12	6,7
MÁXIMO	**3030**	**780**	**29,5**	**234**	**14**	**13,3**
MEDIA	**2578**	**646**	**25,2**	**141**	**8**	**5,8**

Tabla 29. Intensidad de tráfico horario en sección C6 (vehículos/hora/sentido)

Estos valores nos indican que la carretera de estudio tiene un elevado porcentaje de tráfico pesado, mientras que en el ramal las proporciones son inferiores, de entorno a un 7% de tráfico pesado.

Teniendo en cuenta que nos interesa conocer las interferencias producidas en las convergencias de tráfico, vamos a tomar las 5 primeras horas, esto es, desde las 8:00 hasta las 13:00 horas, puesto que el tráfico en el tronco se considera prácticamente homogéneo mientras que en el ramal se producen mayor número de accesos al principio de la mañana.

En la siguiente tabla se dividen las maniobras observadas en las grabaciones, nombrándolas como:

1. Incorporación adelantando al pelotón
2. Incorporación tras dejar pasar al pelotón
3. Incorporación entre vehículos del pelotón
4. Cambio de carril de un vehículo del pelotón

	DÍA 29 DE NOVIEMBRE						
	VOLUMEN TRÁFICO RAMAL	TIPO INCORPORACIÓN		TIPO MANIOBRA			
		Incorporación libre	Incorporación condicionada	1	2	3	4
8:00 a 9:00	338	306	32	4	4	14	10
9:00 a 10:00	266	228	38	3	11	11	13
10:00 a 11:00	128	115	13	0	4	5	4
11:00 a 12:00	119	98	21	4	4	6	7
12:00 a 13:00	95	84	11	2	2	4	3
TOTAL	946	831	115	13	25	40	37
%		87,8	12,2	11,3	21,7	34,8	32,2

	DÍA 9 DE DICIEMBRE						
	VOLUMEN TRÁFICO RAMAL	TIPO INCORPORACIÓN		TIPO MANIOBRA			
		Incorporación libre	Incorporación condicionada	1	2	3	4
8:00 a 9:00	234	206	28	1	3	16	8
9:00 a 10:00	197	169	28	2	6	13	7
10:00 a 11:00	116	94	22	1	3	12	6
11:00 a 12:00	118	104	14	1	4	6	3
12:00 a 13:00	120	98	22	1	3	12	6
TOTAL	785	671	114	6	19	59	30
%		85,5	14,5	5 %	17 %	52 %	26 %

Tabla 30. Tipo de accesos a la vía

Los patrones de comportamiento se reproducen a lo largo de las horas de visualización. Entre ellos destaca la incorporación entre los vehículos pesados que conforman el pelotón de camiones, seguida por el cambio al carril central del vehículo pesado para permitir el acceso. Se puede observar de manera más clara en la siguiente gráfica:

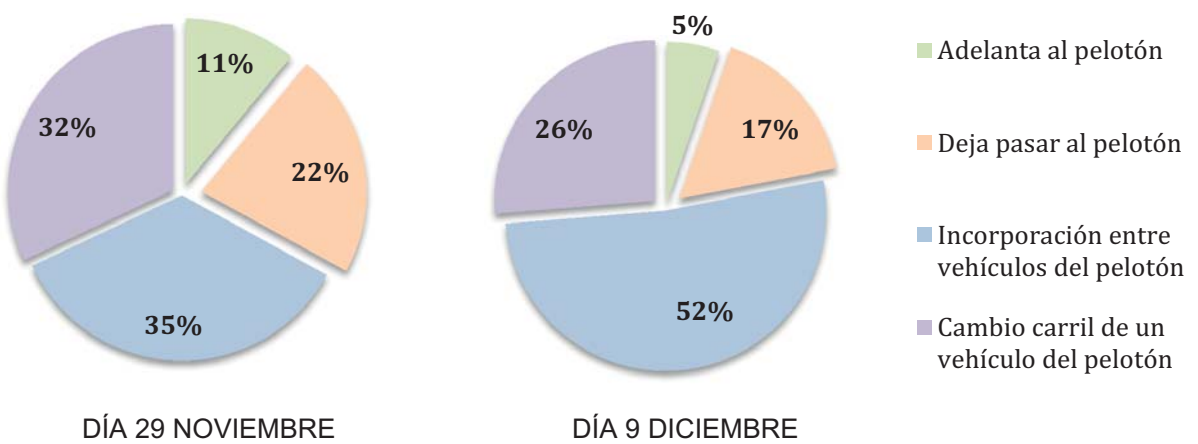


Figura 47. Tipos de incorporaciones en %

Según estos resultados, suponiendo que los pelotones formados fuesen enlazados, **en la mayor parte de los casos la incorporación de un vehículo a la vía conlleva la fractura del pelotón de camiones** (unas veces por incorporarse el vehículo entre los que forman el pelotón y otras al producirse un cambio de carril de un vehículo del pelotón). Este dato nos indica la importancia de incidir en los patrones de comportamiento en las zonas de convergencia de tráfico en el caso de poner en práctica la circulación de pelotones de camiones.

Por otro lado, se observa como el día de mayor intensidad de tráfico (29 noviembre), los pelotones de camiones formados eran de mayor número de vehículos pesados, manteniendo una distancia entre ellos inferior. Esto provoca un mayor número de maniobras de tipo 1 y 2.

En las siguientes tablas se muestran los accesos condicionados contrastados con las intensidades de tráfico en ambas zonas y el porcentaje de vehículos pesados:

	DÍA 29 NOVIEMBRE							
	TRONCO			RAMAL			INCORPORACIÓN	
	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	%	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	%	Condicionada TOTAL	Condicionada PESADO
8:00-9:00	3666	570	15,5	338	11	3,3	32	2
9:00-10:00	3366	822	24,4	266	15	5,6	38	1
10:00-11:00	2520	918	36,4	128	9	7,0	13	0
11:00-12:00	2406	822	34,2	119	12	10,1	21	2
12:00-13:00	2418	942	39,0	95	5	5,3	11	0

	DÍA 9 DICIEMBRE							
	TRONCO			RAMAL			INCORPORACIÓN	
	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	%	Volumen tráfico TOTAL	Volumen tráfico PESADO	%	Condicionada TOTAL	Condicionada PESADO
8:00-9:00	2454	648	26,4	234	10	4,3	28	3
9:00-10:00	2412	678	28,1	197	11	5,6	30	1
10:00-11:00	2412	654	27,1	116	8	6,9	21	3
11:00-12:00	2352	660	28,1	118	6	5,1	14	0
12:00-13:00	2532	708	28,0	120	5	4,2	22	4

Tabla 31. Relación del volumen de tráfico con los accesos condicionados

De la tabla anterior se puede observar que durante las dos primeras horas, momento de mayor volumen de tráfico en el acceso, es cuando se produce el mayor número de incorporaciones condicionadas. Durante las siguientes tres horas, el tráfico en el ramal se homogeneiza, lo que demuestra la relación existente entre el volumen de tráfico presente en el tronco de la vía y las incorporaciones condicionadas.

A continuación se muestra una serie de imágenes donde se pueden distinguir las maniobras anteriormente descritas. Corresponden a un acceso paralelo situado tras una amplia recta, tal y como indica la siguiente imagen:

Figura 48. Acceso de estudio. P.K. 321 de la A-7

Figura 49. Incorporación adelantando al pelotón. Maniobra tipo (a)

En la figura 49 se observa la secuencia de un vehículo que, al encontrarse con un pelotón de dos vehículos pesados, aumenta su velocidad, utilizando todo el carril de aceleración. Esta es la maniobra menos frecuente en la sección de estudio.

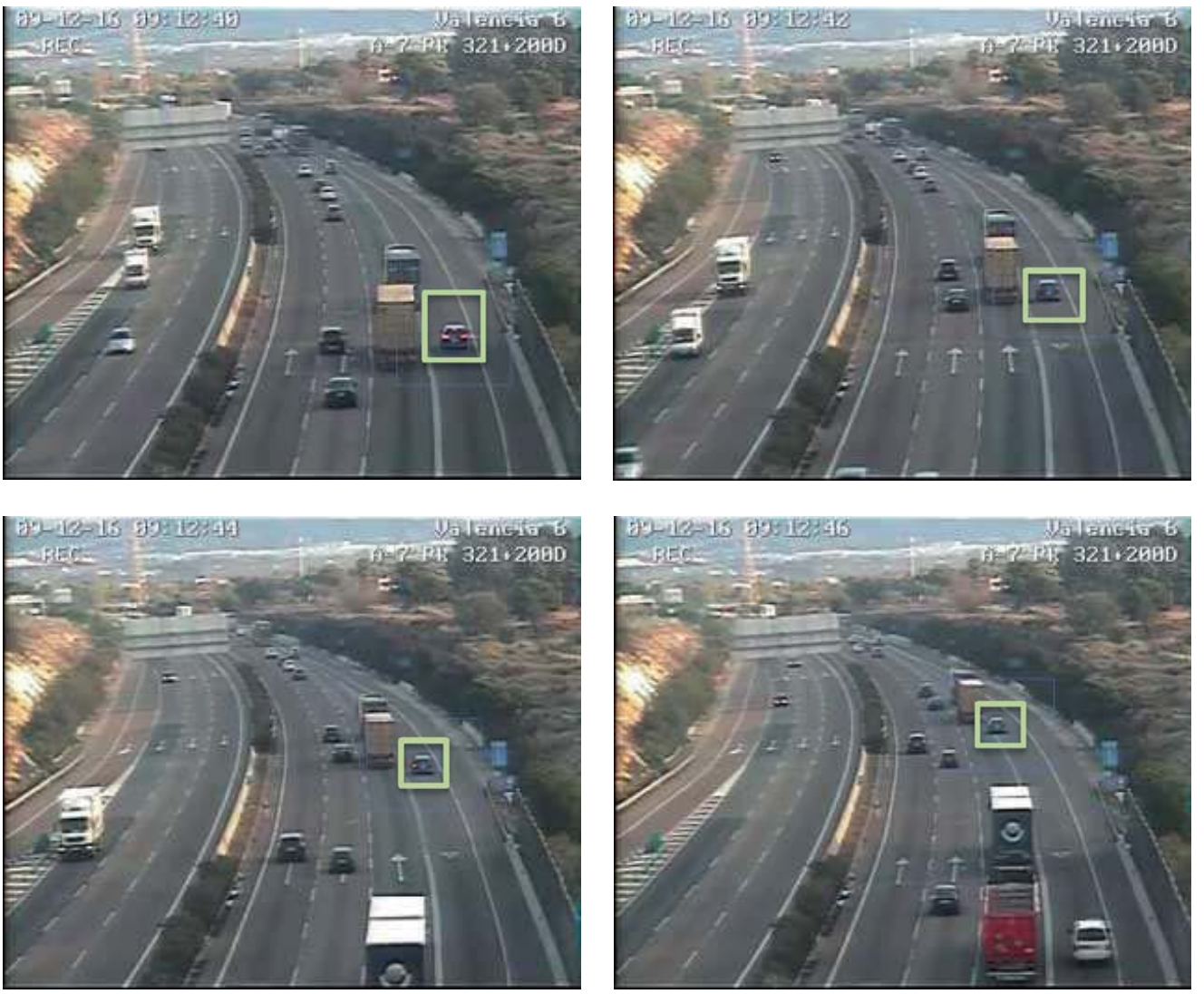


Figura 50. Incorporación dejando pasar al pelotón. Maniobra tipo (b)

En las imágenes de la figura 50 se puede ver como el vehículo que pretende incorporarse frena para dejar pasar al pelotón de camiones, utilizando prácticamente todo el carril de acceso.

Figura 51. Incorporación entre vehículos del pelotón. Maniobra tipo (c)

La figura 51 muestra la incorporación del vehículo que accede entre dos vehículos del pelotón. Para ello, utiliza todo el carril de aceleración.

Figura 52. Incorporación mediante el cambio de carril de un vehículo del pelotón. Maniobra tipo (d)

En las imágenes de la figura 52 se muestra como el vehículo pesado, al observar dos vehículos en el carril de incorporación, se cambia al carril central para permitir el acceso. En este caso, el primer vehículo se incorpora a la autovía al inicio del carril de aceleración, mientras que el segundo vehículo utiliza toda la longitud del mismo.

Para que el resto de vehículos se puedan incorporar a la vía principal en condiciones de seguridad, tal y como ha quedado reflejado en las observaciones realizadas, será necesario prolongar los carriles de cambio de velocidad, por encima de las longitudes establecidas en la Norma 3.-IC "Trazado" de la Instrucción de Carreteras, para

que estas maniobras se puedan realizar en condiciones adecuadas de seguridad. La Norma ya recoge la figura de los carriles de convergencia y divergencia, definiéndolos como aquellos carriles de cambio de velocidad que se diseñan aumentando su longitud de manera que se disponga de un nivel de servicio adecuado en la zona de convergencia y divergencia. La Norma no desarrolla este punto, por lo que será necesario estudiar la longitud necesaria de estos carriles atendiendo al tráfico de la carretera y la presencia de vehículos en pelotón.

B. Salidas.

Otro aspecto en el que influye la formación de pelotones es en las salidas de vía, impidiendo el acceso libre al carril de deceleración. En esta zona interesa diferenciar entre: (a) incorporación al carril de deceleración desde el inicio del mismo, (b) incorporación al carril de deceleración después del inicio del mismo, (c) incorporación al carril de deceleración desde el carril central.

A partir de los datos disponibles no se ha podido estudiar esta maniobra de circulación, ya que ninguna de las cámaras permitía observar más allá del inicio del carril de deceleración y por tanto, no se puede conocer el momento de incorporación al mismo.

Se estima, según comportamientos observados en la carretera, que un alto porcentaje de tráfico se incorpora al carril de deceleración en el último momento. Esto supondría un problema si el vehículo se encuentra con un pelotón de camiones durante la incorporación. Por este motivo, resulta imprescindible que el resto de usuarios estén correctamente informados de la circulación de vehículos pesados en pelotón, de manera que los conductores, sean capaces de adaptar sus maniobras entendiendo al pelotón como un único ente.

4.4.3. ADELANTAMIENTOS

La última maniobra estudiada hace referencia al adelantamiento de un vehículo pesado al pelotón de camiones, observando **el tiempo medio de adelantamiento**, el **número de adelantamientos producidos** y por tanto el tiempo que un vehículo pesado se encuentra circulando en el carril central. Nos interesa conocer estos datos ya que los adelantamientos de vehículos pesados suponen un riesgo en las carreteras. Más adelante estudiaremos su influencia en la seguridad vial.

La sección de estudio es la observada a través de la cámara C5, es decir, la misma que se ha utilizado para la formación de pelotones, cuyas intensidades de tráfico horarias para el día 5 de diciembre son:

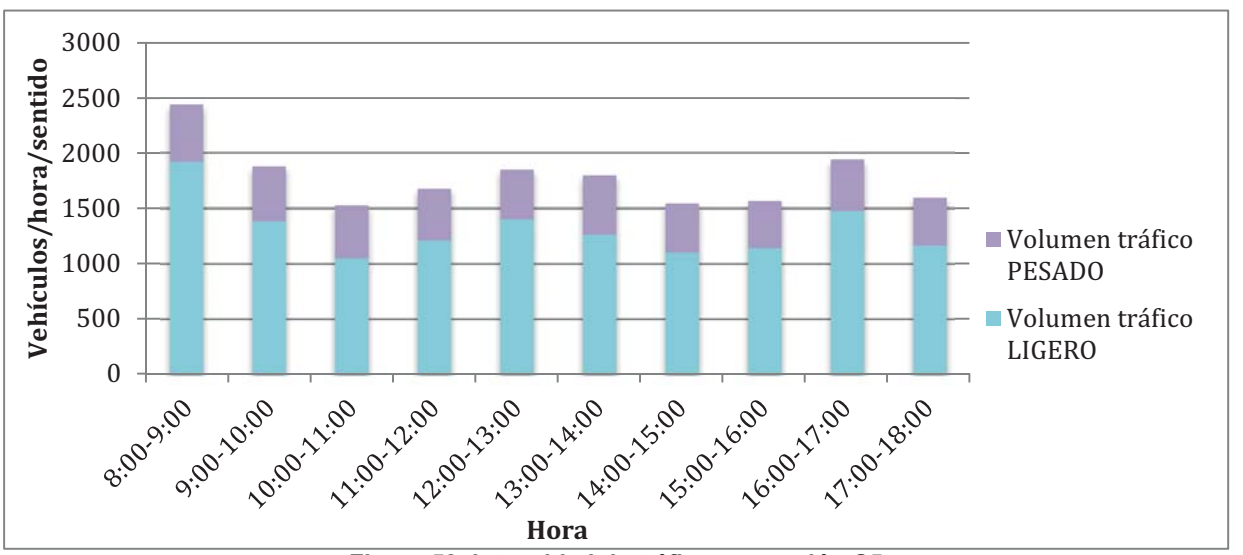


Figura 53. Intensidad de tráfico en sección C5

Se ha tomado esta cámara debido a que es la única que permite observar la longitud total de los vehículos y por tanto, que permite el análisis de la imagen con cierta precisión.

Se parte de la hipótesis de que todo vehículo pesado que se observa circulando en el carril central es debido a que está realizando un adelantamiento. Por ello, se han contabilizado los vehículos presentes en el carril central y se han estudiado aquellos que se encontraban adelantando a un pelotón de camiones.

	VOLUMEN TRÁFICO C5			ADELANTAMIENTOS	
	TOTAL	LIGERO	PESADO	Veh. Pesados en carril central	%
8:00-9:00	2440	1922	518	87	16,8
9:00-10:00	1884	1385	499	90	18,0
10:00-11:00	1526	1053	473	59	12,5
11:00-12:00	1683	1213	470	71	15,1
12:00-13:00	1853	1399	454	74	16,3
13:00-14:00	1799	1267	532	94	17,7
14:00-15:00	1544	1098	446	68	15,2
15:00-16:00	1564	1142	422	56	13,3
16:00-17:00	1942	1480	462	60	13,0
17:00-18:00	1597	1165	432	52	12,0
TOTAL	**17832**	**13124**	**4708**	**711**	**15,0**

Tabla 32. Vehículos pesados totales y observados en carril central

En la tabla anterior se muestra el total de vehículos pesados observados durante todo el día y el porcentaje que se encontraba circulando en el carril central. Como es lógico, a medida que aumenta el tráfico pesado, aumentan los adelantamientos. El 15% de los vehículos pesados se encuentra, como media, circulando en el carril central.

A partir de los datos disponibles no es posible observar, debido al alcance de las cámaras, si los vehículos que se encuentran en el carril central adelantan a todo el pelotón de camiones o si, por el contrario, se introducen entre los vehículos que conforman el pelotón. En la siguiente tabla se muestra el número de pelotones formados cada media hora y el número de adelantamientos de vehículos pesados producidos a pelotones:

	Nº PELOTONES	Nº ADELANTAMIENTOS	V.m CARRIL D	V.m CARRIL C	ΔV	ΔV %
8:30-9:00	14	5	88,1	93,1	5,0	5,7
9:00-9:30	13	10	90,0	92,2	2,2	2,4
9:30-10:00	16	5	90,5	96,0	5,5	6,1
10:00-10:30	12	8	88,1	96,1	8,0	9,1
TOTAL	**55**	**28**	**89,2**	**94,4**	**5,2**	**5,8**

Tabla 33. Adelantamientos a pelotones y velocidades medias

Se han estudiado las velocidades de los vehículos pesados del pelotón y las de los vehículos que pretenden adelantarlos, obteniendo una diferencia entre velocidades de entorno al 6% superior.

La velocidad media del carril derecho es de aproximadamente 89 km/h, mientras que en el carril central es de 94 km/h, lo que conlleva que los vehículos pesados requieran de un largo tiempo para adelantar, permaneciendo en el carril central más tiempo del deseado.

Se debe tener en cuenta que las velocidades calculadas son velocidades medias y por tanto, no tiene que ser la velocidad a la que circule el vehículo pesado durante todo el adelantamiento. Para mayor exactitud en la obtención de velocidades medias de vehículos, sería conveniente colocar detectores en la sección de estudio.

4.5. INFLUENCIA DE LOS VEHÍCULOS PESADOS GUIADOS EN LA CIRCULACIÓN DE LA AUTOVÍA DE ESTUDIO

Una vez caracterizado el tráfico en la autovía A-7, se pretende pronosticar la influencia de un alto sistema tecnológico incorporado en vehículos pesados en la capacidad y nivel de servicio de la carretera de estudio.

Como se han obtenido las intensidades horarias (vehículos/hora/sentido) para cada una de las secciones estudiadas en el apartado anterior, se puede analizar la capacidad y nivel de servicio actual y por tanto, la variación que produciría la circulación de vehículos pesados guiados en las mismas.

Cuando se analizó desde el punto de vista teórico la influencia de los vehículos guiados en la capacidad de la vía, se concluyó que ésta aumenta, ya que los vehículos en pelotón circulan mucho más próximos entre sí, liberando espacio que puede ser ocupado por más vehículos. Además, como la velocidad media de la vía depende de la intensidad de tráfico circulante, al reducirse la intensidad de tráfico equivalente para el mismo número

de vehículos pesados circulando en calzada, se mejorará la velocidad media de circulación.

En primer lugar se va a comprobar la capacidad máxima de la vía en las secciones C5 y C6 anteriormente estudiadas y el nivel de servicio actual. Para ello, es necesario conocer la intensidad de servicio.

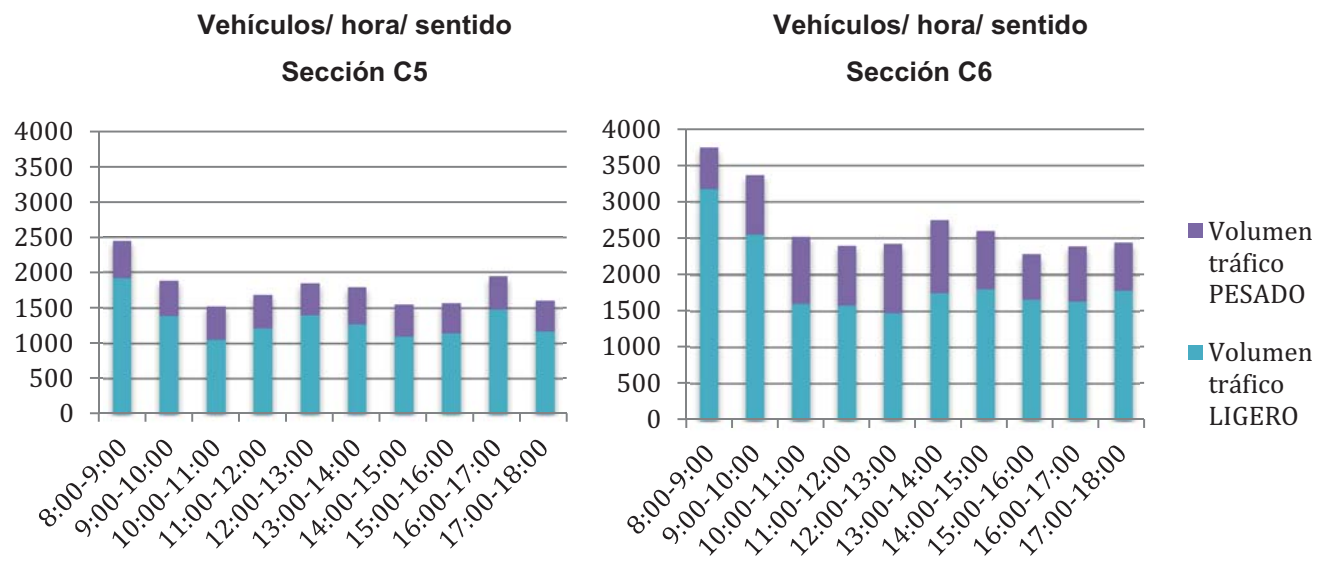


Figura 54. Intensidades de tráfico en las secciones de estudio

Por tanto, para la sección C5, tenemos una intensidad horaria máxima de 2.440 vehículos/hora con 21% de tráfico pesado (día 5 de diciembre), mientras que en la sección C6, la intensidad máxima aumenta a los 3.666 vehículos/hora con un 16% de tráfico pesado (día 29 de noviembre). La separación entre estas dos secciones es de 6 kilómetros y una velocidad máxima permitida para ambas de 120 km/h. El FHP es de 0,93 en las dos zonas. Se va a calcular la capacidad y nivel de servicio para la intensidad máxima obtenida, con el fin de estudiar la situación más desfavorable.

Teniendo en cuenta las caracteristicas de la vía, se tiene una velocidad en flujo libre de:

$$FFS = 75.4 - f_{LW} - f_{LC} - 3.22\,TRD^{0.84}$$

donde,

FFS: Velocidad de flujo libre (mi/h)

f_{LW}: Factor de corrección por anchura de carril (mi/h)

f_{LC}: Factor de corrección por obstáculos laterales (mi/h)

TRD: Existencia de accesos o salidas de vía por milla (accesos/mi)

Ancho de carril (pies)	Factor de corrección (mi/h)
≥12	0.0
≥11–12	1.9
≥10–11	6.6

Figura 55. Valores para el factor de corrección por anchura de carril (mi/h)

Obstáculo lateral (pies)	Carriles en la misma dirección			
	2	3	4	≥5
≥6	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.6	0.4	0.2	0.1
4	1.2	0.8	0.4	0.2
3	1.8	1.2	0.6	0.3
2	2.4	1.6	0.8	0.4
1	3.0	2.0	1.0	0.5
0	3.6	2.4	1.2	0.6

- Anchura de carril de 3,5 metros → 11,48 pies
- Arcenes exteriores de 2,0 metros → 6,56 pies
- Un total de 15 enlaces en los 30 kilómetros analizados → 0,79 accesos/mi

$$FFS = 75.4 - 1.9 - 0 - 3.22 * 0.79^{0.84} = 70{,}85\ mi/h$$

Esta velocidad equivale en kilómetros/hora a 114 km/h.

La intensidad de tráfico equivalente será:

$$I_{eq} = \frac{I}{FHP * n * f_{HV} * f_P}$$

donde,

I_{eq}:Intensidad de tráfico equivalente (V_{eq}/h)

I: Intensidad de tráfico real (veh/h)

FHP: Factor de hora punta. Para nuestro caso, atendiendo al tráfico visualizado en las cámaras durante la hora de más tráfico. se ha tomado:

$$FHP\ (C5) = \frac{I_{60}}{4 * I_{15}} = \frac{2440}{4 * 621} = 0{,}98$$

$$FHP\ (C6) = \frac{I_{60}}{4 * I_{15}} = \frac{3666}{4 * 1020} = 0{,}9$$

n: nº de carriles

f_{HV}: factor de vehículos pesados.

$$f_{HV}(C5) = \frac{1}{1 + 0{,}21(1{,}5 - 1)} = 0{,}905$$

$$f_{HV}(C6) = \frac{1}{1 + 0{,}16(1{,}5 - 1)} = 0{,}926$$

f_P: Factor de conductores habituales. Este parámetro tiene en cuenta la conducción de usuarios no familiarizados con la carretera. En general se adopta el valor de 1.

Sección	Nº carriles	FHP	f_{HV}	P_T Pesados	f_P	Intensidad máxima real Veh/hora/sentido	Intensidad máxima equiv. Veh.eq/hora/carril
C5-P.K. 315+350	3	0,98	0,905	21%	1	2.440	917
C6-P.K. 321+200		0,9	0,926	16%		3.666	1.466

Tabla 34. Intensidad de tráfico equivalente para secciones C5 y C6

Teniendo en cuenta los criterios establecidos en el HCM 2010, para la obtención de los factores de equivalencia, utilizados en el cálculo de f_{HV}, se ha considerado que no hay ninguna rampa o pendiente con una longitud o inclinación que suponga un impacto significativo en las condiciones de operación del tramo.

Según el HCM 2010, el nivel de servicio para cada uno de los tramos será:

	FFS		Intensidad máxima equivalente	$D_{equiv.}$		NS
Sección	mi/h	Km/h	Veh.eq/hora	Pc/mi/ln	Vh/km/h	
C5-P.K. 315+350	70,85	114	917	13,0	8,0	B
C6-P.K. 321+200			1.466	21,3	13,2	C

Tabla 35. Nivel de servicio para secciones C5 y C6

Se debe tener en cuenta que el nivel de servicio aquí obtenido es el asociado a la intensidad horaria más alta de un día determinado. Se ha considerado una intensidad representativa del funcionamiento ordinario de esta autovía. Además, el objeto de este análisis es evidenciar como la incorporación de vehículos pesados guiados mejora el nivel de servicio de la carretera.

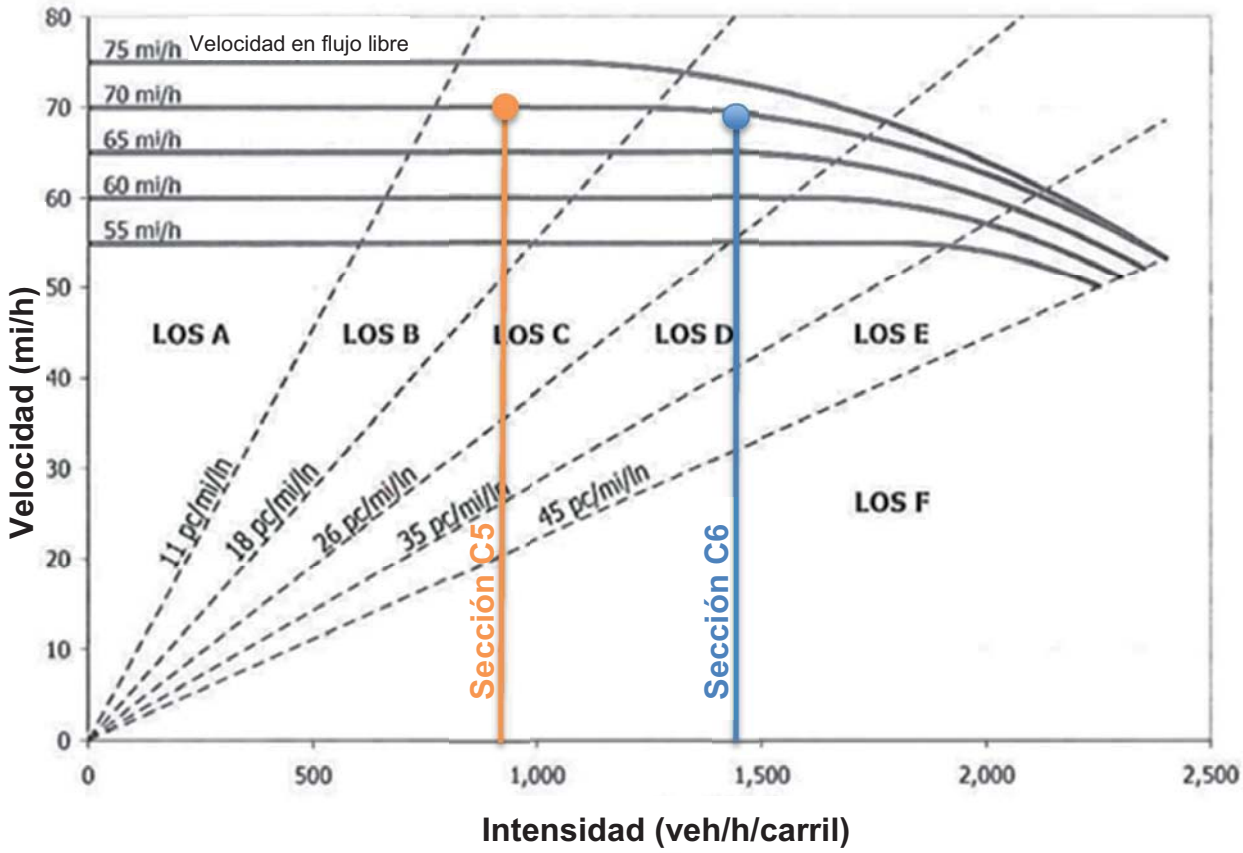


Figura 57. Nivel de servicio según gráfica Velocidad-Intensidad de tráfico HCM 2010

Se ha utilizado la curva densidad-velocidad correspondiente a 70 mi/h que prescribe el HCM cuando se cumple que 67,5 ≤ 70,85 (FFS) ≤ 72,5.

Como se observa en la gráfica anterior, en la sección C5 se tiene un nivel de servicio durante la hora de máximo tráfico B con una velocidad de operación igual a la de flujo libre (FFS). Sin embargo, en la sección C6 se tiene un nivel de servicio C con una reducción de la velocidad. Esta velocidad de operación, se obtiene a partir de la siguiente tabla (Exhibit 11-3 HCM 2010):

FFS (mi/h)	Rango Intensidad de Tráfico		
	Límite	≥ 0 ≤ Límite	> Límite ≤ Capacidad
75	1,000	75	$75 - 0.00001107\ (v_p - 1{,}000)^2$
70	1,200	70	$70 - 0.00001160\ (v_p - 1{,}200)^2$
65	1,400	65	$65 - 0.00001418\ (v_p - 1{,}400)^2$
60	1,600	60	$60 - 0.00001816\ (v_p - 1{,}600)^2$
55	1,800	55	$55 - 0.00002469\ (v_p - 1{,}800)^2$

Figura 58. Intensidad de tráfico limite a partir de la cual la velocidad libre se ve modificada

$$V_{LO}(C6) = 70 - 0.00001160\left(v_p - 1200\right)^2 = 70 - 0.00001160\,(1466 - 1200)^2 = 69{,}2\ mi/h$$

Es decir, en la sección C6 tenemos una velocidad de operación para la hora de mayor tráfico de 111,3 km/h.

La sección de nivel de servicio B, refleja unas condiciones buenas dentro del régimen de circulación libre. La velocidad de los vehículos, especialmente la de los más rápidos, puede verse influida por otros vehículos más lentos durante intervalos de tiempo cortos, pero no llegan a formarse colas por la facilidad en realizar maniobras de adelantamiento. Este nivel de servicio corresponde a una **condiciones de circulación estable.**

Pero, el nivel de servicio C indica una conducción con velocidades próximas a la velocidad de flujo libre. La libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico está más condicionada y los cambios de carril requieren más atención y vigilancia por parte del conductor. Este nivel de servicio corresponde a unas **condiciones de circulación ligeramente restringidas.**

En el caso de incorporar sistemas automatizados a los vehículos pesados que circulan por la vía, utilizando la formulación del punto 3.2.1., la intensidad de tráfico equivalente descendería y por tanto, mejoraría el nivel de servicio de la vía:

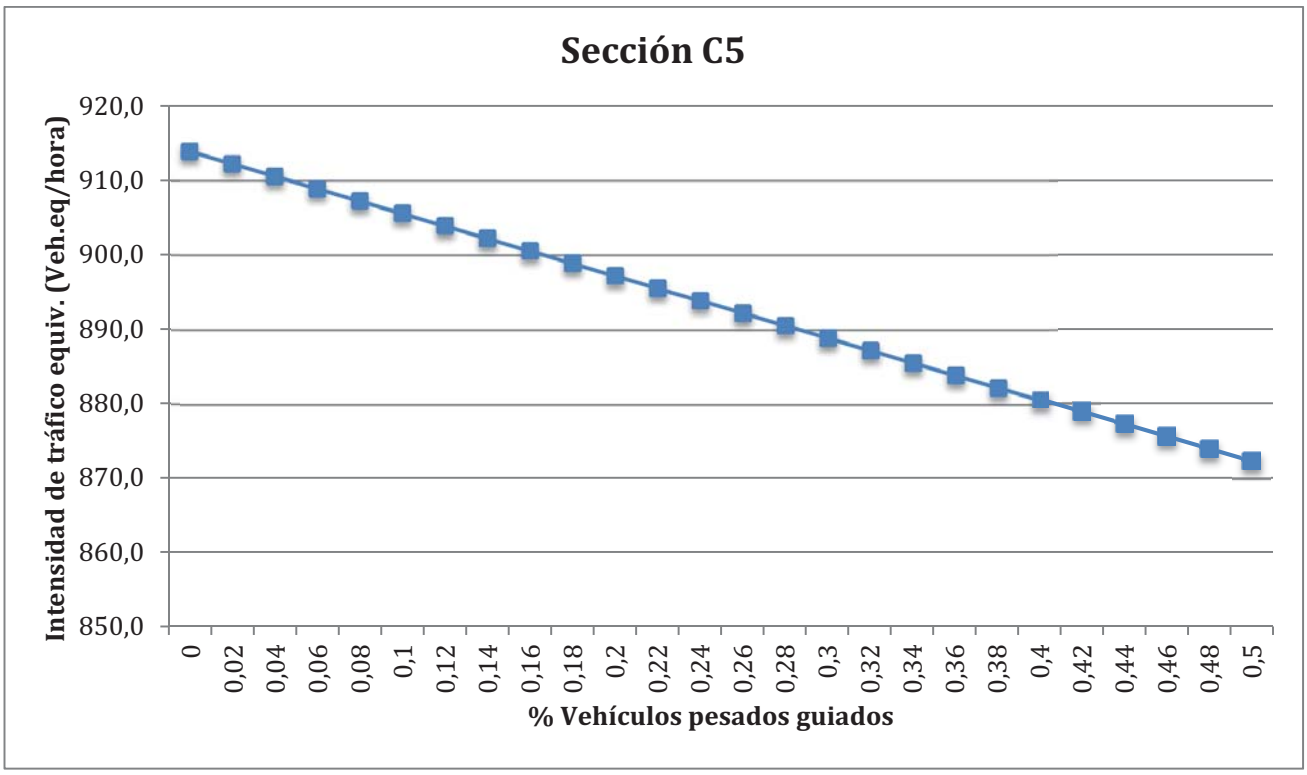


Figura 59. Variación intensidad de tráfico equivalente en sección C5 según % vehículos guiados

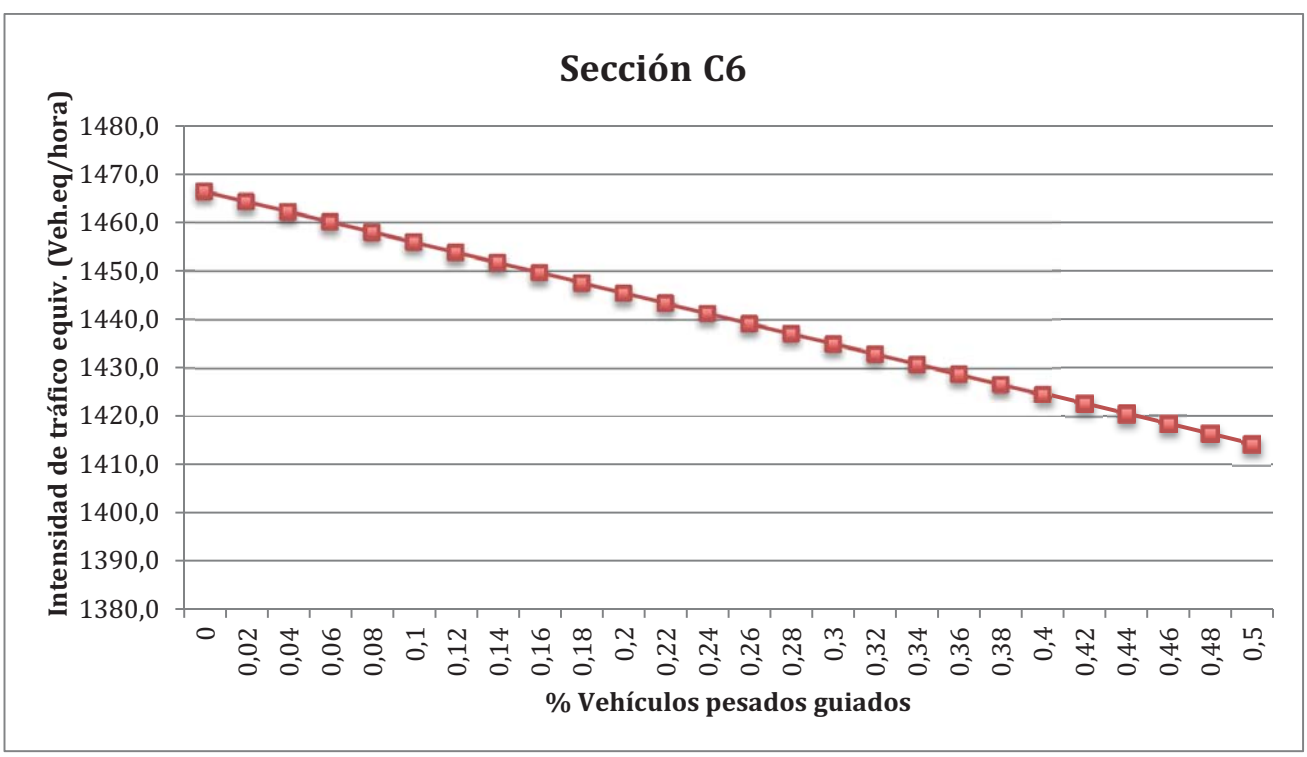


Figura 60. Variación intensidad de tráfico equivalente en sección C6 según % vehículos guiados

Con esta variación en la intensidad de tráfico equivalente, la densidad de tráfico , la velocidad libre de operación y el nivel de servicio quedarían de la siguiente forma:

		Sección C5			Sección C6		
		Densidad D	Velocidad V_{LO}	NS	Densidad D	Velocidad V_{LO}	NS
% vehículos pesados guiados	0	8,0	114,0	B	13,2	110,8	C
	20	7,9	114,0	B	13,0	111,1	C
	30	7,8	114,0	B	12,9	111,2	C
	50	7,7	114,0	B	12,7	111,5	C

Tabla 36. Densidad de tráfico para distintos % de vehículos pesados guiados

Llegamos a la conclusión de que en este caso particular la incorporación de vehículos pesados guiados no ha permitido cambiar el nivel de servicio, pero analizando los valores de densidad y velocidad, podemos indicar que se conseguirían unas mejores condiciones de circulación y unas velocidades de operación más altas.

4.6. ANÁLISIS ACCIDENTABILIDAD EN AUTOVÍA A-7

El objeto principal de este estudio es conocer la influencia de los vehículos pesados en la seguridad vial y la importancia que tendría la incorporación de sistemas de asistencia al conductor en los mismos. Para ello, interesa analizar el número de accidentes en los que se ha visto involucrado un vehículo pesado, así como la tipología de accidente ocasionado.

4.6.1. LOS VEHÍCULOS PESADOS Y LA ACCIDENTABILIDAD

Se han estudiado, los distintos partes de accidentes registrados por la DGT en la autovía A-7. El tramo estudiado va desde el P.K. 307+000 hasta el 355+200, es decir, desde el cruce de la A-7 con la V-21 y V-23 a la altura de Puzol hasta el encuentro de la A-7 con la V-31 a la altura de Silla-Picasent, lo que conforma un total de 48 kilómetros de carretera. Para la realización de este análisis se ha tomado un periodo de observación de un año, desde el 31 de octubre de 2015 hasta el 31 de octubre de 2016 (último registro actualizado).

Los datos obtenidos nos muestran un total de 242 accidentes en todo un año, de los cuales 111 han sido producidos o involucran la presencia de vehículos pesados. A primera vista llama la atención el gran número de accidentes con vehículos pesados (46% del total), teniendo en cuenta que su porcentaje en el tráfico es de en torno al 25% con respecto a los vehículos ligeros.

	TOTAL	Pesados implicados
Nº Accidentes	242	111
Víctimas	65	33
Muertos	3	2
Heridos leves	7	5
Heridos graves	95	41

Tabla 37. Accidentes ocasionados durante un año

En más del 60% de los accidentes de tráfico con víctimas se ha visto involucrado un vehículo pesado, lo que subraya la gravedad de los accidentes con esta clase de vehículo.

Los tipos de accidentes se recogen en la siguiente tabla:

		NÚMERO	%	% TOTAL
ALCANCE	Distancia seguridad	13	22,0	53,2
	Vehículo parado en arcén	15	25,4	
	No calcular distancia al adelantar (Angulo muerto)	23	39,0	
	Distracción	8	13,6	
RAMALES	Mal acceso, no respeta el ceda	3	60,0	4,5
	Maniobra brusca al pasarse la salida	2	40,0	
EXCESO VELOCIDAD	En salidas	2	100,0	1,80
OTROS	Reventón de neumático	25	64,1	35,1
	Pérdida de material	9	23,1	
	Pérdida de control por reventón de neumático	5	12,8	
NO INDICADO		6	100,0	5,4

Tabla 38. Tipología de accidente con implicación de vehículos pesados

De los 111 partes de accidentes, en solo 6 no estaba especificada la causa del accidente, es decir, solo un 5,4% de los accidentes, lo que permite un estudio mucho más certero.

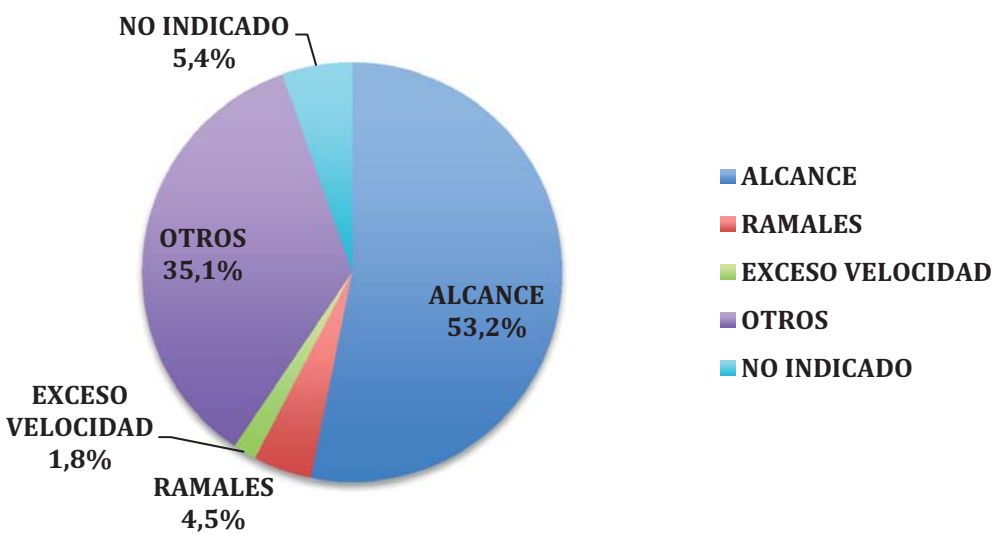


Figura 61. Representatividad tipología de accidente

Hay cuatro tipologías de accidentes por alcance. El primero de ellos, denominado distancia de seguridad, hace referencia a los accidentes que podrían haber sido evitados si se hubiese cumplido con la distancia de seguridad que exige la norma de circulación. El motivo principal que ocasiona este tipo de accidentes es una maniobra inesperada del vehículo precedente, provocando que el conductor que le sigue no disponga de tiempo suficiente para reaccionar. Otro accidente dentro de esta categoría viene provocado por la parada de un vehículo en el arcén junto con la poca visibilidad o falta de tiempo para reaccionar de otro vehículo.

Por otro lado, uno de los accidentes más característicos de los vehículos pesados es el producido por la falta de visibilidad al adelantar (situación conocida como *ángulo muerto)*. El 60% de estos accidentes se ha originado durante la maniobra de adelantamiento de un vehículo pesado a otro, a consecuencia de un mal cálculo de la distancia entre ellos. El otro 40%, también causado por un vehículo pesado, se ha producido durante el cambio de carril del camión, cuyo ángulo de visión no le permitía ver al turismo que se encontraba circulando a su derecha. Por último, encontramos una serie de accidentes cuya causa principal ha sido la distracción, lo que ha provocado el alcance de otro vehículo.

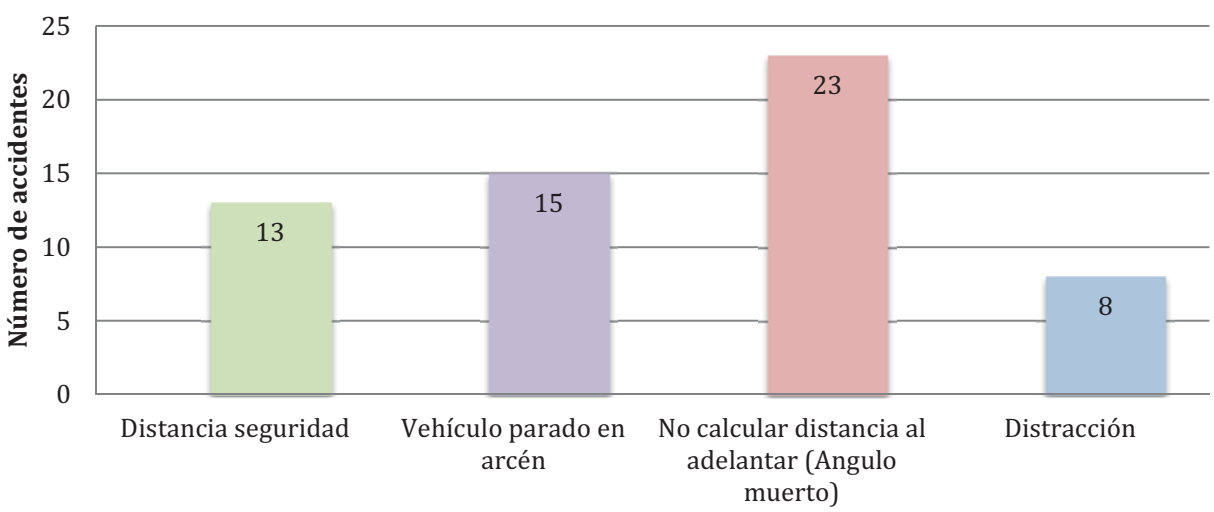


Figura 62. Tipos de accidente por alcance

En los ramales se han originado cinco accidentes, 3 de ellos debidos a un mal acceso al tronco de la vía, infringiendo la ley de circulación de tráfico que exige ceder el paso en los carriles de acceso y otros 2 accidentes producidos por una maniobra violenta del conductor, al darse cuenta de la salida de manera tardía. Todos ellos han sido provocados por turismos, involucrando a un vehículo pesado a su paso. No se incluye ningún accidente con víctimas dentro de esta categoría.

Existen dos accidentes provocados por el exceso de velocidad de los vehículos pesados en los carriles de salida, con la consiguiente salida de carril y choque contra sistema de contención de vehículos. Ambos accidentes presentan víctimas: un herido leve y otro grave, respectivamente.

En la categoría genérica "otros" se incluye los accidentes provocados por el reventón de un neumático o por la pérdida de material de vehículos pesados, lo que ha provocado daños principalmente a turismos. Además, se añaden a estos accidentes aquéllos otros en los que, por el reventón de un neumático, el vehículo pesado pierde el control.

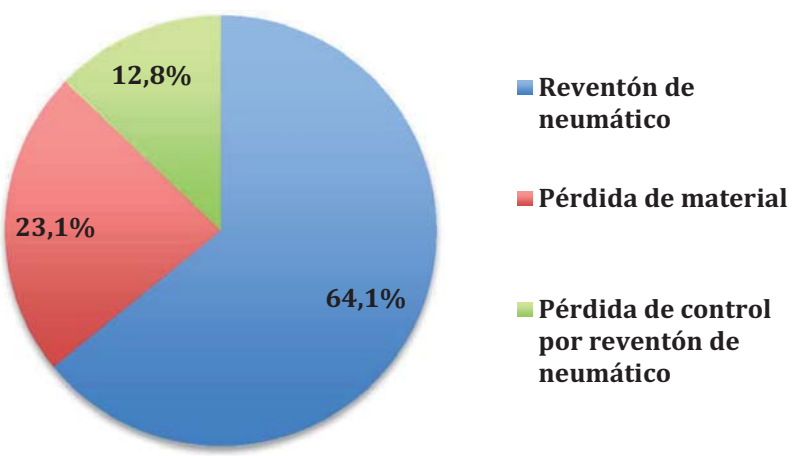


Figura 63. Otros tipos de accidentes y representatividad de los mismos

De los 111 accidentes de tráfico en los que se ha visto involucrado un vehículo pesado, el 84% ha sido provocado por un vehículo pesado. El 75% de los vehículos

pesados corresponde a vehículos articulados y el 25% a camiones sin remolque. Si clasificamos los accidente según su gravedad, obtendremos lo siguiente:

	Nº Total accidentes	Con víctimas	%	Daños materiales	%
ALCANCE	59	25	42,4	35	59,3
RAMALES	5	0	0,0	5	100,0
EXCESO VELOCIDAD	2	2	100,0	0	0,0
OTROS	39	6	15,4	32	76,9
NO INDICADO	6	-		-	
TOTAL	111	33	31,4	72	68,6

Tabla 39. Tipos de accidente según gravedad

Con estos resultados, podemos observar la implicación de los vehículos pesados en los accidentes de tráfico. Un 31% de accidentes con víctimas es un valor que resalta la gravedad de los accidentes en los que están implicados vehículos de gran tonelaje

4.6.2. LOS VEHÍCULOS PESADOS GUIADOS Y LA ACCIDENTABILIDAD

No respetar la distancia de seguridad, conducir a una velocidad inadecuada o realizar maniobras temerarias en las incorporaciones han sido algunas de las imprudencias observadas en la autovía estudiada. Se comprueba, de este modo, el peligro presente en la carretera como consecuencia de una circulación arriesgada por parte de muchos conductores, llevada a cabo por la falta de noción del riesgo que supone.

Si se adaptasen los vehículos pesados con sistemas automáticos de conducción, se modificarían los siguientes aspectos:

- Riesgo ocasionado por conducir sin mantener distancia de seguridad, reduciendo los accidentes por alcance.

- Se realiza una conducción coordinada, reduciendo la necesidad de adelantamientos y por tanto, los accidentes ocasionados tras el adelantamiento.
- Alternancia en la función de camión guía entre los vehículos que forman el pelotón, por tanto se reducen los tiempos de conducción. De esta manera se reduciría el riesgo ocasionado por el cansancio.
- Mayor responsabilidad al saber que formas parte de una única entidad y por tanto, se producen menores distracciones.

No mantener la distancia de seguridad repercute en el tiempo disponible para reaccionar ante un imprevisto, reduciendo el espacio útil para decelerar el vehículo. Por tanto, en caso de producirse un accidente, el vehículo colisionaría con una velocidad elevada.

La velocidad juega un papel crucial en la ocurrencia de un accidente de tráfico y en la gravedad de las lesiones. Además, los accidentes en los que está presente un vehículo pesado son aún más graves, y en especial para los ocupantes de los vehículos contrarios.

Teniendo en cuenta las maniobras observadas en las grabaciones y el análisis de accidentabilidad de la autovía A-7, se va a comprobar el porcentaje que podría haber sido evitado si contásemos con vehículos guiados. En la siguiente gráfica se reflejan las proporciones que representan cada uno de los tipos de accidentes con vehículos pesados implicados:

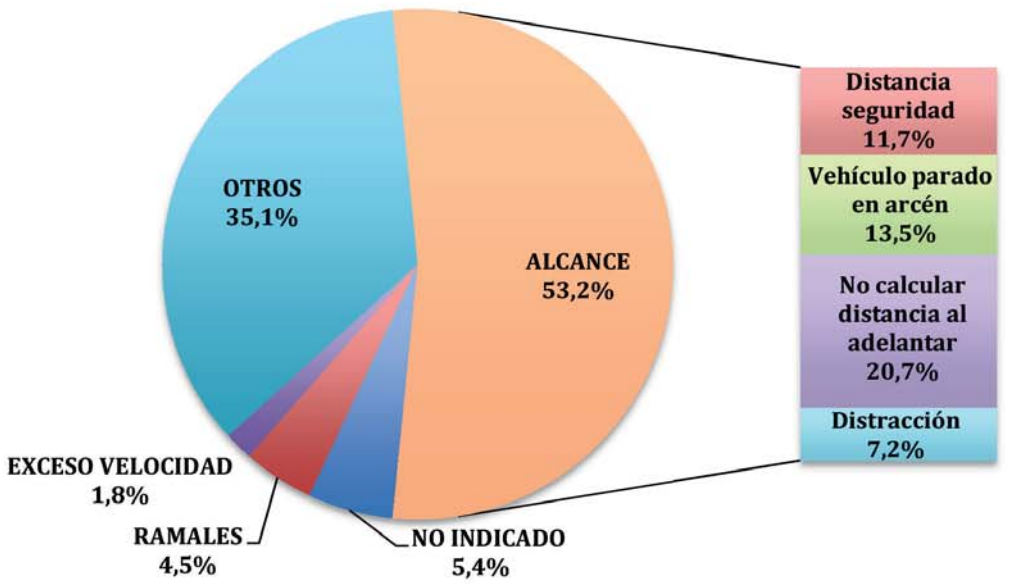


Figura 64. Representatividad de la tipología de accidente

En la siguiente tabla se va a asignar para cada tipo de accidente un valor del 0 al 1, en función del porcentaje del mismo que, al incorporar los sistemas automáticos en la conducción, podría haber sido evitado. En la tabla se especifica el motivo por el cual se ha asignado dicho factor.

Se debe tener en cuenta que, al tratarse de una conducción coordinada, se reduce el número de conductores controlando las tareas de conducción manuales.

Como la adaptación se produciría en los vehículos pesados, estos valores se aplican solo a aquellos accidentes cuyo vehículo responsable era un vehículo pesado. Tras la revisión de los partes de accidentes se ha observado que en 111 de los 242 accidentes se ha visto involucrado un vehículo pesado, de los cuales en 93 ha sido el responsable del mismo, lo que representa un total del 38,5% de los accidentes. En la siguiente tabla se refleja el porcentaje de accidentes que se evitarían al adaptar los vehículos pesados a una conducción coordinada:

		ACCIDENTES		FACTOR REDUCCIÓN		COMENTARIOS:
		Número	%	2 Vehículos	3 Vehículos	
ALCANCE	Distancia de seguridad	13	14,0	1	1	Se evitarían todos los accidentes al llevar incorporado un alto sistema de sensores
	Vehículo parado en arcén	14	15,1	0,5	0,66	Se trata de un accidente ocasionado por fallo humano, al no observar el vehículo con suficiente tiempo. Al reducir el número de conductores, reducimos el número de accidentes de esta clase. El factor se asigna en función del número de conductores que conducirían de manera automática.
	No calcular distancia al adelantar	22	23,7	1	1	Se evitarían la totalidad de estos accidentes al llevar incorporados sensores que marcan la distancia entre vehículos y al reducir el número de adelantamientos.
	Distracción	4	4,3	0,7	0,9	Esta tipología de accidentes viene ocasionada por un fallo humano. Al reducir el número de conductores, reducimos la probabilidad de un accidente de este tipo. A su vez, la responsabilidad que recae sobre el conductor guía, aumenta la atención del mismo y por tanto, contribuye a reducir la probabilidad de accidente de este tipo.
RAMALES	Mal acceso, no respeta el ceda	0	0,0	1	1	El acceso a la vía del pelotón de camiones se realiza de manera coordinada
	Maniobra brusca al pasarse la salida	0	0,0	1	1	La salida de la vía del pelotón de camiones se realiza de manera coordinada
EXCESO VELOCIDAD	En salidas	2	2,2	1	1	La velocidad es controlada por el equipamiento tecnológico
OTROS	Reventón neumático	24	25,8	0	0	Este es un suceso inesperado que no varía para los vehículos guiados
	Pérdida de material	9	9,7	0	0	No varía para los vehículos guiados
	Pérdida de control por reventón rueda	5	5,4	0	0	No varía para los vehículos guiados

Tabla 40. Factor de reducción de los accidentes con sistema platooning

		ACCIDENTES		FACTOR REDUCCIÓN		REDUCCIÓN	
		Número	%	2 Vehículos	3 Vehículos	% 2 Veh.	% 3 Veh.
ALCANCE	Distancia seguridad	13	14,0	1	1	14,0	14,0
	Vehículo parado en arcén	14	15,1	0,5	0,66	7,5	10,0
	No calcular distancia al adelantar	22	23,7	1	1	23,7	23,7
	Distracción	4	4,3	0,7	0,9	3,0	3,9
RAMALES	Mal acceso, no respeta el ceda	0	0,0	1	1	0,00	0,00
	Maniobra brusca al pasarse la salida	0	0,0	1	1	0,00	0,00
EXCESO VELOCIDAD	En salidas	2	2,2	1	1	2,2	2,2
OTROS	Reventón neumático	24	25,8	0	0	0,00	0,00
	Perdida de material	9	9,7	0	0	0,00	0,00
	Perdida control por reventón rueda	5	5,4	0	0	0,00	0,00
TOTAL		**93**	**100,0**	**-**		**50,3**	**53,6**

Tabla 41. Reducción accidentes con sistema platooning

A la vista de los datos analizados, se podría pronosticar una reducción aproximada del 50% de los accidentes producidos en la autovía A-7 ocasionados por un vehículo pesado, en el caso ideal de que todos los vehículos pesados fuesen guiados. Esta conclusión, algo simplista, requerirá de un análisis más detallado del fenómeno en el futuro. Se debe tener en cuenta que se trata de un criterio subjetivo que orienta sobre la reducción de accidentes que podría provocar la adopción de sistemas automáticos en los vehículos pesados para realizar una conducción coordinada.

Hasta ahora solo se ha hablado de una influencia positiva de los vehículos guiados en la seguridad vial, pero esto no es del todo cierto. Tal y como se ha observado a través del estudio práctico, las maniobras realizadas por el resto de vehículos cuando se encuentran un pelotón de camiones pueden suponer un riesgo. Para garantizar que la circulación de vehículos pesados no influya de manera negativa en la seguridad, se deberá informar adecuadamente al resto de usuarios de su existencia, modificar las recomendaciones y exigencias de circulación establecidas y adaptar las infraestructuras a estas nuevas condiciones de circulación.

5. CONCLUSIONES

A la vista de los estudios realizados, tanto desde el punto de vista teórico como observacional, la incorporación de vehículos pesados guiados en la red de carreteras influirá de forma clara en el comportamiento del tráfico en las vías de alta capacidad. Por lo tanto, será necesario **actuar sobre las infraestructuras** existentes y sobre el diseño de los nuevos viales, de tal forma que los efectos sobre el resto de usuarios de las carreteras se minimicen.

Se ha puesto de manifiesto que los carriles de cambio de velocidad, tanto de aceleración como deceleración, son puntos críticos donde la interacción del convoy de vehículos pesados con el resto de vehículos requerirá prolongar estos carriles. Por una parte, hay que indicar que la posibilidad de que los vehículos pesados guiados se puedan "desenganchar" a su paso por los enlaces de las carreteras facilitaría las maniobras en estas zonas conflictivas, al comportarse como el resto de vehículos que circulan por la red de carreteras.

En zonas con una alta densidad de enlaces, como las áreas metropolitanas, será necesario diseñar vías colectoras-distribuidoras, que permitan independizar del tronco principal los tramos de conflicto que se originan entre conexiones consecutivas próximas de ramales de enlace. En itinerarios con una alta intensidad de tráfico pesado guiado se debería recurrir a plataformas ó carriles de uso reservado.

Cuando se trate de la incorporación de vehículos pesados guiados desde los ramales a la calzada la situación es más delicada, ya que se necesita una longitud mayor de carril de aceleración. En vías con intensidades de tráfico altas estas maniobras serán complejas. Se requerirá que el convoy de vehículos pesados se "desenganche" ó bien actuar sobre la infraestructura, sobredimensionando las longitudes de los carriles de cambio de velocidad. Otra posible solución, sería disponer en el tronco principal de un carril adicional de adelantamiento en las zonas de enlace que permita que el resto de los

vehículos abandone el carril derecho para facilitar la incorporación de vehículos pesados guiados.

Otra conclusión es que el **nivel de servicio y la capacidad** de las autovías y autopistas mejorarán con la implantación de los vehículos pesados guiados, al ocupar estos una menor longitud de un tramo de carretera, gracias a los sistemas disponibles que permiten reducir la distancia entre vehículos de forma notable. La circulación de estos vehículos generará el inconveniente de que las maniobras de adelantamiento se demorarán, en especial las realizadas por vehículos pesados, afectando a la velocidad de operación y al nivel de servicio. En plataformas con 3 carriles por sentido este efecto no será tan reseñable, pero en calzadas con 2 carriles será necesario estudiar la idoneidad de un tercer carril para adelantamiento en algunos tramos, como pueden ser las rampas, ó de forma continua.

La presencia de vehículos guiados, que tienen una ocupación superior de la calzada, requerirá anticipar las maniobras. Será necesario modificar la **señalización fija y variable** de la carretera, anticipando la señalización de tal forma que se advierta con mayor antelación de los distintos elementos de la vía. También será necesario duplicar las señales en ambas márgenes de la carretera debido a que la proximidad entre los camiones guiados empeorará las condiciones de visibilidad de las señales dispuestas en margen derecha. Será oportuno potenciar el uso de pórticos y banderolas sobre la calzada, debido a sus mejores condiciones de percepción.

La versatilidad de los paneles de mensajería variable, que ya existen en distintos puntos de la red, puede ser una herramienta interesante si se asocia a la detección de los vehículos pesados guiados, de tal forma que se pueda advertir de su presencia. Es crucial que el propio convoy de vehículos pesados disponga de señalización móvil acoplada al último vehículo, advirtiendo al resto de usuarios de su presencia y sus características. Esta señalización es muy importante si tenemos en cuenta que los vehículos guiados impiden la incorporación de otros vehículos entre aquellos que se encuentran enlazados.

La singularidad de los vehículos pesados guiados requerirá para su incorporación a la red de carreteras revisar la **legislación de tráfico**, de tal forma que se incorporen

recomendaciones o exigencias en las maniobras de circulación cuando por la vía también circulen pelotones de camiones guiados. A través de la legislación se podrá prescribir la señalización móvil que deben disponer estos vehículos guiados. En particular, será interesante regular los adelantamientos a realizar por otros vehículos pesados a un convoy de vehículos pesados y la posibilidad de adelantamiento de un pelotón de vehículos a otro pelotón u otros vehículos. Todo ello en función de la tipología de la vía, el número de carriles, la existencia de carriles de adelantamiento ó la presencia de enlaces en el entorno, entre otros condicionantes.

Una gran aportación de la utilización de vehículos guiados al sector de la carretera es la influencia que tiene sobre la **seguridad vial** la reducción del fallo humano, que es una de las principales causas de accidente. Esta aportación es mucho más sensible cuando se trata de vehículos pesados, puesto que la gravedad de los accidentes es mayor cuando estos intervienen. Tras analizar la accidentabilidad anual, tanto a nivel nacional como en el caso concreto de la autovía de estudio, se ha llegado a la conclusión de que se reduciría, en función del porcentaje del parque móvil de vehículos pesados guiados, pudiendo evitar hasta un 50% de los accidentes en que interviene un vehículo pesado.

En cuanto a una valoración de las **inversiones** necesarias para adaptar las autovías actuales a las características de los vehículos guiados, se ha puesto de manifiesto en este trabajo que las actuaciones prioritarias se deben concentrar en los enlaces y sus proximidades. La prolongación de carriles de incorporación y salida, la creación de vías paralelas, los posibles carriles de circulación exclusiva para estos vehículos, así como la ampliación de la señalización, se deben realizar en el entorno de los enlaces. La valoración de estas obras no es posible de modo general y necesita un estudio detallado de cada enlace que tenga en cuenta el diseño de los ramales existentes y la intensidad del tráfico para determinar el importe de la inversión.

Las inversiones asociadas a este tráfico generan unos ahorros, principalmente por disminución del número de víctimas en accidentes, por el menor consumo de combustible de los vehículos y disminución de la contaminación. Se puede segmentar una autovía en

tramos de tráfico homogéneo y calcular para cada uno un balance de inversiones necesarias y ahorros generados, determinando de ese modo el periodo de retorno de las inversiones necesarias.

En resumen, podemos concluir que el transporte de mercancías por carretera mediante vehículos guiados, que será el transporte del futuro, además de ser beneficioso para el sector transportes, mejorará las condiciones de circulación de las vías de alta capacidad si se adaptan las infraestructuras existentes y se proyectan las nuevas actuaciones considerando este tipo de vehículos que formarán parte del parque móvil.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para garantizar el correcto funcionamiento de la red de carreteras incluyendo la circulación de vehículos pesados guiados será necesario avanzar en el estudio del comportamiento del tráfico incluyendo estas composiciones. Fruto del análisis realizado en este trabajo, se apuntan como prioritarias las siguientes líneas de investigación:

- Dimensionamiento de carriles de cambio de velocidad atendiendo a la intensidad de tráfico y presencia de vehículos guiados.
- Variación del nivel de servicio en adelantamientos realizados a vehículos pesados guiados en distintas condiciones de tráfico. Permitiría establecer longitudes deseables de vehículos guiados, limitaciones de velocidad para estas composiciones y necesidad de actuación sobre la infraestructura.
- Adaptación de la señalización para la implantación de vehículos pesados guiados, tanto fija como asociada a los vehículos. Implicaciones en la legislación de tráfico.
- Penalización de la capacidad por la introducción progresiva de vehículos con asistencia adaptativa a la velocidad de crucero con los sistemas iniciales de asistencia a la conducción automática.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. MINISTERIO DE FOMENTO (Febrero 2016). *Observatorio del Transporte y la Logística en España*. Informe anual 2105. <http://observatoriotransporte.fomento.gob.es>

2. MINISTERIO DE FOMENTO (Julio 2016). *Observatorio del transporte de mercancías por carretera*. Oferta y demanda.

3. LIBRO BLANCO DEL TRANSPORTE (2011) . Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible. Dirección General de Movilidad y Transportes. Comisión Europea. <www.ec.europa.eu.com>

4. DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. Seguridad vial, estadísticas e indicadores. Publicaciones. Ministerio de Fomento <www.dgt.es>

5. DIRECTIVA 2010/40/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (7 de julio de 2010), *por la que se establece el marco para la implantación de los sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte.*

6. SAE PROJECT. (Enero 2014) *"Summary of SAE International's levels of driving automation for on-road vehicles".* SAE international's J3016.

7. MINISTERIO DE FOMENTO. Áreas de actividad. Carreteras. Catálogo y evolución de la red de carreteras. <www.fomento.gob.es>

8. RESPONSE 3 (Agosto 2009). *Code of Practice for the Desing and Evaluation of ADAS*

9. ADAPTIVE (Febrero 2015). Deliverable D2.1. System Classification and Glossary. Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles.

10. SARTRE. *Challanges of Platooning on Public Motorways*.

11. DAVILA, D; NOMBELA, M. SARTRE: *"Safe road Trains for the Environment".* <www.sartre-project.net>

12. VAN DE HOEF (Sweden 2016). Fuel-efficient Centralized Coordination of Truck Platooning. KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering.

13. CHAN E.,GILHEAD P. Et al. (2012) *"Cooperative control of SARTRE automated platoon vehicles".* 19 th ITS Wold Congress, Vienna.

14. TURRI, VALERIO (Sweden 2015). *"Fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning through look-ahead control".* KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering.

15. CALIFORNIA PATH RESEARCH REPORT (Abril 1997). *"String Stability of Interconnected Systems: An Application to Platooning in Automated Highway Systems".* California Path Program. Institute of Transportation Studies. Unisersity of California.

16. HALL, R.; CHIN C. (2002). California PATH Research Report. *"Vehicle Sorting for Platoon Formation: Impacts on Highway Entry and Throughput".* California Path Program. Institute of Transportation Studies. Unisersity of California.

17. BERGENHEIM, C.; SHLADOVER, S.; COELINGH, E. (2012) "*Overview of platooning systems*". Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct 22-26, Vienna, Austria.

18. COMPANION (2015). *"Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles".* IEEE 18 th International Conference on Intelligent Transportation Systems.

19. SANGHYUN CHEON. "*An Overview of Automated Highway Systems (AHS) and the social and Institutional Challenges they face".*

20. EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE (2016). *"Creating next generation mobility.* <www.eutruckplatooning.com>

21. EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE (2016). *"A fresh perspective on mobility and logistics"*

22. EUROPEAN TRUCK PLATOONING CHALLENGE (2016). *"Lessons learnt"*

23. BOE (Diciembre 2015*). Orden PRE/2788/2015, de 18 de diciembre, por la que se modifica el anexo IX del Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.*

24. HIGHWAY CAPACITY MANUAL 2010. *Volume 1: Concepts. TRB-Transportation Tesearch Board of the National Academies.*

25. HIGHWAY CAPACITY MANUAL 2010*. Volume 2: Uninterrupted flow. TRB-Transportation Tesearch Board of the National Academies.*

26. MINISTERIO DE FOMENTO (2014). *"Prescripciones y recomendaciones técnicas para la realización de estudios de tráfico de los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de carreteras"*. Secretaria de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Carreteras. Subdirección General de Estudios y Proyectos.

27. MINISTERIO DE FOMENTO (1999). *"Trazado. Instrucción de carreteras".* Norma 3.1-I.C.

28. BOE (2016). *Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras.*

29. MINISTERIO DE FOMENTO (2014). *"Señalización vertical" Instrucción de carreteras".* Norma 8.1-I.C.

30. *BOE (2014). Orden FOM/534/2014, de 20 de marzo, por la que se aprueba la norma 8.1-IC señalización vertical de la Instrucción de Carreteras.*

31. MINISTERIO DE FOMENTO. Áreas de actividad. Transporte Terrestre. Inspección y Seguridad en el transporte. Pesos y dimensiones vehículos patrón. www.fomento.gob.es

32. MINISTERIO DE INTERIOR-DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. BOE (Mayo 2014). *"Código de Tráfico y Seguridad Vial".*

33. BOE (Julio 2015). *Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo.*

34. UNIVERSIDAD DE A CORUÑA. *"Capacidad y niveles de servicio en circulación continua".* Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

35. DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO (2015). *"Anuario Estadístico de Accidentes 2015".*

36. CENTRO DE GESTIÓN DE TRÁFICO DE VALENCIA. "Grabaciones de las cámaras fijas del By-pass de Valencia"

37. DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. "Registro partes de accidentes en el sector V-1 de Valencia". <www.rcevalencia.com>

38. MINISTERIO DE FOMENTO-DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS. DEMARCACION DE CARRETERAS DEL ESTADO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA (2015). "Estudio de accidentabilidad de la autovía A-7"

39. MINISTERIO DE FOMENTO-DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS. "Mapas de Aforo 2014"

Colaboran:

Mercedes-Benz IRU Continental

Fundación Corell

Movilidad, Medioambiente y Seguridad

C/ Orense 36, Esc. Izq. 1ºD - 28020 Madrid

Telf. 91 866 90 10 - Fax 91 395 28 23

info@fundacioncorell.es www.fundacioncorell.es