

Aurreproiektua
Bizkaiko Lurralde Historikoko
Errepideen II. Arlokako Lurralde
Egitamua (BEALE)

Hasierako Onespenerako Dokumentua

4. Eranskina. Ekipamendu Teknologikoko Neurrien Proposamena

Anteproyecto del
II Plan Territorial Sectorial de
Carreteras del Territorio Histórico
de Bizkaia (PTSCB)

Documento para Aprobación Inicial

Anexo 4. Propuesta de Medidas de Equipamiento Tecnológico

noviembre 2021 eko azaroa

Índice

1 Motivación y objetivo	1
2 Tendencias tecnológicas globales en movilidad y transporte	2
2.1 Carreteras que pueden actuar como recorridos alternativos	2
2.1.1 Sistemas de guiado mediante Paneles de Mensajería Variable (PMVs).	2
2.1.2 Sistema de conectividad entre vehículos (V2V) y de los vehículos con la infraestructura (V2I).	3
2.2 Carreteras con una alta Intensidad Media Diaria	4
2.2.1 Ramp metering aplicado a carreteras interurbanas	4
2.2.2 Sistemas de velocidad variable	4
2.2.3 Uso de arcenes	5
2.2.4 Vehículos conectados y autónomos	6
2.3 Carreteras con elevado tráfico de vehículos pesados	7
2.3.1 Sistemas de Platooning	7
2.3.2 Electric Roads	8
3 Información sobre costes de implantación	9
3.1 Sistemas de guiado mediante PMVs	9
3.2 Sistemas basados en vehículos conectados	9
3.3 Sistemas Ramp Metering	10
3.4 Sistemas de Velocidad Variable	10
3.5 Uso de arcenes	10
3.6 Sistemas de Platooning	11
3.7 Sistemas de Electric roads	11
4 Propuesta de Equipamiento Tecnológico para el II PTS de Carreteras de Bizkaia	12
4.1 Nuevas tendencias a aplicar	12
4.2 Mecanismos de intervención	14
4.3 Actuaciones propuestas para equipamiento tecnológico	15
5 Referencias	19

1 Motivación y objetivo

Los nuevos desarrollos tecnológicos como el Internet de las Cosas (IoT), la generalización de los Smartphones, el Edge Computing, las técnicas de Machine Learning, las innovaciones en la propulsión eléctrica, el abaratamiento de la sensórica y otros están abriendo un campo creciente de posibilidades para la mejora, desde el punto de vista de la sostenibilidad, de las infraestructuras y de los servicios de transporte

El objetivo principal del presente informe es realizar una serie de propuestas sobre posibles paquetes de política y equipamiento que podrían incorporarse a distintos tipos de vías de la red de carreteras Bizkaia con el objetivo de mejorar su gestión y operación, finalizando con una propuesta de actuación directa de DFB en la red de carreteras objeto del Plan.

2 Tendencias tecnológicas globales en movilidad y transporte

En los próximos años la evolución de las tecnologías aplicadas al vehículo, a la sensorización y a la gestión de la demanda va a suponer una revolución en muchos aspectos relacionados con la planificación de carreteras. Muchos de estos avances supondrán sin duda una mejora en la calidad de vida y de la movilidad y además van a suponer un cambio en la forma en la que se planifican, construyen, mantienen y explotan las carreteras actuales.

Tal y como se recoge en el Libro Blanco, las nuevas tecnologías para los vehículos y la gestión del tráfico serán esenciales para reducir las emisiones de transporte y conseguir una movilidad más sostenible. La evolución futura debe contemplar la utilización más eficiente de las infraestructuras mediante sistemas mejorados de gestión e información del tráfico.

En el presente apartado se describen las tendencias tecnológicas globales en movilidad y transporte basadas en la identificación de tres tipos de carreteras presentes en la red de Bizkaia con problemáticas y características específicas. Estos son:

- **Alternativas a los recorridos principales:** carreteras que no forman parte de los tramos con mayor flujo de tráfico pero que pueden ejercer como alternativa en caso de que éstos presenten situaciones de congestión, estén bloqueados por accidentes, se den situaciones meteorológicas adversas y otras. Estas carreteras pueden, por lo tanto, ser un complemento a los tramos principales potenciando la capacidad de adaptación de la red de carreteras y asegurando su resiliencia para conectar los principales orígenes y destinos.
- **Recorridos con una alta Intensidad Media Diaria (IMD):** carreteras que presentan un elevado nivel de tráfico por unir orígenes y destinos con una alta demanda (núcleos principales, nodos económicos, lugares de importancia turística etcétera.). Este tipo de vías presentan una capacidad por debajo de la demanda y, de forma derivada, problemáticas relacionadas con la mayor contaminación y congestión.
- **Carreteras con una alta proporción de vehículos pesados:** vías en las que gran parte de su demanda está compuesta por vehículos pesados dado que relacionan nodos con importancia logística e industrial. Este tipo de vehículos pueden acarrear situaciones de mayor contaminación, desgaste de la vía, mayor congestión y otros.

A continuación se describen a modo informativo los distintos paquetes de política y equipamiento que podrían potenciar el aprovechamiento de las características específicas de estos tipos de carreteras, así como ayudar a minimizar sus problemáticas particulares mejorando su gestión y operación.

2.1 Carreteras que pueden actuar como recorridos alternativos

Dentro de las carreteras que pueden ejercer un rol complementario al de los itinerarios principales, pueden identificarse varias formas de potenciar esta complementariedad mediante distintas políticas y herramientas tecnológicas. En concreto se han identificado dos grandes tipos de soluciones: las tecnológicas basadas en la conectividad de los vehículos entre sí y de éstos con la infraestructura, y los sistemas de guiado de vehículos utilizando señalización visual. Ambos sistemas se describen a continuación.

2.1.1 Sistemas de guiado mediante Paneles de Mensajería Variable (PMVs).

Un método de guiado de los vehículos, sin el requisito de tener que contar con toda una infraestructura para permitir la comunicación V2I, es el uso de los paneles de mensajería variable (PMV).

Estos paneles permiten transmitir información en tiempo real sobre el estado del tráfico a los conductores como los sistemas V2I, si bien, dada sus características, la información suministrada tiene que ser más limitada y los conductores tienen que reaccionar acorde a lo esperado. Los PMV pueden aportar información sobre la fluidez del tráfico, como la existencia de colas aguas abajo del PMV o de accidentes, cortes de carriles por obras, malas condiciones atmosféricas y otras (Figura 1).

Además, una aplicación adicional de los PMV es la de proponer rutas alternativas para mitigar la congestión en la vía principal sugiriendo desvíos. Este tipo de estrategias pueden ayudar a reducir la congestión en determinadas vías y nodos críticos como se muestra en la Figura 2, en la que una situación de congestión en un tramo de la red es minimizada a través del uso de varias vías alternativas.

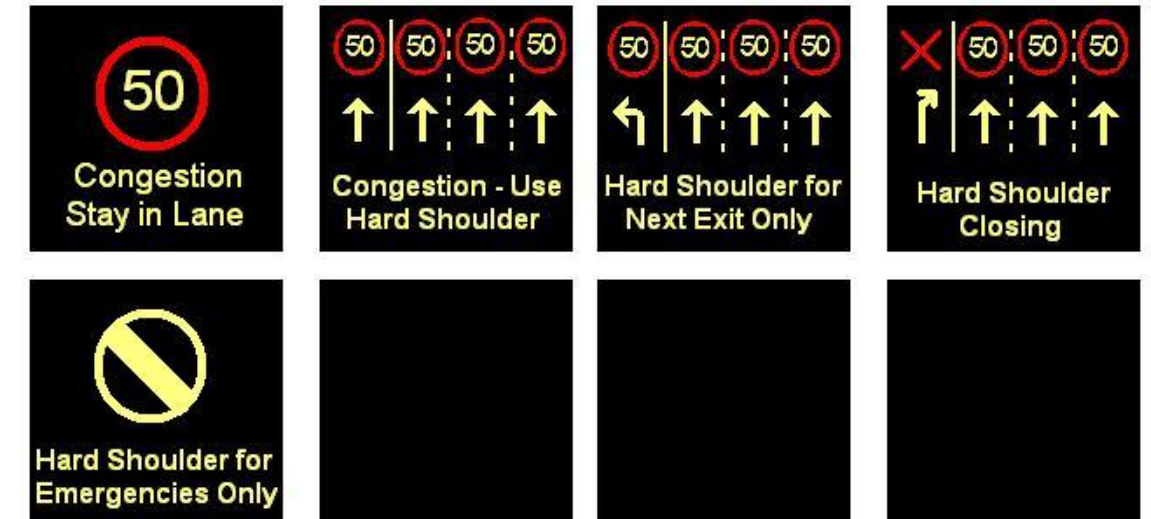


Figura 1. Ejemplo de funcionamiento de PMV



Figura 2. Ejemplo de guiado de tráfico mediante PMV

Varios investigadores han realizados trabajos para intentar medir la efectividad de los PMV en el comportamiento y guiado de los conductores. Chen et al. (2008) se basaron en una encuesta y simulaciones mediante software y determinaron que los PMVs pueden mejorar las condiciones de tráfico de un área urbana si los conductores son guiados a las calles con menor congestión. Estos efectos positivos se produjeron sobre todo si la congestión en la zona era elevada. Yan y Wu (2014) realizaron un ejercicio de simulación similar mostrando que los PMVs deben estar situados entre 150 y 200 metros aguas arriba del punto de divergencia para ser efectivos. Además, los autores encontraron evidencia de que los mensajes de los PMVs eran más tenidos en cuenta si la información se presentaba en modo gráfico y no sólo en modo texto.

Erke, Sagberg y Hagman (2007) realizaron un estudio con dos PMVs en una autovía a las afueras de Oslo que mostraron información sobre una carretera cortada aguas abajo, con recomendaciones de rutas alternativas. Los autores compararon el comportamiento de los conductores en relación a la elección de ruta, la velocidad y el frenado con los PMVs mostrando indicaciones o sin dar información. Los resultados obtenidos en este experimento mostraron que un quinto de los conductores adoptó la ruta recomendada en los PMVs y una alta proporción redujeron su velocidad al ver los mensajes de advertencia. Estos resultados indican que los PMVs pueden ser efectivos para guiar el tráfico, si bien tampoco puede esperarse que todos los conductores vayan a cumplir con las indicaciones proporcionadas.

Este tipo de estudios muestran, por lo tanto, que los PMVs pueden ser una herramienta efectiva para la transmisión de información, el guiado de vehículos y la gestión de las situaciones de congestión mediante la propuesta de rutas alternativas, si bien este sistema por sus propias características tiene una capacidad limitada.

2.1.2 Sistema de conectividad entre vehículos (V2V) y de los vehículos con la infraestructura (V2I).

Los C-ITS son una serie de tecnologías y protocolos que permiten el intercambio de datos y la cooperación entre dos o más subsistemas ITS, por ejemplo entre vehículos (V2V), entre los vehículos y la infraestructura (V2I), o entre los vehículos y la señalización (C-ITS Platform, 2016). Estos sistemas se basan en tecnologías Wireless de comunicación de tipo Wi-Fi o móvil (3G, 4G, LTE, 5G).

Gracias al intercambio de información en tiempo real, estos sistemas pueden permitir enviar información a los vehículos y conductores de tal forma que estos puedan ser conscientes de situaciones de congestión en vías principales y de la existencia de recorridos alternativos. Para ello las infraestructuras deberían presentar un nivel B según la clasificación ISAD (Infrastructure Support Levels for Automated Driving) (Figura 3) realizada en el marco del proyecto europeo INFRAMIX (www.inframix.eu) (Carreras, Daura, Erhart y Ruehrup, 2018). En este nivel B los sensores instalados en la infraestructura pueden percibir el estado del tráfico y transmitir en tiempo real esta información a los vehículos de la vía y a los vehículos cercanos que podrían acceder a ésta.

Level	Name	Description	Digital information provided to AVs				
			Digital map with static road signs	VMS, warnings, incidents, weather	Microscopic traffic situation	Guidance: speed, gap, lane advice	
Digital infrastructure	A Cooperative driving	Based on the real-time information on vehicles movements, the infrastructure is able to guide AVs (groups of vehicles or single vehicles) in order to optimize the overall traffic flow	X	X	X	X	
	B Cooperative perception	Infrastructure is capable of perceiving microscopic traffic situations and providing this data to AVs in real-time	X	X	X		
	C Dynamic digital information	All dynamic and static infrastructure information is available in digital form and can be provided to AVs	X	X			
Conventional infrastructure	D Static digital information / Map support	Digital map data is available with static road signs. Map data could be complemented by physical reference points (landmarks signs). Traffic lights, short term road works and VMS need to be recognized by AVs	X				
	E Conventional infrastructure / no AV support	Conventional infrastructure without digital information. AVs need to recognise road geometry and road signs					

Figura 3. Niveles de desarrollo de la infraestructura conectada. Fuente: proyecto INFRAMIX

Las tecnologías que permiten la comunicación de los vehículos con el resto de los elementos del sistema (V2X) son por un lado las Dedicated Short Range Communications (DSRC) y por otro la Cellular-V2X (C-V2X). Las DSRC se basan en el estándar IEEE 802.11p diseñado para la comunicación Wireless en un ambiente vehicular (Wireless Access in Vehicular Environments-WAVE). Esta tecnología es también la base del estándar europeo para la comunicación entre vehículos y de los vehículos con la infraestructura, ETSI ITS-G5 licenciada en la banda ITS de 5,9 Ghz. Por otro lado, está disponible la tecnología celular de 3G en adelante (4G, LTE, 5G) la cual permite la comunicación directa entre vehículos a velocidades crecientes. El estándar 3GPP LTE, que incorpora LTE-V2X, fue hecho público en 2017 (LTE Release 14). Además, la futura tecnología 5G, al posibilitar también la comunicación local por ondas de radio de mayor frecuencia (25–39 GHz), proporcionará un ancho de banda aún más elevado, menores tiempos de latencia y la posibilidad de conectar un número creciente de dispositivos.

Estos sistemas de comunicación en tiempo real pueden permitir a los gestores de las infraestructuras enviar mensajes directamente a los vehículos con el aviso de la existencia de problemas de circulación en una vía determinada y la posibilidad de adoptar, de forma guiada, recorridos alternativos. El envío de esta información directamente a los vehículos es probable que ayude a que la efectividad de estos mensajes sea mayor que en el caso de los sistemas de guiado mediante PMVs. Por supuesto, a un nivel superior de desarrollo de los vehículos autónomos y conectados (nivel A), el guiado de los vehículos podría ser incluso automático sin necesidad de intervención por parte de los conductores.

2.2 Carreteras con una alta Intensidad Media Diaria

La presencia de vías con una alta intensidad de ocupación está asociada a efectos negativos como situaciones de congestión y mayores niveles de contaminación que deben minimizarse en la medida de lo posible. Dado que las políticas de creación de nuevas infraestructuras o ampliación de las existentes puede no ser la mejor alternativa por restricciones presupuestarias, ambientales o porque se estima que esos incrementos de capacidad generen demanda inducida que en el medio plazo volverá a copar la capacidad existente, puede ser interesante explorar medidas alternativas. Estas medidas deben permitir aprovechar en mayor grado las capacidades existentes de las infraestructuras con el objetivo de paliar las peores externalidades de la alta demanda al menos en el corto-medio plazo. Entre estas medidas se encuentran los sistemas de ramp metering, los sistemas de velocidad variable, el uso temporal de arcenes y por último los incrementos de capacidad que pueden derivarse de la conexión y conducción autónoma de los vehículos.

2.2.1 Ramp metering aplicado a carreteras interurbanas

Los sistemas de ramp metering son técnicas de dosificación del flujo entrante en autopistas con congestión recurrente que podrían aplicarse también al caso de carreteras interurbanas con altos niveles de tráfico. El objetivo principal de estos sistemas es asegurar que el flujo entrante más el circulante sea menor a la capacidad de la infraestructura. Sin embargo, son sistemas que sólo son eficientes cuando la congestión se produce cerca de las zonas de incorporación reguladas no siendo efectivas, o sólo en mucha menor medida, si la congestión se da a mayor distancia.

Habitualmente el ramp metering se aplica a las entradas de las autopistas congestionadas mediante la instalación de semáforos que regulan el acceso (Figura 4). Estos semáforos pueden presentar ciclos fijos, permitir la entrada de un número predeterminado de vehículos por unidad de tiempo o presentar ciclos variables según la demanda. Además, un punto clave de estos sistemas es que las colas generadas en las rampas de acceso no interfieran con la red local, por lo que estos accesos deben estar dimensionados correctamente para poder acomodar las colas de vehículos que se formen.



Figura 4. Ejemplo de sistemas de ramp metering

Este tipo de sistemas pueden diseñarse aplicando conteos automáticos del número de vehículos que están utilizando una infraestructura y técnicas de optimización para ajustar la entrada de vehículos y maximizar el número de coches servidos por la infraestructura sin generar congestión.

Sin embargo, como recoge la Federal Highway Administration (Mizuta, Roberts, Jacobsen, Thompson y Colyar, 2014) hay una serie de retos a los que se tiene que enfrentar la administración que quiera poner en marcha este tipo de sistema:

- Apoyo de las instituciones afectadas y del público general para implantar este tipo de política.
- Realizar un análisis coste/beneficio que permita respaldar la implantación de este sistema.
- Gestionar las colas de forma inteligente, para que estas no sean demasiado largas, perjudiquen la circulación en la red local o tengan unos tiempos de espera excesivos.

Por lo tanto, la implantación de un sistema de ramp metering tiene que estar claramente justificada y ser explicada a los potenciales usuarios para asegurar su correcto funcionamiento.

2.2.2 Sistemas de velocidad variable

Los sistemas de velocidad variable buscan ajustar la velocidad máxima permitida en una vía al flujo de tráfico existente con el objetivo de aumentar su capacidad. Así, si una vía presenta una alta demanda, el flujo de tráfico puede volverse inestable y lento, una inestabilidad que se puede minimizar con un límite de velocidad más estricto que aumente ligeramente la capacidad de la vía (Figura 5).

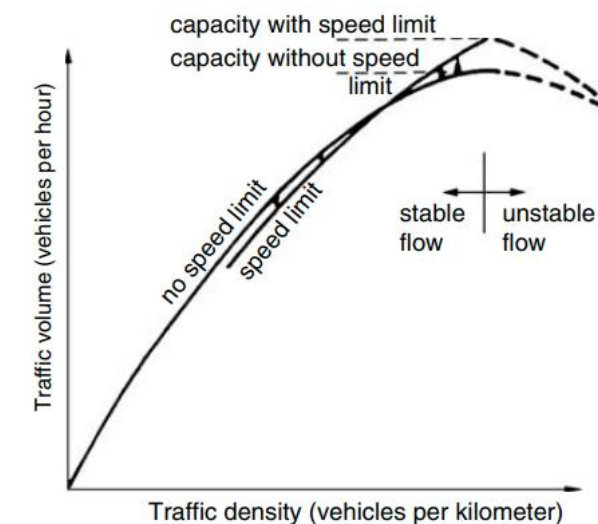


Figura 5. Cambio en la capacidad debido a los límites de velocidad. Fuente: Papageorgiou, Kosmatopoulos y Papamichail (2008)

Normalmente estos límites dinámicos se establecen mediante PMVs que indican a los conductores las zonas de velocidad reducida (Figura 6 y Figura 7). Estos sistemas pueden presentar una planificación fija, basada en datos históricos sobre la demanda en distintos intervalos horarios o estacionales, o una planificación dinámica, basada en mediciones in situ sobre el estado del tráfico aprovechando la presencia de espiras o de otro tipo de sensores, o bien según las condiciones climatológicas o incluso según las emisiones contaminantes. Esta segunda opción dinámica es generalmente preferible, dada su mayor flexibilidad, si bien requiere que una infraestructura correctamente adaptada y equipada.



Figura 6. Ejemplo de vía con un sistema de velocidad variable



Figura 7. Ejemplo de simulación de tráfico sin y con límites de velocidad variable. Fuente: Georgia Department of Transportation (Georgia DOT)

Además de reducir las situaciones de congestión, los límites de velocidad variables también permiten reducir la peligrosidad y la accidentalidad de una infraestructura, especialmente si se dan situaciones de mal tiempo, lluvia etcétera. Así mismo también pueden ser aplicados en casos en que existan niveles de contaminación por encima de los recomendables, ya que la velocidad es un factor importante a la hora de explicar las emisiones de los vehículos. La efectividad de estos sistemas en el campo de la seguridad ha sido simulada por Lee, Hellinga y Saccomanno (2006) mostrando que un sistema de velocidad variable ante una situación de riesgo en las condiciones de tráfico puede reducir la accidentalidad entre un 5% y un 17%.

Este tipo de sistemas han demostrado ser efectivos para reducir la pendiente del diagrama de flujo-ocupación, una reducción que es mayor a medida que se reduce la velocidad (Papageorgiou et al., 2008). Papageorgiou et al. (2008) propusieron también que un flujo de tráfico eficiente en autopista se puede producir con un límite de 50 millas por hora (80km/h), mientras que a 40 millas por hora (64 km/h) podría ser usado más bien en situaciones de alta ocupación por razones de seguridad.

2.2.3 Uso de arcenes

El uso de arcenes, principalmente en autopistas, ha sido una medida de incremento de la capacidad de una infraestructura usado en múltiples países, principalmente los Estados Unidos (Figura 8). Generalmente es una estrategia temporal, en la que los arcenes izquierdo, derecho o ambos, son utilizados para el tránsito en determinados días o intervalos horarios. Sin embargo, esta medida debe utilizarse con precaución, principalmente por motivos de seguridad, ya que no en todos los casos se cumplirán los requisitos referentes a visibilidad, estado del pavimento, geometría del arcén y otros.

En general se recomienda que esta estrategia sea utilizada únicamente si: (1) existe una fuerte congestión en los carriles convencionales y (2) se puede garantizar que el arcén recobre su función y características originales una vez haya finalizado este periodo de fuerte congestión. Por supuesto, el arcén podría destinarse al tránsito de vehículos particulares o sólo a vehículos de transporte público o a vehículos privados con un nivel de ocupación superior a un nivel fijado.

Junior, Dowling, Nevers y Neudorff (2016) realizan varias recomendaciones sobre las actividades que deberían realizarse antes de habilitar un arcén para circulación:

- La anchura del arcén debe ser adecuada o con posibilidad de ser ampliada
- La capacidad estructural del arcén debe ser adecuada para asegurar el drenaje y la circulación de los vehículos
- Deberían poder habilitarse áreas de emergencia adicionales al arcén
- El arcén habilitado debería tener la longitud suficiente disponible para evitar un cuello de botella
- Normalmente es más sencillo utilizar el arcén derecho dado que suele ser más amplio y fácil de implementar. No es recomendable utilizar ambos arcenes al mismo tiempo

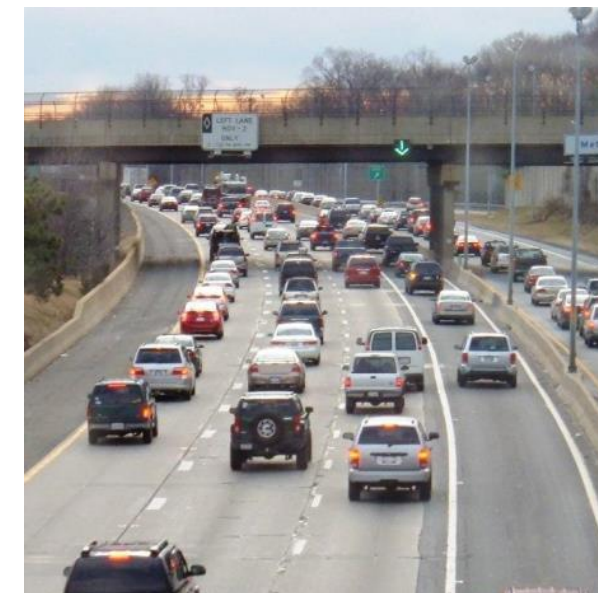


Figura 8. Ejemplo de uso del arcén para la circulación de vehículos (I-66, EE.UU.). Fuente: Junior et al. (2016)

Este tipo de política debe ser utilizado por lo tanto con precaución y seguramente requerirá realizar labores de adaptación de los arcenes existentes para que estos puedan ser utilizados en las condiciones de seguridad requeridas. Aun así, los incrementos de capacidad conseguidos pueden ser elevados dado que el carril adicional obtenido estará operativo de forma cercana al 100%.

2.2.4 Vehículos conectados y autónomos

La adaptación de las infraestructuras a los vehículos autónomos y conectados (VA) abre la posibilidad futura a que éstas puedan aumentar su capacidad dado que los VA podrán circular manteniendo menores distancias de seguridad y las maniobras de los vehículos presentarán una mayor coordinación. Algunos autores han realizado estimaciones de la magnitud de estos potenciales incrementos de capacidad mediante el uso de software de simulación de tráfico.

Para el caso de las vías interurbanas, Shladover, Su y Lu (2012) simularon, mediante el software de tráfico Aimsun, los efectos en la capacidad de distintas penetraciones de mercado de vehículos con adaptative cruise control (ACC) y cooperative adaptative cruise control (CACC).. Los vehículos con ACC pueden mantener de forma automática unos parámetros fijos de distanciamiento respecto a los vehículos que siguen, aunque con una lenta capacidad de adaptación a cambios en las condiciones de tráfico. En cambio, los vehículos que disponen de CACC (equivalentes a VAs plenamente conectados) pueden comunicarse en tiempo real permitiendo un menor espacio entre vehículos y una rápida adaptación a los cambios en el tráfico. Las simulaciones partieron del caso base de carreteras con capacidad para 2.200 vehículos por hora y carril con conducción manual y separación entre vehículos de entre 1,48 y 1,8 segundos. Los resultados para distintas penetraciones de mercado de los ACC y CACC para una separación de entre 2,2 segundos y 1,1 segundos para los vehículos con ACC y de entre 1,1 segundos y 0,6 segundos para los vehículos con CACC pueden consultarse en la Figura 9.

Percentage of ACC Vehicles	Lane Capacity (vph) by Percentage of CACC Vehicles								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
10	2,065	2,090	2,170	2,265	2,389	2,458	2,662	2,963	3,389
20	2,065	2,110	2,179	2,265	2,378	2,456	2,671	2,977	0
30	2,077	2,127	2,179	2,269	2,384	2,487	2,710	0	0
40	2,088	2,128	2,192	2,273	2,314	2,522	0	0	0
50	2,095	2,133	2,188	2,230	2,365	0	0	0	0
60	2,101	2,138	2,136	2,231	0	0	0	0	0
70	2,110	2,084	2,155	0	0	0	0	0	0
80	2,087	2,101	0	0	0	0	0	0	0
90	2,068	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9. Capacidad del carril ante distintas penetraciones de mercado de vehículos con ACC y CACC. Fuente Shladover et al. (2012)

Por lo tanto, para tasas de penetración cercanas al 90% de los CACC, los incrementos de capacidad estarían próximos al 65%, mientras que si la tasa de penetración fuera del 100% de los vehículos totalmente autónomos y conectados, los incrementos de capacidad podían llegar a los 4000 vehículos por hora y carril (80% de incremento de la capacidad de las infraestructuras de carreteras respecto al caso base).

Estas estimaciones han sido corroboradas por Friedrich (2016) utilizando las fórmulas de la teoría de flujos de tráfico. Así, si los VAs pudieran mantener una separación de entre 0,5 segundos y 1,15 segundos, los incrementos de capacidad podrían estar cercanos al 80-90% de la capacidad base (Figura 10).

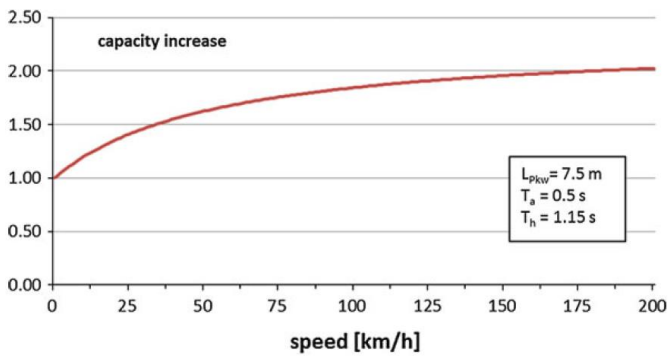


Figura 10. Incrementos de capacidad de la infraestructura para distintas velocidades con Vehículos Autónomos. Fuente: Friedrich (2016)

Liu, Kan, Shladover, Lu y Ferlis (2018) han realizado estimaciones más recientes corroborando estos resultados. Si se comparan las capacidades teóricas para diferentes penetraciones de mercado de los CACC con una situación ideal en la que no existen cambios de carril de los vehículos y todos llevan una velocidad y una distancia de separación homogéneas, los incrementos de capacidad para una penetración de los CACC del 80% serían del 49%, mientras que con un mercado del 100% se llegaría al 81% de incremento de capacidad. Para las simulaciones en condiciones más realistas, con una distribución aleatoria en el comportamiento de los conductores y en los cambios de carril, las capacidades simuladas se reducen ligeramente hasta el 36% para el 80% de penetración de mercado y al 78% para el 100% (Figura 11). Sin embargo, también puede observarse que si la penetración es inferior al 60% los incrementos de capacidad son poco significativos. Esto puede implicar que las inversiones iniciales en la mejora de las infraestructuras para la circulación de VAs puedan no generar los beneficios deseados al menos en el corto plazo.

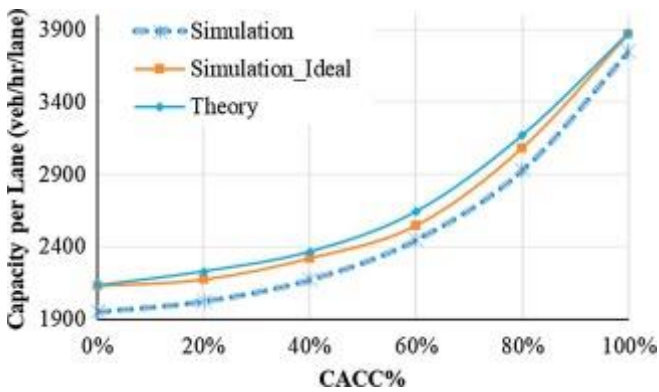


Figura 11. Incrementos de capacidad de la infraestructura para distintas penetraciones de los Vehículos Autónomos. Fuente: Liu et al. (2018).

2.3 Carreteras con elevado tráfico de vehículos pesados

En la red de carreteras de Vizcaya se ha detectado un número significativo de éstas con un porcentaje de IMD de pesados superior a la media habitual en carreteras convencionales del 5% para España (Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial, 2020; DGC, 2019). La Tabla 1 recoge las carreteras localizadas en Vizcaya donde el porcentaje de pesados es superior a la media y que por tanto podrían ser susceptibles de aplicación de las medidas previstas en este apartado. Entre ellas se encuentran tramos de la BI-10, la BI-30, la BI-635 y otras.

Tramo	Carretera	% Pesados en días Laborables
BASURTO - ZORROTZA	N-634	13,0
PTE. RONTEGI	BI-30(N-637)	7,9
PTE. RONTEGI (BI-GETXO)	BI-30(N-637)	8,2
PTE. RONTEGI (GETXO-BI)	BI-30(N-637)	7,6
E. ASUA (BI-604) - TT. ARTXANDA	BI-30(N-637)	9,6
E. ENKURI - TT. ARTXANDA	BI-30(N-637)	9,6
TT. ARTXANDA - E. ENKURI	BI-30(N-637)	9,6
GALDAKAO - EL GALLO	N-634	7,7
ZALDIBAR - AREITIO	N-634	10,1
E. LEZAMA - E. LARRABETZU	BI-30(N-637)	14,0
E. LARRABETZU - E. LEZAMA (BI-SS)	BI-30(N-637)	13,5
E. LEZAMA - E. LARRABETZU (SS-BI)	BI-30(N-637)	14,5
VISTA ALEGRE - E. GERNIKA S.	BI-635	6,2
BIDEBARRIETA - GOMEZEAGA	BI-633	10,2
E. ARRIGORRIAGA - UGAO/MIRABALLES	BI-625	9,1
LEMOA - IGORRE	N-240	15,2
ABADIÑO - APATAMONASTERIO	BI-3336(N-636)	6,6
E.SESTAO-E.TRAPAGARAN	BI-10(A-8)	7,4
E.SESTAO-E.TRAPAGARAN (BI-S)	BI-10(A-8)	7,6
E.TRAPAGARAN-E.SESTAO (S-BI)	BI-10(A-8)	7,3
E. LA ARENA-L.P. CANTABRIA	A-8	11,7

Tabla 1. Tramos de carreteras de Vizcaya donde la IMD de pesados supera a la media habitual (Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial, 2020)

consecuencias de un número elevado de pesados pueden resumirse en una mayor influencia en el tráfico circundante que la de los turismos. Asimismo, estos vehículos imponen efectos físicos y psicológicos en el tráfico circundante debido a sus características físicas y operativas. Por un lado, Moridpour, Mazloumi y Mesbah (2015) afirman que los camiones ligeros y los turismos tienen una influencia similar en las características del tráfico circundante mientras que los tiempos medios de viaje aumentan cuando la proporción de camiones pesados se incrementa en cada carril. En general, los camiones pesados tienen una velocidad inferior a la de los turismos. Por lo tanto, el aumento de la proporción de camiones pesados puede dar lugar a oscilaciones en la velocidad y aumento de los tiempos medios de viaje, especialmente con densidades de tráfico altas.

En los apartados siguientes se resumen dos medidas que podrían ser efectivas para reducir los problemas generados por los vehículos pesados en vías congestionadas.

2.3.1 Sistemas de Platooning

El platooning de camiones es la unión de dos o más camiones en convoy utilizando tecnología de conectividad y sistemas de apoyo a la conducción automatizada. Estos vehículos mantienen automáticamente una distancia determinada y cercana entre sí cuando se conectan en determinadas partes del trayecto, por ejemplo, en las autopistas y carreteras convencionales empleando solamente un conductor físico en el primer vehículo. Por lo tanto, en estos sistemas el camión que encabeza el pelotón actúa como líder, y los vehículos que le siguen reaccionan y se adaptan a los cambios en su movimiento. Además, el sistema puede adaptarse para que los conductores del resto de vehículos puedan mantener el control de sus camiones en todo momento, por lo que también pueden decidir abandonar el pelotón y conducir de forma independiente.

Está más que demostrada la eficiencia de aplicación del platooning en términos de aumento de la capacidad de las infraestructuras. Además, la reducción de la distancia entre vehículos aumenta la tasa de ocupación y, por tanto, el flujo para una determinada velocidad media (Michael, Godbole, Lygeros y Sengupta, 1998). Sin embargo, según indican Jacob y de Chalendar (2019) existen varias circunstancias a tener en cuenta de cara a gestionar las infraestructuras en determinadas condiciones de tráfico:

- Congestión (stop and go), en la que el índice de ocupación ya está saturado y, por tanto, el pelotón no es eficiente.
- Tráfico libre, cuando la demanda no supera la capacidad del carril, el pelotón no es necesario, sino por razones aerodinámicas y de ahorro de combustible.
- Cerca del límite de capacidad del carril, los vehículos sucesivos empiezan a estar en interacción, induciendo tráfico de parada y arranque y cambios bruscos de velocidad.

Por lo tanto, el pelotón puede aumentar la capacidad del carril y, por tanto, alejar las perturbaciones que conducen a una caída del flujo y a un aumento del consumo de combustible en determinadas condiciones.

Otro de los parámetros estudiados para la maximización de la capacidad es el tamaño óptimo del platooning. Jo, Kim, Oh, Kim y Lee (2019) han establecido, en su estudio para las carreteras de Corea, un tamaño óptimo de 2 camiones espaciados 6 metros para obtener capacidades en torno a los 2100 vehículos pesados a la hora por carril.

Un estudio del Canadian National Research Center (CNRC) calculó el aumento de capacidad teórico en la infraestructura a diferentes velocidades en función de la velocidad, mostrado en la Figura 12.

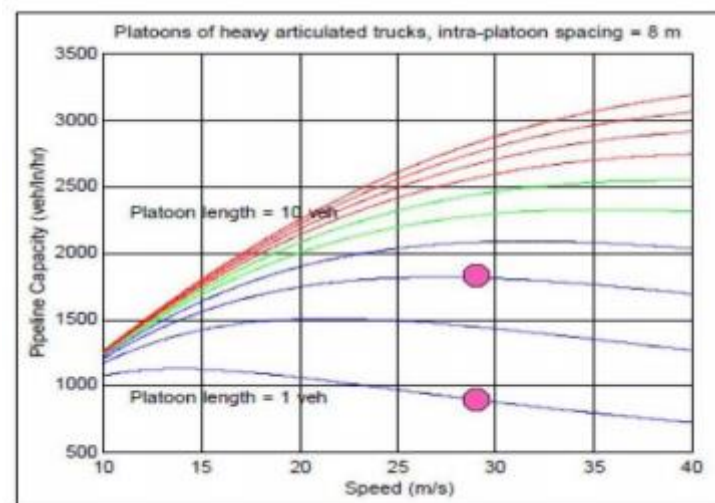


Figura 12. Aumento de la capacidad en función de la velocidad y la longitud del platooning Fuente: Canadian National Research Center

2.3.2 Electric Roads

Una carretera eléctrica, eRoad, eHighway o Electric Road System (ERS) es un sistema que permite la transferencia de energía entre un vehículo y la carretera por la que circula. Las carreteras eléctricas se clasifican en tres categorías en función de la forma en que se realiza la carga:

- Catenarias aéreas (Figura 13): en este tipo de carga la energía se transfiere continuamente desde las líneas aéreas al vehículo a través de un pantógrafo. La carga conductora aérea es más adecuada para camiones y autobuses que tienen la altura suficiente para llegar a las líneas eléctricas. También funciona mejor con los vehículos que se desplazan por una ruta preestablecida para que puedan estar continuamente conectados a las líneas eléctricas. Son actualmente los sistemas de carretera eléctrica más maduros.
- Transferencia de energía conductiva desde la carretera: es similar a la tecnología aérea, salvo que, en lugar de un pantógrafo, la energía se transfiere al vehículo a través de raíles incrustados en la superficie de la carretera o sobre ella. Esta tecnología incluye un brazo mecánico a bordo que se conecta con la fuente de alimentación.
- Transferencia de energía inductiva desde la carretera: en este caso, la transferencia de energía tiene lugar entre las bobinas incrustadas en la carretera y las bobinas en el vehículo sin necesidad de cables. La energía procedente de la red se convierte en energía de CA de alta frecuencia para crear un campo magnético que es recogido por las bobinas situadas bajo el vehículo para producir tensión.

Cuando un coche o un camión circula por una carretera equipado con alguna de estas tecnologías, la energía va directamente al sistema de propulsión o se utiliza para cargar las baterías de a bordo. Una vez que el vehículo esté en una carretera normal, cambiará a un motor eléctrico, híbrido o a un motor de combustión.

En cuanto a los beneficios de este tipo de infraestructuras, Börjesson, Johansson y Kågeson (2021) han establecido que el mayor beneficio procede del ahorro de costes de explotación para los transportistas,

simplemente porque es más barato abastecer de combustible a los camiones con electricidad que con gasóleo. El segundo beneficio más importante es la reducción de las emisiones contaminantes.



Figura 13. Prototipos de funcionamiento de sistemas ERS mediante catenaria aérea

Este tipo de tecnología podría ser útil, por lo tanto, en el caso de aquellas carreteras que presenten una gran cantidad de tráfico de vehículos pesados y donde uno o más carriles puedan dedicarse a la circulación de este tipo de vehículos con sistemas ERS. Mediante esta tecnología no se consiguen mejoras de capacidad, pero sí la eliminación de ruidos y emisiones contaminantes, así como potenciales mejoras en la seguridad vial.

3 Información sobre costes de implantación

3.1 Sistemas de guiado mediante PMVs

El coste de este tipo de sistemas es dependiente del tipo y número de PMVs necesarios para realizar una correcta labor de guiado de los vehículos. Además, también hay que tener en cuenta los costes de instalación, operación y mantenimiento de estos PMVs.

Estos costes pueden oscilar, a nivel de instalación y para el caso de los Estados Unidos, entre 50.000 y 250.000\$ dependiendo del tipo de señalización y si ésta es portátil, permanente o semi-permanente. Además, estos sistemas implican costes de mantenimiento que según el suministrador pueden estar entre los 2.000 – 2.500\$ por mes y por dispositivo. Por ejemplo, en el caso de Glenwood Canyon (Colorado) los costes de instalación de un panel de mensajería dinámica fueron de 321.000\$ y el propio dispositivo tuvo unos costes de entre 45.400\$ y 112.000\$. En cuanto a los costes operativos, son generalmente bajos, menores a los 50.000\$ para toda la vida del dispositivo (National Center for Rural Road Safety, 2018).

Otro ejemplo, en este caso obtenido del Reino Unido, es el proyecto para la mejora vehicular y la señalización peatonal en el área de Wembley. Este proyecto implicó la instalación de nueve PMVs con un coste de 255.000 libras (155.000 para los dispositivos y 100.000 para la instalación y puesta a punto).

Otras empresas ofrecen PMVs a precios por metro cuadrado oscilando entre los 800 dólares y los 1.500\$ el metro cuadrado. En España los paneles de guiado y con capacidad para detectar vía radar la velocidad de los vehículos, presentan precios entre los 6.000€ y los 10.000€, en los modelos más sencillos que se encuentran en zonas urbanas y carreteras convencionales, según datos recabados a partir de proveedores de este tipo de señalización.

3.2 Sistemas basados en vehículos conectados

Dado que por el momento existen pocos proyectos, más allá de casos piloto, de implantación de sistemas de conectividad entre vehículos y de los vehículos con la infraestructura, es difícil realizar estimaciones realistas sobre los costes de este tipo de sistemas. Además, los sistemas V2I y V2V están todavía en desarrollo, por lo que no existen soluciones estandarizadas que describan con detalle todos los elementos que van a implicar su implantación en condiciones reales.

National Academies of Sciences (2020) ha propuesto, en base al conocimiento experto, un listado de componentes y sus costes asociados necesarios para contar con una auténtica infraestructura válida para la implantación de los vehículos conectados. Según sus estimaciones, los costes se distribuirían porcentualmente de la siguiente forma:

Componente	Porcentaje
Elementos de comunicación en la carretera	15%
Equipos ITS – Nuevos o actualización de los existentes	10%
Red de comunicaciones	10%
Back Office/Sistemas de soporte	14%
Plataforma de Vehículos Autónomo y desarrollo de aplicación	25%
Estándar para la conectividad de los vehículos	2%
Gestión de programas	13%
Entrenamiento	1%

Tabla 2. Coste relativo de distintos elementos para la conectividad de los vehículos e infraestructura

National Academies of Sciences (2020) ha estimado también los siguientes costes para diferentes elementos necesarios para implantar una infraestructura para los vehículos conectados. Estos costes son cantidades aproximadas basadas en el conocimiento experto y en casos de estudio de EE.UU.

- Elementos de comunicación en la carretera
 - Equipos de comunicación en la carretera: 5.000\$ la unidad más 5.000\$ para la instalación, integración y testeo, más 250\$ para el mantenimiento anual de cada una de estas unidades.
 - Controladores de tráfico: de 6.000\$ a 11.000\$ la unidad más 10.000\$ de instalación, integración y testeo, más 850\$ de mantenimiento anual.
- Otro equipamiento ITS
 - Sensores de tráfico: 7.000\$ a 10.000\$ la unidad más 10.000\$ de instalación, integración y testeo, y 280\$ de mantenimiento anual.
 - Sensores peatonales: 400\$ a 800\$ la unidad, más 800\$ de instalación, integración y testeo, y 60\$ de mantenimiento anual.
 - Sensores/estaciones medioambientales: 10.000\$ a 35.000\$ la unidad, más 15.000\$ de instalación, integración y testeo, más 2.250\$ de mantenimiento anual.
- Red de comunicaciones
 - Instalación de cable de fibra óptica en zona urbana: 150.000\$ a 200.000\$ por milla.
 - Instalación de cable de fibra óptica en zona rural o suburbana: 21.000\$ a 55.000\$ por milla.
- Sistemas de soporte
 - Sistema de seguridad: 15.000\$ a 50.000\$ anuales.
 - Sistema Back Office: 50.000\$ a 800.000\$.
 - Aplicaciones V2I: 100.000\$ a 200.000\$ por cada aplicación más un 10% de soporte y mantenimiento al año.
 - Sistema de gestión de prioridad del tráfico multimodal: 500.000\$.

3.3 Sistemas Ramp Metering

La Federal Highway Administration de EE.UU. cuenta con una herramienta para realización de análisis coste/beneficio de distintos sistemas de gestión y operación del tráfico, incluidos los sistemas de ramp metering (Federal Highway Administration, 2012). Según esta herramienta, un sistema de ramp metering con control centralizado tiene un coste de unos 420.000\$ en concepto de hardware, software e integración con otros sistemas y de unos 100.000\$ de coste anual de mantenimiento. Además, cada instalación en una rampa presenta un coste de unos 123.000\$ más 3.200\$ anuales de mantenimiento considerando todas las adaptaciones y señalización necesaria. Estos costes son sensiblemente inferiores en el caso de los sistemas de ramp metering con un funcionamiento a intervalos fijos. En este caso el sistema puede tener un coste de unos 50.000\$ por instalación más algo más de 2.000\$ de mantenimiento anual.

En una línea similar, el departamento de Transporte de North Carolina (NCDOT) elaboró en 2013 un estudio sobre los costes de los sistemas de ramp metering (North Carolina Department of Transportation, 2013). El diseño más simple, con una rampa de un solo carril, presenta según estas estimaciones un coste total de diseño y construcción de algo más de 100.000\$. A medida que los diseños son más complejos, los costes aumentan a partir de esta cifra inicial. Así, para el caso de rampas de dos carriles el coste se situaría en el entorno de los 140.000\$, para rampas de un carril y by-pass para el transporte público en 167.000\$ y para el caso de ramp metering de autopista a autopista 323.900\$. Según NCDOT estos costes se incrementan si se tiene en cuenta el hardware, software, infraestructuras de comunicación y entrenamiento necesarios para el funcionamiento del sistema ramp metering. Según estas estimaciones la suma de estos conceptos, software centralizado, integración con software preexistente, entrenamiento del personal, instalación, servidores y comunicaciones puede situarse en el entorno de los 400.000\$ a 500.000\$.

3.4 Sistemas de Velocidad Variable

Existe una cantidad limitada de información sobre el coste de los sistemas de velocidad variable. Katz et al. (2017) estimaron, a partir de entrevistas directas con operadores de infraestructuras para el caso de los EE.UU., costes que pueden ir de los 10 a los 40 millones de dólares. Estos costes pueden ser significativamente inferiores si existe ya cierta infraestructura ITS como detectores de tráfico y PMVs que puedan ser utilizados para las indicaciones de velocidad variable. Estos autores recogen también las inversiones realizadas en los sistemas de velocidad variable para el caso de varias autopistas americanas: 16 millones de dólares la I-35W (tramo de 29 kilómetros), 10 millones la I-94 (tramo de 16 kilómetros) y 39 millones la I-66 (tramo de 21 kilómetros). Este último caso presentó un coste superior dado que se requirió la instalación de infraestructuras de comunicación, cámaras y pórticos, mientras que en los otros casos éstos estaban parcialmente disponibles. Estos costes declarados representan una inversión de entre 550.000\$ y 1,8 millones de dólares el kilómetro.

La Federal Highway Administration considera en su herramienta para realización de análisis coste/beneficio de distintos sistemas de gestión y operación del tráfico, los sistemas de velocidad variable y de control dinámico de los carriles (Federal Highway Administration, 2012). Los costes estimados son de unos 500.000\$ para el diseño del sistema, el software, el hardware y las labores de ingeniería de tráfico más 4.400\$ anuales para el mantenimiento. Además, los costes se pueden incrementar en gran medida si se consideran pórticos con grandes paneles de mensajería dinámica y

sistemas de cámaras (920.000\$/u), sistemas para la limitación de velocidad (10.000\$/u), detectores en pórticos (10.000\$/por carril) y otros sistemas adicionales.

3.5 Uso de arcenes

Los costes relativos a la política de incremento de capacidad mediante el uso de arcenes se relacionan con la puesta a punto de éstos en las condiciones adecuadas de seguridad. Esto puede requerir desde la ampliación del arcén, la creación de zonas de emergencia adicionales o su modificación para asegurar que puedan volver a su estado original tras su uso.

Los costes disponibles en algunas áreas de estudio son:

- Alpharetta, Georgia. El arcén es utilizado para el tráfico de vehículos de transporte público en un recorrido de 12 millas (19 kilómetros). La adaptación del arcén tuvo en coste de 2,8 millones de dólares (147.368\$ el kilómetro) para el ensanchamiento de 60 centímetros del arcén y el refuerzo del pavimento.
- Miami, Florida, I-95 Express Lane. En este caso el arcén puede ser utilizado por furgonetas registradas, coches compartidos por tres personas, coches híbridos registrados, motos y buses. El arcén puede utilizarse con velocidades de hasta 55 millas por hora (88 km/h) y puede presentar un peaje para determinados vehículos. El coste del proyecto fue de 43,4 millones de dólares para una longitud de 21 millas (34 kilómetros), es decir, 1,276 millones de dólares el kilómetro.
- Minnesota. El proyecto consistió en la conversión de un segmento del arcén izquierdo de la autopista I-35W a tráfico abierto con pago por peaje. El arcén varía entre una anchura de 17 a 19 pies (5 a 5,8 metros) con un coste de 13 millones de dólares para habilitar y pavimentar correctamente el arcén y el resto de los carriles en un recorrido de unas tres millas (4,8 kilómetros).
- Virginia, I-66. El proyecto de renovación de los arcenes para permitir la circulación y establecer un sistema de control tuvo un coste de 7 millones de dólares para un tramo de 6 millas (9,6 kilómetros).

En la Figura 14 pueden consultarse los costes de instalación de arcenes para circulación en casos de Estados Unidos. Estos varían desde los 1.500\$ por milla cuando la necesidad de realizar modificaciones es mínima, los 30.000\$ por milla para la creación de arcenes de 12 pies en proyectos de nueva construcción, hasta los 80.000\$ a 100.000\$ por milla en autopistas existentes donde el arcén deba ser reemplazado.

Condition	Costs Plus Signing & Striping
Shoulder width and bituminous depth are adequate. Catch basins do not need adjustment. Signing and striping are only requirements.	\$1,500 per mile—Freeway \$2,500 per mile—Expressway
Shoulder width and bituminous depth are adequate. Minor shoulder repairs and catch basin adjustments are needed.	\$5,000 per mile—Freeway \$5,000 per mile—Expressway
Shoulder width is adequate but bituminous depth requires a 2-inch overlay. This assumes shoulder and roadway can be overlaid at the same time.	\$12,000 per mile—Freeway \$12,000 per mile—Expressway
Same as above but adjacent roadway is not being overlaid. Shoulder must be removed, granular base adjusted, and increased bituminous depth replaced.	\$80,000–\$100,000 per mile
Shoulder width and depth replacement are required.	\$42,000–\$66,000 per mile for both freeway and expressway
Installing a 12-ft shoulder rather than a 10-ft shoulder in a new construction project.	\$30,000 per mile for both freeway and expressway

Figura 14. Costes de instalación del uso de arcenes. Fuente: Kuhn (2010)

3.6 Sistemas de Platooning

En términos de coste, el establecimiento de un sistema de platooning dentro de la gestión de la infraestructura no tiene que suponer nuevas inversiones para el gestor de ésta. Los propietarios del material rodante pueden adaptarlo para que la técnica del platooning esté disponible en sus vehículos, si bien también puede ser interesante combinar esta técnica con las posibilidades abiertas por las tecnologías V2I (véase apartado 3.2) que sí pueden tener unos elevados costes de implantación. En casos específicos se puede fomentar el uso de esta tecnología mediante la dedicación de carriles exclusivos al tráfico de vehículos pesados conectados, lo cual implica un coste derivado de la adaptación de la infraestructura.

3.7 Sistemas de Electric roads

Este tipo de sistemas pueden presentar costes de instalación significativos. Del lado de la infraestructura, entendiendo que la adaptación de las flotas es responsabilidad de los operadores, consisten en la línea de suministro desde el punto de alimentación hasta la subestación, así como de la propia subestación a la infraestructura de suministro de energía a lo largo de la carretera. También pueden producirse costes derivados de la adquisición de equipos de protección pasiva y por adaptaciones estructurales de la carretera.

Las principales diferencias en los costes de los distintos sistemas ERS están relacionadas con la infraestructura de suministro de energía a lo largo de la carretera, es decir, mástiles y líneas aéreas o cableado longitudinal, dispositivos de conmutación y carriles conductores, o bien cableado longitudinal y bucles de inducción.

Además de las incertidumbres fundamentales, que pueden justificarse por la fase tecnológica inicial, pueden producirse considerables diferencias de costes en función del rendimiento supuesto del sistema y de la distancia a la red de media tensión. Así pueden darse rangos de costes de entre 1,7 a 4,1 millones de euros por kilómetro para la línea aérea tal y como se deriva de los proyectos piloto ENUBA y ELISA desarrollados en Alemania.

El índice de costes se refiere a equipar un kilómetro de carretera con infraestructura de línea aérea en ambos sentidos de la marcha e incluye todos los costes a partir de la conexión a la red de media tensión. La construcción de una red comparable basada en una tecnología ferroviaria se estima actualmente en un coste con un orden de magnitud similar, mientras que el sistema inductivo, al encontrarse en una fase más experimental, puede presentar costes de un orden de magnitud superior.

Los ahorros debidos a la electrificación parcial no son proporcionales, dado que hay que transferir a los vehículos la misma cantidad total de energía por distancia. Por lo tanto, no es posible ahorrar en los componentes y subsistemas correspondientes, ya que sus costes se correlacionan con la capacidad instalada. Entre ellos se encuentran, sobre todo, las subestaciones, incluida su conexión a la red de media tensión.

Por otro lado, Börjesson et al. (2021) han establecido las principales bases de la explotación de carreteras eléctricas por operadores, argumentando a favor de la explotación y propiedad pública de las carreteras eléctricas.

- En primer lugar, es poco probable que los inversores privados estén dispuestos a asumir los riesgos de una inversión de este tipo. Hay al menos dos grandes riesgos de inversión. El primero es que los costes de inversión y mantenimiento sean mayores de lo estimado. Los costes son inciertos, ya que aún no existe una red de carreteras eléctricas a gran escala en funcionamiento. El segundo riesgo es que el desarrollo de las baterías permita, a largo plazo, el funcionamiento al 100% de las mismas. El uso de pilas de combustible es otra tecnología competidora, actualmente demasiado cara pero que quizá gane terreno a medio-largo plazo. Sin embargo, la solución de aplicar una transmisión eléctrica intermitente que requiera camiones equipados con baterías más grandes, de los cuales algunos podrían no tener ni siquiera un motor diésel, permitiría cubrir en cierta medida el riesgo, ya que reduce el coste de la inversión, pero logrando el mismo coste de combustible y la misma reducción de emisiones de carbono.
- En segundo lugar, las grandes economías de escala y de alcance (es decir, que la red de carreteras eléctricas debe ser extensa para que los beneficios potenciales se materialicen plenamente) hacen que la inversión sea arriesgada y probablemente demasiado grande para un inversor privado.
- En tercer lugar, un operador privado tendría que ser regulado eventualmente. Mientras sigan existiendo camiones diésel, las tarifas de usuario fijadas por el operador de carreteras eléctricas monopolista se verán limitadas por su competencia. Sin embargo, si los camiones diésel se ven totalmente superados por la competencia, la tarificación de la carretera eléctrica deberá ser regulada por un ente público.
- En cuarto lugar, la propiedad privada de la infraestructura eléctrica en una carretera de titularidad pública implica la división de la propiedad y la responsabilidad del mantenimiento. Esto puede provocar pérdidas de eficiencia y plantear problemas de responsabilidad y gestión de riesgos asociados.

4 Propuesta de Equipamiento Tecnológico para el II PTS de Carreteras de Bizkaia

4.1 Nuevas tendencias a aplicar

Tras el análisis genérico realizado en apartados previos de las nuevas tecnologías disponibles, se procede a continuación a analizar más en detalle aquellas que podrían tener una implantación directa en la red de carreteras de Bizkaia.

Los principales avances tecnológicos que influirán en la planificación de carreteras del Territorio Histórico y sus consecuencias potenciales son:

VEHÍCULO CONECTADO

Desde hace unos años la necesidad de estar conectado en todo momento ha llevado a que el vehículo sea un medio más de conexión y colaboración con el entorno. Este vehículo conectado funcionará a su vez como sensor, facilitando información en tiempo real al gestor de la carretera (V2I) y a otros vehículos (V2V) y permitiendo desarrollar una gestión de la demanda en tiempo real más eficaz.

Los sistemas de transporte inteligente cooperativos (C-ITS) abarcan un grupo de tecnologías y aplicaciones que permiten un intercambio de datos eficaz a través de tecnologías de comunicación inalámbrica entre componentes y actores del sistema de transporte, entre vehículos (vehículo a vehículo o V2V) o entre vehículos e infraestructura (vehículo a infraestructura o V2I).

El despliegue de C-ITS en Europa se enfrenta a cuestiones importantes aún no resueltas, tales como cuestiones legales, de arquitectura, administrativas, de gobierno, técnicas y de normalización, así como a las licitaciones de implementación y adquisición.

Los sistemas C-ITS tienen un impacto beneficioso en la seguridad vial. Con objeto de garantizar una solución europea armonizada, 18 Estados y 7 socios de la Plataforma C-Roads, financiada por la UE, han definido normas concretas para los servicios de C-ITS, han elaborado recomendaciones para su despliegue y han empezado a probar estos servicios en proyectos piloto nacionales.

En la actualidad, C-Roads ha demostrado que la información de tráfico relacionada con la seguridad puede transmitirse desde el operador de la infraestructura al vehículo en tiempo real y en función de la ubicación. Se han instalado dispositivos y sensores a lo largo de tramos de carretera cruciales en toda Europa para conectar las carreteras y los vehículos. Las tecnologías constan de una combinación de frecuencias exclusivas de corto alcance (norma ITS-G5) y de comunicaciones basadas en redes móviles para cubrir distancias más largas.

El denominador común de C-Roads para todas las actividades de pruebas e implantación entre los operadores de infraestructuras y la industria del automóvil es el perfil de comunicación armonizado de la plataforma C-Roads, que se ha elaborado conjuntamente y está disponible de forma gratuita. En la actualidad, el perfil de comunicación armonizado se ha distribuido a más de 480 personas e instituciones de 50 países de todo el mundo.

Desde 2016, las carreteras de toda Europa están equipadas con una infraestructura inteligente para ayudar a los viajeros europeos. Se empezó por los puntos calientes de autopistas y ciudades, y ya se han equipado

un total de 20 000 km de tramos de carretera con unidades ITS-G5. Además, un total de 100 000 km ya está cubierto con tecnologías de comunicación móvil o de largo alcance. Al mismo tiempo, se invirtieron más de 3000 horas en pruebas exhaustivas de automóviles y servicios en toda Europa, en estrecha coordinación con los principales representantes de los OEM.

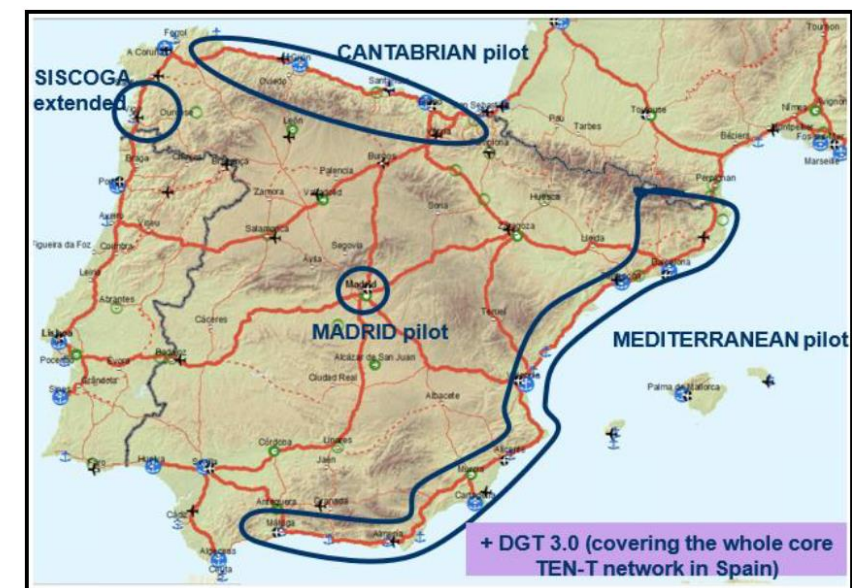
El despliegue de los C-ITS será un proceso evolutivo que comenzará con los casos de uso menos complejos. Estos se conocen como servicios "Day 1", que abarcan mensajes sobre notificaciones de ubicaciones o situaciones de peligro, así como aplicaciones de señalización. En una segunda etapa, también se desplegarán los servicios "Day 1.5".

- Servicios "Day 1"
 - Vehículos lentos o parados y advertencia de tráfico delante
 - Advertencia de obras en la carretera
 - Condiciones climatológicas
 - Luz de frenado de emergencia
 - Sondeo de datos del vehículo (PVD. Probe Vehicle Data).
- Servicios "Day 1.5"
 - Información Park & Ride.
 - Información de tráfico y Smart routing.

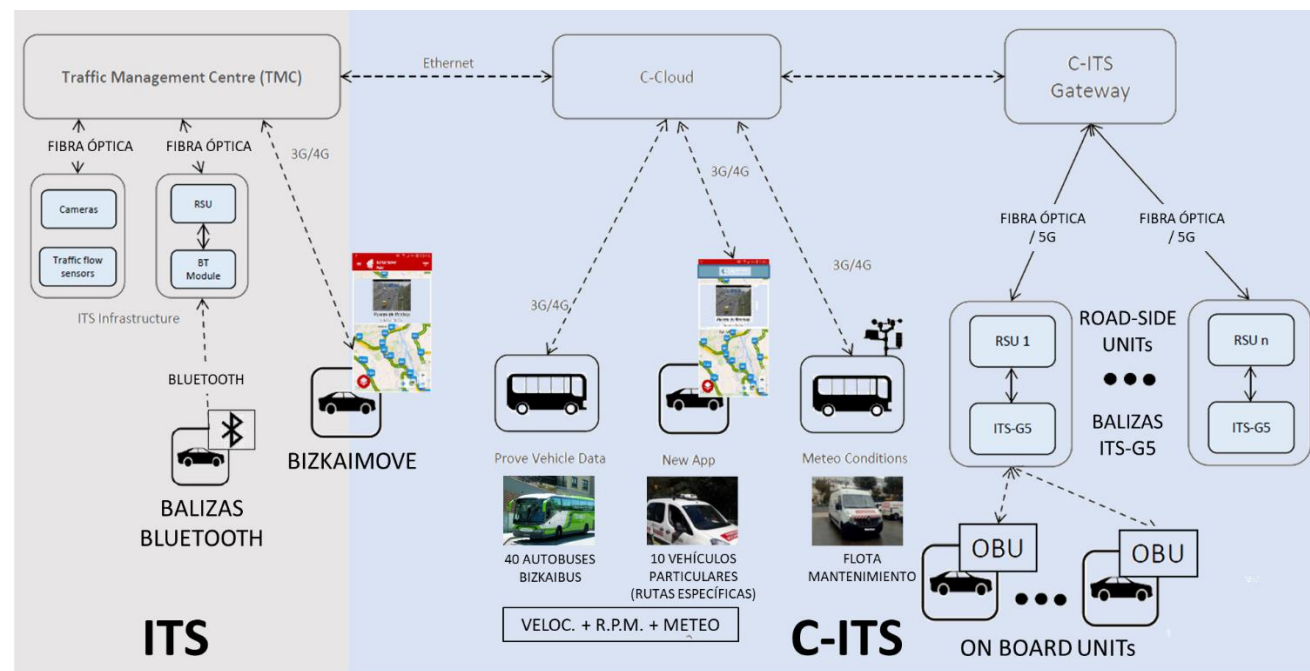
Adicionalmente se implementará el servicio de alerta cooperativa de riesgo de colisión, consistiendo en el suministro de información sobre riesgo de colisión debido a la presencia de vehículos de inspección en la carretera.

En Bizkaia se está desarrollando uno de los 5 pilotos del proyecto C-Roads que van a ser implementados en España, concretamente el denominado "Piloto Cantábrico" que se está desplegando a lo largo de 75 km aproximadamente en las siguientes secciones de carreteras localizadas en Galicia, Asturias y País Vasco:

- A8 en Montoñedo/Galicia – desde PK 536 a PK 552
- A8 en Asturias – desde PK 374 a PK 394
- A8/AP8 en el País Vasco – desde PK 100 a PK 139



Localización de los pilotos C-ROADS Spain (Fuente: C-Roads Annual pilot overview report 2018)



Esquema de implementación de caso piloto en Bizkaia para el proyecto europeo C-Roads (Fuente: XVIII Congreso Español de Sistemas Inteligentes de Transporte)

En la imagen anterior se adjunta una representación esquemática de la implementación realizada en el piloto desarrollado en Bizkaia en el marco del proyecto C-Roads, en el que se pueden observar las siguientes tecnologías utilizadas a modo de demostrador:

- Balizas bluetooth que interactúan con dispositivos BT en el vehículo obteniendo dirección MAC (identificador único), fecha y hora de la detección, tipo de dispositivo detectado y nivel de señal recibida. El sistema ejecuta una serie de algoritmos que permiten hacer un seguimiento del vehículo a través de la red al paso por diferentes balizas. Esto permite, entre otras cosas, el cálculo de tiempos de viaje, la realización de matrices origen/destino, la localización de accidentes o el análisis de congestiones recurrentes. En el marco del proyecto C-Roads se han instalado un total de 6 balizas BT en la margen derecha de la ría del Nervión. Posteriormente se han instalado más unidades en diferentes puntos de la red de carreteras.
- Aplicación BIZKAIMOVE como herramienta bidireccional de comunicación con los usuarios de la red de carreteras, informando en todo momento sobre el estado del tráfico, condiciones meteorológicas, imágenes de video de puntos clave, incidentes y obras en la red, así como proponiendo recorridos alternativos en base a toda la información disponible.
- Vehículos específicos para la captura de información de la red
 - Autobuses de Bizkaibus con rutas específicas con captura de velocidad y r.p.m.
 - Vehículos particulares para cubrir rutas determinadas con captura de velocidad, r.p.m., incidentes y condiciones climáticas en las vías.
 - Flota de mantenimiento con captura automática de condiciones climáticas.
- Balizas ITS-G5 para la transmitir y recoger datos para que la infraestructura, el vehículo y el gestor de red viaria compartan en tiempo real datos e información.

VEHÍCULO AUTÓNOMO

La evolución natural del vehículo conectado, gracias a tecnologías incipientes como V2C, V2V y V2X (acrónimos de Vehicle to Car, Vehicle to Vehicle y, finalmente, Vehicle to Everything), empleando conexiones inalámbricas a gran velocidad como las que ofrecen el 5G y tecnologías venideras, permitirá que toda la red viaria esté conectada y facilitará el intercambio de datos en tiempo real para una conducción más segura y responsable.

El vehículo conectado inteligente deberá utilizar toda la información disponible para tomar decisiones por su cuenta, de manera automática. Esto afectará a su funcionamiento, analizando que todo esté en buen estado, pero también a la asistencia durante la conducción y, en su versión más sofisticada, la conducción autónoma.

Se aceptan a día de hoy 5 niveles de grados de automatización progresiva de la conducción:

- **Nivel 0: Sin automatización en la conducción**
Todas las acciones son realizadas en su totalidad por el conductor.
- **Nivel 1: Asistencia en la conducción**
El vehículo cuenta con algún sistema de ayuda a la conducción, como por ejemplo: Mantenimiento del carril, controles de velocidad adaptativos o no. Este nivel está pensado para que el conductor pueda tener una conducción más cómoda, es una ayuda que mejora la seguridad al volante.
- **Nivel 2: Automatización parcial**
Se precisa conductor, aunque este no realiza tareas relativas al movimiento. El vehículo cuenta con control de movimiento tanto longitudinal como lateral, aunque no tiene detección y respuesta ante objetos. El vehículo tiene capacidad de actuar de forma independiente ya que puede realizar una o varias tareas hasta ahora realizadas por el conductor.
- **Nivel 3: Automatización condicionada**
Se precisa conductor y aunque la autonomía sea más elevada, este debe estar atento para intervenir. Tiene sistemas de automatización en lo referente al control de movimiento longitudinal y lateral; detección y respuesta ante objetos. El vehículo puede decidir cuándo cambiar de carril, frenar para evitar colisionar con otro vehículo, etc., pero, el factor humano sigue siendo clave ya que el sistema puede precisar de su intervención.
- **Nivel 4: Automatización elevada**
No se precisa de la intervención humana en ningún momento ya que es el propio vehículo el que controla el tráfico y las condiciones del entorno, define la ruta o alternativas y responde ante cualquier situación. En el caso de existir algún fallo del sistema principal, el vehículo cuenta con respaldo para actuar y seguir conduciendo.
- **Nivel 5: Automatización completa**
El vehículo tiene la capacidad, bajo demanda realizada a través del interfaz por el que se introducen las órdenes, de ir a cualquier lugar sin necesidad de volante, pedales o mandos, ya que, el vehículo cuenta con sistemas de automatización a todos los niveles. A este nivel la figura del conductor no existe. Se sube al vehículo, se le indica el destino y este se pondrá en marcha. Cuentan con un sistema de automatización que en caso de fallo se respaldará con otro sistema, por lo que, él mismo solucionará cualquier imprevisto.

Según las últimas previsiones, una implementación real de altos niveles de autonomía de los vehículos se espera para escenarios temporales no anteriores a 2035.

VEHÍCULO ELÉCTRICO

Se trata en este caso de una tecnología ya existente, pero que sin duda en el futuro experimentará un gran desarrollo, especialmente en el ámbito metropolitano, en donde su implantación se ve facilitada por una menor necesidad de autonomía de los vehículos. Los cambios más significativos que la introducción de este tipo de vehículos ha supuesto para la infraestructura en aquellos países donde su implantación es mayor, son:

- La aparición de sistemas que permitan una carga rápida de los vehículos eléctricos.
- La necesidad de infraestructura que permita la conexión de los puntos de carga a la red eléctrica.
- La aparición de carriles, zonas reservadas o con prioridad para los vehículos eléctricos.
- Carriles de carga de batería con vehículos en movimiento.
- La reserva de zonas exclusivas de aparcamiento

Según las últimas previsiones en el sector, el vehículo eléctrico es y seguirá siendo una de las grandes apuestas de los fabricantes también en la próxima década. Su velocidad de desarrollo está muy condicionada al desarrollo de baterías e infraestructura de carga por parte de los fabricantes, las grandes barreras al avance de esta tecnología.

NUEVOS CONCEPTOS DE MOVILIDAD

Pago por uso de pesados

La mayor parte de los gobiernos europeos ya aplica sistemas de pago por uso a los vehículos pesados utilizados para el transporte de mercancías por carretera y con un peso superior a 3,5 toneladas. Y las instituciones comunitarias han ido aprobando en los últimos años normativas que defienden los principios de "quien usa, paga" y "quien contamina, paga". En concreto, la directiva 2011/76/UE ya regula la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías a fin de reducir las repercusiones negativas o externalidades de este tipo de transporte.

La Comisión Europea establece una serie de condiciones muy claras y precisas para la implantación del sistema de pago por uso:

- No discriminación por nacionalidad, origen o destino del transporte, así como el Estado (miembro o no de la UE) de matriculación del vehículo.
- El sistema no debe suponer un obstáculo a la libertad de movimiento, por lo que se deberá fomentar el uso de nuevas tecnologías que permitan gestionar con mayor eficiencia la demanda de transporte.
- El sistema de incentivos y, en su caso, las cantidades recaudadas a través del canon deben destinarse a la financiación de los costes de construcción, explotación, mantenimiento y desarrollo de la red de infraestructura de que se trate, buscando optimizar el desarrollo de la totalidad del sistema de transportes, así como el beneficio del sector de transporte en su conjunto.

Para el cobro por uso se colocan una serie puntos de cobro (PC) o arcos de control con sistema free-flow, equipados con detectores de tránsito e identificadores de vehículos para poder aplicar un canon sin necesidad de detener el tráfico.

La identificación de los vehículos puede hacerse habitualmente de dos modos:

- Mediante el uso de la tecnología denominada DRSC (Dedicated Short Range Communications) según la cual los vehículos usuarios deben disponer de un dispositivo embarcado (OBE, TAG o Transponder) capaz de interactuar con los equipos situados en el PC.

- Identificación de la matrícula del vehículo para proceder al posterior cargo del tránsito, para lo cual es necesario que los usuarios se encuentren dados de alta en el sistema identificando un mecanismo de cargo (número de cuenta bancaria o de tarjeta de crédito) asociado a la matrícula.

Modalidades de vehículo compartido

Por otro lado, asociadas a las nuevas tecnologías de comunicación e información ya se está produciendo un auge de nuevas tendencias relacionadas con el coche compartido como son:

- Carpooling (compartir coche).
- Carsharing (alquiler de coche por periodos limitados).
- Movilidad como Servicio (MaaS – Mobility as a Service). Se ofrecen servicios de movilidad personalizados que incluyen coche privado y transporte público.

Como consecuencia de estos avances tecnológicos, la carretera deberá adaptarse para dar respuesta a las nuevas necesidades, conformando lo que se ha venido en llamar "infraestructura inteligente", para asegurar el máximo seguimiento e interoperabilidad de las diferentes formas de transporte. Para ello será necesario dotarla de los equipamientos precisos en cuanto a comunicaciones, sensorización y energía, de manera que se posibilite la interconexión vehículo-infraestructura (v2i) y se facilite el desarrollo de las nuevas tecnologías y formas de movilidad, que a su vez supondrán implicaciones beneficiosas en el campo de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Las nuevas tecnologías también deberán desempeñar una función preponderante para favorecer los intercambios modales, mediante el desarrollo de sistemas de información on-line y de reserva y pago electrónicos que abarquen todos los medios de transporte.

4.2 Mecanismos de intervención

Los avances tecnológicos en el equipamiento de carreteras presentan, sin duda alguna, nuevas oportunidades, aunque su implantación requerirá de esfuerzos en diversos frentes, siendo necesarios modelos de colaboración y financiación, tanto pública como privada, que permitan introducir de manera escalonada las nuevas tecnologías en las infraestructuras.

El papel de las administraciones públicas es clave a la hora de proporcionar orientación y supervisión y, sobre todo, de tomar la iniciativa necesaria para probar y financiar nuevas tecnologías de movilidad y transporte en sus fases iniciales.

Se identifican dos mecanismos de intervención de Diputación para la promoción, financiación y ejecución de iniciativas tecnológicas:

- **Intervención directa, para tecnologías probadas o en fases avanzadas de desarrollo:**
 - Exigencias en Pliegos de Contratación Pública.
 - Cláusulas de innovación en Pliegos de Contratación Pública.
 - Compra Pública Innovadora.
 - Financiación de proyectos piloto en la ejecución de contratos públicos.
- **Colaboración con otros agentes, para tecnologías en fases iniciales de desarrollo tecnológico y primeros demostradores en corredores específicos de la red:**

- Convenios de colaboración con centros tecnológicos y/o universidades y/o entidades sin ánimo de lucro.
- Asociación con empresas en proyectos europeos de innovación.
- Ofrecimiento de la red viaria foral como campo de pruebas para las soluciones innovadoras de las empresas y centros de investigación.

Se identifican a continuación una serie de tecnologías a implementar en diferentes puntos de la red de carreteras, asociándolas a las diferentes macro tendencias tecnológicas identificadas y estableciendo para cada una de ellas el potencial rol de la DFB para su promoción e implantación, clasificándolas entre tecnologías en las cuales se propone una intervención directa y aquellas otras en las que, debido a su grado de madurez tecnológica o a otros condicionantes, es aconsejable para su implantación la colaboración con otros agentes.

TENDENCIAS TECNOLÓGICAS	INTERVENCIÓN DIRECTA	COLABORACIÓN CON OTROS AGENTES
	* Exigencias en Pliegos de Contratación Pública. * Cláusulas de innovación en Pliegos. * Compra Pública Innovadora. * Financiación de proyectos piloto en la ejecución de contratos públicos.	* Convenios de colaboración con centros tecnológicos y/o universidades y/o entidades sin ánimo de lucro. * Asociación con empresas en proyectos europeos de innovación. * Ofrecimiento de la red viaria foral como campo de pruebas para las soluciones innovadoras de las empresas y centros de investigación.
VEHÍCULO CONECTADO	FIBRA ÓPTICA * En toda la red de alta capacidad BALIZAS BLUETOOTH * Cálculo de tiempos de viaje * Matrices origen/destino * Localización de accidentes BALIZAS ITS-G5 * Análisis de gestiones recurrentes GESTIÓN AVANZADA DEL DATO * Conectividad V2I gradual en toda la red * Adecuación de centros de control * Implementación de tecnologías IA para gestión avanzada del tráfico	CORREDOR COOPERATIVO * Conectividad 5G * Balizas de comunicación cooperativa (Road Side Unit) * Vehículos con tecnología cooperativa para testeos * Cámaras inteligentes * Sensores
VEHÍCULO AUTÓNOMO		CORREDOR COOPERATIVO * Participación en pilotos de proyectos de I+D+i
VEHÍCULO ELÉCTRICO		INFRAESTRUCTURA ASOCIADA A VEHÍCULO ELÉCTRICO * Sistemas para la carga rápida de los vehículos eléctricos. * Carriles, zonas reservadas o con prioridad para los vehículos eléctricos. * Carriles de carga de batería con vehículos en movimiento.
NUEVOS CONCEPTOS DE MOVILIDAD	PAGO POR USO PARA PESADOS * Puntos de cobro (PC) o arcos de control con sistema free-flow * Trackeo de vehículos pesados, transportes especiales y mercancías peligrosas. * Gestión automatizada mediante Big Data y/o inteligencia artificial.	MODALIDADES DE VEHÍCULO COMPARTIDO * Carpooling (compartir coche). * Carsharing (alquiler de coche por periodos limitados). * Movilidad como Servicio (MaaS – Mobility as a Service) o servicios de movilidad personalizados que incluyen coche privado y transporte público.

Tecnologías a implementar en diferentes puntos de la red de carreteras y potencial rol de la DFB

4.3 Actuaciones propuestas para equipamiento tecnológico

Se describe a continuación un programa de actuaciones como “Impulso a la movilidad conectada” con una serie de propuestas de equipamiento tecnológico en las que la DFB utilizará el mecanismo de intervención directa para su implementación.

FASE	PERIODO TEMPORAL	OBJETIVO PRINCIPAL	ACCIONES + RANGO PRESUPUESTARIO ESTIMADO
0 LANZAMIENTO E IMPLANTACIÓN DEL PC	2023 - 2029 (1er sexenio PC)	GESTIÓN AVANZADA DEL TRÁFICO EN TIEMPO REAL + PREPARACIÓN VEHÍCULO CONECTADO	RED DE COMUNICACIONES Y CONECTIVIDAD * Fibra Óptica en toda la red de alta capacidad (Arena - El Haya, Aerop. - Mungia, Red objeto pago por uso, tramo hasta túnel Autzagane...) (Presup. estimado 0.3M€) * Balizas BT para terminar de madurar la totalidad de la red de carreteras (50 nuevos puntos) al condiderarse cubierta el área metropolitana con los más de 60 puntos actuales. (Presup. estimado 0.3M€) * Primeras implantaciones de balizas ITS-G5 en el área metropolitana (Presup. estimado 0.5M€) GESTIÓN AVANZADA DEL DATO * Adecuación de centros de control robustos interconectados con igual arquitectura (servidor único e información a 3 niveles de escalado). (Presup. estimado 10M€) * Implementación de tecnologías basadas en inteligencia artificial (IA) para una gestión avanzada de la movilidad por medio de algoritmos de adecuación de velocidades, redireccionamiento de flujos e información temprana de accidentes. (Presup. estimado 5M€) PAGO POR USO PARA VEHÍCULOS PESADOS (PPU) * Instalación de arcos de control con sistema free-flow (N-240, BI-625, N-637, N-636, A-8 Cantabria). (Presup. estimado 30M€) * Integración de la información de los puntos de control instalados en el sistema de peaje y operación y mantenimiento del sistema PPU. (Presup. estimado 20M€)
1 ASENTAMIENTO Y GESTIÓN DE LA RED	2029 - 2035 (2º sexenio PC)	VEHÍCULO CONECTADO	* Instalación gradual de balizas ITS-G5 en toda la red de carreteras objeto del plan (estimadas en torno a 100 puntos para la maduración de la red). (Presup. estimado 1.5M€)
2	2035 - 2050	VEHÍCULO AUTÓNOMO + MOBILITY AS A SERVICE	* Potencial implementación de modalidades de cobro por uso de movilidad o nuevas modalidades de movilidad como servicio (MaaS).

Fases, acciones y rangos presupuestarios estimados a implementar en el marco del equipamiento tecnológico

Como aparece reflejado en la figura anterior, se identifican un total de 3 fases, dos correspondientes al marco temporal del presente Plan y una tercera posterior al mismo. En cada una de las fases se establecen unos objetivos principales relacionados con el equipamiento tecnológico.

En la Fase 0, considerada de lanzamiento e implantación del Plan, el objetivo principal será la gestión avanzada en tiempo real del tráfico. Se iniciará también una primera implantación de tecnologías relacionadas con el vehículo conectado, las cuales serán objeto de implantación completa en la red a lo largo de la Fase 1 (en torno a 100 puntos de control), considerada de asentamiento y gestión de la red de carreteras.

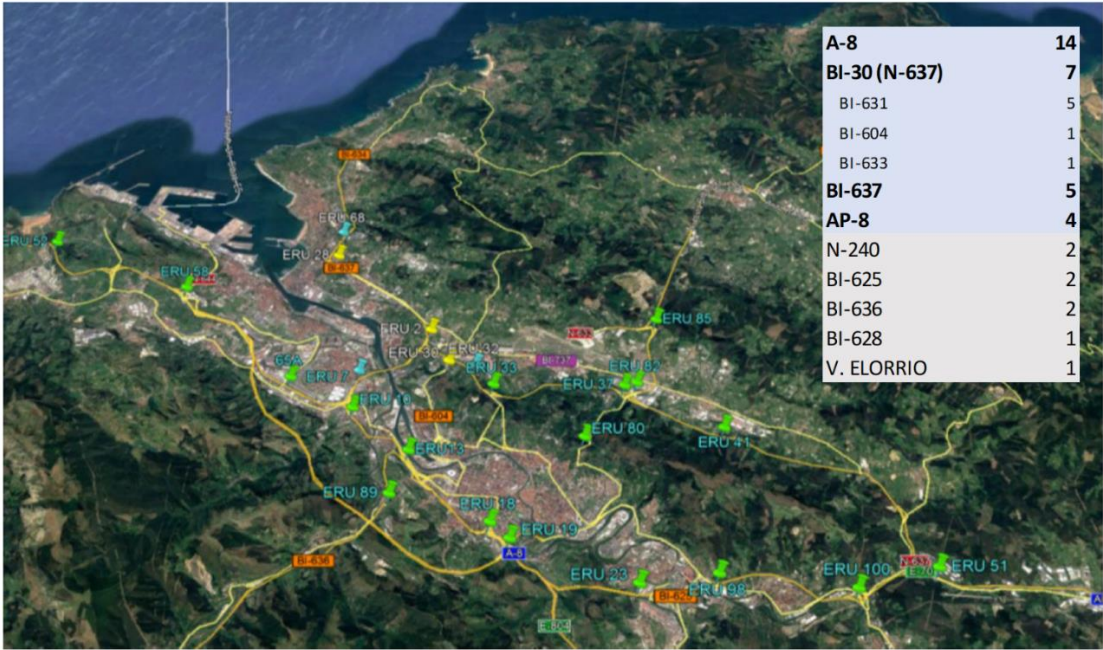
La Fase 2, posterior al presente Plan, pondrá el foco en el vehículo autónomo y en nuevas modalidades de movilidad como servicio (MaaS).

Se presenta a continuación una descripción más detallada de las acciones a implementar a lo largo de las Fases 0 y 1 correspondientes al marco temporal del presente Plan de Carreteras.

RED DE COMUNICACIONES Y CONECTIVIDAD

Se contemplan las siguientes acciones:

- Extender la instalación de **comunicaciones mediante Fibra Óptica (FO)** a toda la red de alta capacidad, cubriendo tramos aún no instalados como son:
 - La Arena - El Haya
 - Aeropuerto – Mungia
 - Red objeto de pago por uso (PPU)
 - Tramo hasta túnel de Autzagane.
- Instalación de **balizas BT para obtener tiempos y recorridos**, con el objetivo de completar la monitorización del tráfico en la totalidad de la red de carreteras. Actualmente existen más de 60 balizas BT instaladas principalmente en el área metropolitana y que se puede considerar que cubren con las necesidades de monitorización de esta zona. Se pretenden instalar otros 50 nuevos puntos de control para llegar a cubrir la totalidad de la red.



Balizas BT implantadas actualmente en la red de carreteras de Bizkaia

Mediante la red de balizas BT se logrará computar los tiempos de recorrido en tiempo real estable para sacar patrones de comportamiento en toda la red de carreteras.

Los tiempos de viaje se auditarán usando dispositivos GPS conectados en vehículos de prueba, con los que se realizarán itinerarios que cubran todas las secciones sensorizadas en diferentes franjas horarias; hora punta, hora valle, mañana, tarde. Los tiempos de viaje de los dispositivos se compararán con los datos calculados por el sistema de sensorización y se analizará su desviación.

- También se evaluará el porcentaje de detección de los sensores respecto a los datos de aforo proporcionados por la ERU situada junto a cada sensor. Otro aspecto que se evaluará son los niveles de detección frente a pasos con un vehículo de prueba, por las distintas zonas de sensorización, con dispositivos BT cuya MAC es conocida.

- Primeras implantaciones de **balizas ITS-G5 para la comunicación vehículo – Infraestructura (V2I)** en el área metropolitana e implantación gradual a la totalidad de la red.

Para realizar la selección de vías prioritarias se ha utilizado un sistema basado en la definición de un **indicador compuesto por tres factores** que se han considerado representativos de la importancia de la vía:

- C_{RED} como coeficiente que considera la jerarquía de la vía.
- C_{IMD} como coeficiente que considera el número de vehículos que usan la vía.
- C_{PES} como coeficiente que considera el número de vehículos pesados que usan la vía.

De acuerdo con este esquema, se ha llevado a cabo una priorización de tramos de acuerdo a tres características diferentes que pueden encontrarse, de manera independiente o de manera complementaria, en los diferentes tramos carreteros de la red de Bizkaia. Estas tres configuraciones son las siguientes:

- **Recorridos con una alta Intensidad Media Diaria (IMD):** carreteras que presentan un elevado nivel de tráfico por unir orígenes y destinos con una alta demanda (núcleos principales, nodos económicos, lugares de importancia turística etcétera.). Este tipo de vías presentan una capacidad por debajo de la demanda y, de forma derivada, problemáticas relacionadas con la mayor contaminación y congestión.
- **Alternativas a los recorridos principales:** carreteras que no forman parte de los tramos con mayor flujo de tráfico pero que pueden ejercer como alternativa en caso de que éstos presenten situaciones de congestión, estén bloqueados por accidentes, se den situaciones meteorológicas adversas y otras. Estas carreteras pueden, por lo tanto, ser un complemento a los tramos principales potenciando la capacidad de adaptación de la red de carreteras y asegurando su resiliencia para conectar los principales orígenes y destinos. Encontramos en la red dos tramos con recorridos alternativos:

- BI-30 vs A-8 + BI-10
- BI-10 vs AP-8



Recorridos alternativos en la red de carreteras de Bizkaia

II Plan Territorial Sectorial de carreteras del Territorio Histórico de Bizkaia
Propuestas de medidas para diferentes tipos de carreteras

Se podrán establecer otros recorridos alternativos a las vías prioritarias identificadas por medio de tramos no prioritarios (A-8 vs N634, AP-68 vs BI-625...).

- **Carreteras con una alta proporción de vehículos pesados:** vías en las que gran parte de su demanda está compuesta por vehículos pesados dado que relacionan nodos con importancia logística e industrial. Este tipo de vehículos pueden acarrear situaciones de mayor contaminación, desgaste de la vía, mayor congestión y otros.

Las vías identificadas como prioritarias son las siguientes:

- BI-10
- BI-30 (Txorierri)
- A-8
- AP-8
- AP-68
- BI-637 (Avanzada)
- N-633 (Aeropuerto)
- N-644 (Puerto)

GESTIÓN AVANZADA DEL DATO

Como se ha comentado anteriormente, mediante la red de balizas BT se podrán generar matrices y tiempos origen-destino (O/D) potencialmente tratables mediante estrategias de inteligencia artificial (IA) para una gestión avanzada de la movilidad. Se podrá así interpretar el comportamiento diario (valores por franjas horarias y días similares) para detectar discrepancias y poder reducir el tiempo de respuesta ante incidencias.

Pero para ello serán necesarios los siguientes requisitos:

- Disponer de un adecuado sistema de adquisición y almacenamiento centralizado de información (toda la información generada en un único servidor).
- Implementar un proceso de auditoría del dato para garantizar su calidad y funcionalidad (información tratada de alto valor).
- Generar mediante algoritmos IA paquetes de información de valor para cada uno de los agentes involucrados (tráfico...).

Se contemplan las siguientes acciones:

- Adecuación de centros de control robustos interconectados con igual arquitectura (servidor único e información a 3 niveles de escalado).
Diseñar e implementar un sistema con arquitectura de servidor único compartido por los diferentes Centros de Control existentes en el Territorio, que los haga robustos e interconectados, con 3 niveles de escalado de información para su completa operatividad:
 - Información generada
 - Información tratada
 - Paquetes de información de alto valor para cada agente involucrado

- Implementación de **tecnologías basadas en inteligencia artificial (IA) para una gestión avanzada de la movilidad** por medio de algoritmos de adecuación de velocidades, redireccionamiento de flujos e información temprana de accidentes.

Mediante estrategias IA se podrá extraer valor de las matrices y tiempos O/D y de los patrones de comportamiento de la red. Se podrá así interpretar el comportamiento diario (valores por franjas horarias y días similares) para detectar discrepancias, poder reducir el tiempo de respuesta ante incidencias, facilitar para cada pareja O/D una ruta adecuada para la hora solicitada o completar los servicios de movilidad con otros servicios Day 1 y Day 1,5.

PAGO POR USO PARA VEHÍCULOS PESADOS (PPU)

Las carreteras de alta capacidad están diseñadas desde su inicio como rutas de alta velocidad y altas prestaciones de servicio y además disponen de una mejor estructura de enlaces de acceso generando menores interferencias medioambientales con los núcleos urbanos próximos. Están orientadas al tráfico de paso o largo recorrido. Por otro lado, las carreteras convencionales sirven más al tráfico de agitación o recorridos con origen y destino en su entorno.

La opción del uso de cada una de las rutas viene condicionada por la diferencia de tarificación de cada una: existencia de peaje o gratuidad. Evitar el pago de peaje está derivando el uso de larga distancia a las carreteras convencionales interfiriendo con el ineludible uso de tráfico de servicio relacionado con las poblaciones locales. La mayor proximidad de las poblaciones y las decisiones de diseño de una ruta adaptada desde una configuración previa de carretera convencional hace la estructura de conexiones menos eficiente y con mayor riesgo de congestión de tráfico y mayor accidentalidad.

Así esa ventaja teórica del uso gratuito de la carretera convencional para los tráficos de mercancías implica costes externos, tanto para los propios usuarios de la red en términos de capacidad y accidentalidad, como también y de forma muy significativa para los habitantes del entorno, en base a contaminación medioambiental y de minorización de disponibilidad de la red.

Complementaria a esta idea, DFB está tramitando la nueva Norma Foral de Pago por uso, donde se plantea la aplicación de un canon por uso que permita sufragar los costes de esas infraestructuras de largo recorrido de forma equitativa, aplicando el concepto del “usuario/a pagador” de las directivas europeas.

De esta forma resulta razonable analizar un modelo que permita la adecuada coordinación en la gestión de los vehículos pesados, habida cuenta de las disfuncionalidades identificadas en el corredor de Durangaldea y en los ejes de conexión Norte-Sur N-240/AP-68 y N-636/AP-1, con el transporte de vehículos pesados.

Se han identificado las siguientes vías como susceptibles de equipamiento tecnológico necesario para incentivar al tráfico pesado a utilizar las vías de alta capacidad:

- BI-30 (N-637)
- N-240
- BI-625
- N-636
- A-8 (Cantabria)

Para el cobro por uso se colocarán una serie puntos de cobro (PC) o arcos de control con sistema free-flow, equipados con detectores de tránsito e identificadores de vehículos para poder aplicar un canon sin necesidad de detener el tráfico.

Por otro lado, se ha previsto en el Plan establecer prohibiciones al tráfico pesado en ciertos tramos específicos como son:

- Túnel de Malmasin (A-8)
- BI-3738 (antigua BI-737): Sondika-Larrabetzu
- BI-732: Durango-Abadiño
- BI-623: Mañaria-Límite Álava
- N-634: Ibarsusi-El Gallo
- BI-2632
- BI-3321
- BI-707: Loiu-Aeropuerto
- BI-625 entre Zaratamo y el enlace de Arrigorriaga con la AP-68
- Travesía Arrigorriaga
- Travesía de Igorre
- BI-3530: Artea-Areatza
- Tramo Matiena-El Gallo de la N-634

5 Referencias

- Börjesson, M., Johansson, M., & Kågeson, P. (2021). The economics of electric roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 102990. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102990>
- C-ITS Platform. (2016). *Final Report*. Recuperado de <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/its/doc/c-its-platform-final-report-january-2016.pdf>
- Carreras, A., Daura, X., Erhart, J., & Ruehrup, S. (2018). *Road infrastructure support levels for automated driving*. Paper presented at the Proceedings of the 25th ITS World Congress, Copenhagen, Denmark.
- Chen, S., Liu, M., Gao, L., Meng, C., Li, W., & Zheng, J. (2008, 27-28 Dec. 2008). *Effects of Variable Message Signs (VMS) for Improving Congestions*. Paper presented at the 2008 International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization.
- Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial. (2020). *Evolución del tráfico en las carreteras de Bizkaia*. Recuperado de Bilbao, Bizkaia: https://www.bizkaia.eus/home2/Temas/DetalleTema.asp?Tem_Codigo=6322&Idioma=CA
- DGC (Cartographer). (2019). Mapa de Trafico. Retrieved from <https://mapas.fomento.gob.es/mapatrafico/2019/>
- Erke, A., Sagberg, F., & Hagman, R. (2007). Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(6), 447-457. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.03.003>
- Federal Highway Administration. (2012). *Operations Benefit/Cost Analysis Desk Reference*. Recuperado de Washington, DC: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop12028/index.htm>
- Friedrich, B. (2016). Chapter 16. The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. En M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Eds.), *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects* (pp. 317-334). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jacob, B., & de Chalendar, O. A. (2019). *Truck platooning: Expected benefits and implementation conditions on highways*. Paper presented at the Heavy Vehicle Transportant Technology (HVT) International Symposium.
- Junior, P., Dowling, R. G., Nevers, B. L., & Neudorff, L. G. (2016). *Use of Freeway Shoulders for Travel — Guide for Planning, Evaluating, and Designing Part-Time Shoulder Use as a Traffic Management Strategy*. Recuperado de <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42328>
- Jo, Y., Kim, J., Oh, C., Kim, I., & Lee, G. (2019). Benefits of travel time savings by truck platooning in Korean freeway networks. *Transport Policy*, 83, 37-45. doi:10.1016/j.tranpol.2019.09.003
- Katz, B., Ma, J., Rigdon, H., Sykes, K., Huang, Z., Raboy, K., & Chu, J. (2017). *Synthesis of variable speed limit signs*. Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop17003/index.htm>
- Kuhn, B. (2010). *Efficient use of highway capacity summary*. Recuperado de College Station, Texas: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop10023/fhwahop10023.pdf>
- Lee, C., Hellinga, B., & Saccomanno, F. (2006). Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3), 213-228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.06.002>
- Liu, H., Kan, X., Shladover, S. E., Lu, X.-Y., & Ferlis, R. E. (2018). Modeling impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on mixed traffic flow in multi-lane freeway facilities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 261-279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.027>
- Michael, J. B., Godbole, D. N., Lygeros, J., & Sengupta, R. (1998). Capacity analysis of traffic flow over a single-lane automated highway system. *Journal of Intelligent Transportation System*, 4(1-2), 49-80.
- Mizuta, A., Roberts, K., Jacobsen, L., Thompson, N., & Colyar, J. (2014). *Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy: A Primer*. Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14020/index.htm>
- Moridpour, S., Mazloumi, E., & Mesbah, M. (2015). Impact of heavy vehicles on surrounding traffic characteristics. *Journal of Advanced Transportation*, 49(4), 535-552. doi:10.1002/atr.1286
- National Academies of Sciences. (2020). *Business Models to Facilitate Deployment of Connected Vehicle Infrastructure to Support Automated Vehicle Operations*. Recuperado de Washington, DC: <https://www.nap.edu/catalog/25946/business-models-to-facilitate-deployment-of-connected-vehicle-infrastructure-to-support-automated-vehicle-operations>
- National Center for Rural Road Safety. (2018). *Rural Intelligent Transportation System Toolkit*. Recuperado de <https://ruralsafetycenter.org/wp-content/uploads/2018/03/TTL3.pdf>
- North Carolina Department of Transportation. (2013). *Ramp Metering Feasibility Study for Durham and Wake Counties* Recuperado de Charlotte, NC: <https://connect.ncdot.gov/resources/safety/ITS%20and%20Signals%20Resources/Cost%20Estimate%20Ramp%20Metering%20Feasibility%20Study%20for%20Durham%20and%20Wake%20Counties.pdf>
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., & Papamichail, I. (2008). Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow. *Transportation Research Record*, 2047(1), 37-48. doi:<https://doi.org/10.3141/2047-05>
- Shladover, S. E., Su, D., & Lu, X.-Y. (2012). Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow. *Transportation Research Record*, 2324(1), 63-70. doi:<https://doi.org/10.3141/2324-08>
- Yan, X., & Wu, J. (2014). Effectiveness of Variable Message Signs on Driving Behavior Based on a Driving Simulation Experiment. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 206805. doi:<https://doi.org/10.1155/2014/206805>