



ESCUELA POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

Trabajo Fin de Grado

VIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA
INALÁMBRICA EN LAS CARRETERAS ESPAÑOLAS



ESCUELA POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

Trabajo Fin de Grado

VIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA
INALÁMBRICA EN LAS CARRETERAS ESPAÑOLAS

Autor: Víctor Alexei García Inozemtsev

Tutor: Francisco Javier Ollero Álvarez

Título resumido del trabajo:

Viabilidad de los sistemas de potencia inalámbrica en las carreteras españolas.

Título completo del trabajo:

Estudio de viabilidad sobre la implantación de sistemas de transferencia dinámica de potencia por conexión inalámbrica (sistemas DWPT por sus siglas en inglés) en las carreteras españolas; a fin de hacerlas más seguras, cómodas, gestionables y capacitarlas para aportar energía a los vehículos eléctricos e híbridos que circulan por ellas.

Índice de contenidos

Prólogo	- 1 -
Resumen del proyecto	- 1 -
Capítulo 1 Introducción y objetivos	- 3 -
1.1. Introducción	- 3 -
1.2. Objetivo	- 5 -
1.3. Alcance	- 6 -
1.4. Fases en la elaboración del trabajo	- 7 -
Capítulo 2 Antecedentes	- 8 -
2.1. Antecedentes	- 8 -
2.1.1. Problemática de las emisiones contaminantes de los vehículos	- 8 -
2.1.2. Primeras regulaciones de las energías limpias	- 10 -
2.1.3. Experiencias piloto en el transporte limpio	- 12 -
2.2. Compromisos internacionales actuales	- 14 -
Capítulo 3 Sistemas de transferencia dinámica de potencia por conexión inalámbrica	- 17 -
3.1. Introducción	- 17 -
3.2. Principio de funcionamiento	- 19 -
3.3. Otras aplicaciones de los sistemas DWPT	- 23 -
3.4. Especificaciones técnicas	- 25 -

3.4.1. Potencia requerida	- 25 -
3.4.2. Energía eléctrica consumida y rendimiento	- 26 -
3.5. Aspectos comerciales de los sistemas DWPT	- 28 -
3.6. Responsabilidades de las partes afectadas	- 30 -
3.6.1. Compromisos de los usuarios	- 31 -
3.6.2. Compromisos del resto de empresas del sector privado afectadas	- 35 -
3.6.3. Compromisos de la administración	- 37 -
Capítulo 4 Metodología.....	- 40 -
4.1. Normativas y disposiciones legales	- 41 -
4.2. Puesta en obra	- 42 -
4.2.1. Método basado en zanjas.....	- 43 -
4.2.2. Método de construcción de carriles completos	- 44 -
4.2.3. Método de construcción de carriles completos prefabricados.....	- 46 -
4.2.4. Programa de mantenimiento.....	- 50 -
4.2.5. Puesta en obra de algunas experiencias piloto	- 51 -
4.3. Valoración económica	- 53 -
4.3.1. Costes directos.....	- 57 -
4.3.2. Costes indirectos.....	- 61 -
4.3.3. Beneficios directos	- 65 -
4.3.4. Beneficios indirectos	- 67 -
4.3.5. Observaciones y limitaciones	- 78 -
Capítulo 5 Análisis de resultados.....	- 80 -
5.1. Beneficios en la instalación de los sistemas DWPT	- 80 -
5.2. Desventajas en la instalación de los sistemas DWPT.....	- 85 -
Capítulo 6 Conclusiones	- 87 -
6.1. Compendio de conclusiones	- 87 -
6.2. Viabilidad de la implantación de los sistemas DWPT.....	- 92 -
Capítulo 7 Referencias bibliográficas.....	- 95 -

Índice de tablas

- Tabla 1.** Resumen de las sucesivas directrices EURO (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Fundación Vida Sostenible) - **8** -
- Tabla 2.** Comparación de vehículos EV con sus equivalentes convencionales (Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de www.xataka.com) - **59** -
- Tabla 3.** Tipos impositivos estatales del impuesto de hidrocarburos (mayo 2017) (Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de javiersevillano.es) - **62** -
- Tabla 4.** Evolución del parque móvil estudiado en este proyecto (Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos del Anuario-2016 publicado por la DGT)..... - **63** -
- Tabla 5.** Consumo de combustible por km recorrido (Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos del Feasability study (2015:43)) - **63** -
- Tabla 6.** Comparativa de los costos al usuario entre ambas tipologías de motores. (Fuente: Elaboración propia a partir de los parámetros descritos arriba)..... - **65** -
- Tabla 7.** Valores de emisiones contaminantes (Fuente: Elaboración propia)..... - **69** -
- Tabla 8.** Mt de CO₂ ahorrado cada año. La estimación está basada en las emisiones de 2015 (Fuente: Elaboración propia) - **72** -
- Tabla 9.** t de NO_x y PM ahorrado cada año. La estimación está basada en las emisiones de 2015 (Fuente: Elaboración propia) - **75** -
- Tabla 10.** Resumen de las t reducidas por la instalación de los sistemas DWPT en los tres grupos de contaminantes estudiados (Fuente: Elaboración propia)- **80** -
- Tabla 11.** Proyecciones del ahorro en emisiones de CO₂ en relación a las emisiones de 1990. (Fuente: Elaboración propia con datos del SEIE) - **81** -

Índice de figuras

- Figura 1.** Evolución estimada del parque móvil de EV en el mundo según diferentes convenciones. (Fuente: (IEA, Global EV Outlook 2016))..... - 4 -
- Figura 2.** Vehículo eléctrico de finales del s. XIX (Fuente: Pinterest)..... - 4 -
- Figura 3.** Gráfica comparativa de los niveles de contaminación permitidos según las distintas normativas Euro. Vehículos gasolina. (Fuente: Fundación Vida Sostenible) - 9 -
- Figura 4.** Gráfica comparativa de los niveles de contaminación permitidos según las distintas normativas Euro. Vehículos diésel. (Fuente: Fundación Vida Sostenible) - 9 -
- Figura 5.** Contribución de las Energías Renovables al consumo de energía primaria en España (2011) (Fuente: (Energía y sociedad, 2011)) - 11 -
- Figura 6.** Emisión de CO₂ en RU en toneladas métricas per cápita (1960-2013). (Fuente: Banco Mundial)..... - 13 -
- Figura 7.** Ejemplo de sistemas enchufables (Fuente: Feasibility study (2015:37))..... - 17 -
- Figura 8.** Ejemplo de sistema estáticos de recarga inalámbrica (Fuente: (Primove.Bombardier, 2017)) - 18 -
- Figura 9.** Soluciones de pantógrafo con este sistema (Fuente: Feasibility study (2015:37))..... - 18 -
- Figura 10.** Esquema de funcionamiento del sistema DWPT (Fuente: Feasibility study (2015:224)) - 20 -
- Figura 11.** Esquema de comunicación y gestión entre el sistema DWPT y el vehículo (Fuente: Feasibility study (2015:225)) - 21 -
- Figura 12.** Muestra esquemática de la primera disposición (Fuente: Feasibility study (2015:91))..... - 22 -
- Figura 13.** Muestra esquemática de la segunda disposición (Fuente: Feasibility study (2015:93))..... - 23 -
- Figura 14.** Gases de efecto invernadero debidos a diferentes transportes [millones de t CO₂ eq.] (Gómez Garay, 2015) (Fuente: www.eoi.es)..... - 24 -
- Figura 15.** Consumo de potencia de los vehículos ligeros y pesados en función de su velocidad. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Feasibility Study (2015:90 y 91))..... - 25 -
- Figura 16.** Consumo de energía de los vehículos ligeros y pesados, por km recorrido, en función de su velocidad (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de potencia requerida) - 27 -

Figura 17. Gráfica que muestra cómo se consideran los encuestados de informados acerca de los vehículos EV (en valores relativos). [en inglés] (Fuente: Feasibility study (2015:29))	- 32 -
Figura 18. Consumo de automóviles: Probabilidad esperada de compra de EV: respuesta media e intervalo (1 = nada probable, 7 = muy probable). [en inglés] (Fuente: Feasibility study (2015:31))	- 33 -
Figura 19. Consumidores de automóviles: nivel de acuerdo con otras declaraciones WPT. [en inglés] (Fuente: Feasibility study (2015:32)).....	- 34 -
Figura 20. Esquema de las diferentes capas según el método basado en zanjas. [en inglés] (Fuente: Feasibility study (2015:78))	- 43 -
Figura 21. Solución de membrana elastomérica para un conjunto raíl- traviesa (Fuente: Feasibility study (2015:78))	- 43 -
Figura 22. Zanjadora especializada en cunetas (Fuente: Feasibility study (2015:79)).....	- 44 -
Figura 23. Sistema Modieslab	- 47 -
Figura 24. Puesta en obra del sistema Qualcomm Halo (Fuente: Hexus.net)	- 51 -
Figura 25. Puesta en obra del sistema Primove Bombardier (Fuente: YouTube) -	52 -
Figura 26. Puesta en obra del sistema OLEV desarrollado por el KAIST (Fuente: Popupcity).....	- 53 -
Figura 27. Proyecto VICTORIA (Málaga).....	- 55 -
Figura 28. Evolución del parque móvil en el escenario planteado. (Fuente: Elaboración propia)	- 64 -
Figura 29. Reducción del consumo de carburante y de los ingresos generados con sus impuestos. (Fuente: Elaboración propia).....	- 64 -
Figura 30. Concentraciones de CO ₂ en los últimos 800.000 años. (Fuente: NOAA, 2008).....	- 70 -
Figura 31. Registros de emisión de CO ₂ en el periodo 2005- 2015. (Fuente: Elaboración propia)	- 71 -
Figura 32. Registros de emisión de NO _x en el periodo 2005- 2012. (Fuente: Elaboración propia)	- 73 -
Figura 33. Registros de emisión de PM en el periodo 2005- 2012. (Fuente: Elaboración propia)	- 74 -
Figura 34. Detalle de la ciudad de Madrid donde se aprecia un grado altísimo de contaminación atmosférica (Fuente: Pinterest)	- 76 -

Índice de acrónimos

DGT	Dirección General de Tráfico
DNO	<i>(Distribution Network Operator)</i> Operador de la Red de Distribución
DWPT	<i>(Dynamic Wireless Power Transfer)</i> sistemas de transferencia dinámica de potencia por conexión inalámbrica
EV	<i>(Electric Vehicles)</i> Vehículos eléctricos [e híbridos]
ICE	<i>(Internal Combustion Engine)</i> Motor de Combustión Interna
IE	Impuesto Especial [sobre carburantes]
IEA	<i>(International Energy Agency)</i> Agencia Internacional de la Energía
IMS	<i>(Infrastructure Management System)</i> Sistema de gestión de la infraestructura
HE	<i>(Highways of England)</i> Autopistas de Inglaterra
KAIST	<i>(Korea Advanced Institute of Science and Technology)</i> Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología Avanzadas
MFID	<i>(Microwave Frequency Identification)</i> Lector de Identificación por Microondas
NOAA	<i>(National Oceanic and Atmospheric Administration)</i> Administración Nacional [estadounidense] Oceánica y Atmosférica
NO_x	Nitratos de óxido (NO, NO ₂ y NO ₃)
SI	Sistema Internacional [de medidas]
PM	<i>(Particular Matter)</i> Partículas en Suspensión
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TRL	<i>(Technology Readiness Level)</i> Niveles de Preparación Tecnológica (ver página 54)
UE	Unión Europea
UK	<i>(United Kingdom)</i> Reino Unido
VL	Vehículo Ligero (incluye furgonetas)
VP	Vehículo Pesado



Prólogo

La evolución en el transporte terrestre a lo largo de la historia ha estado condicionada por los avances tecnológicos y las necesidades de las sociedades humanas. Esto explica que la infraestructura siempre haya ido a la zaga de los avances que han experimentado los vehículos.

Actualmente existe la posibilidad de hacer de las carreteras algo más que una superficie por la que pasan vehículos. Existe la tecnología necesaria para hacer las carreteras más seguras, cómodas, gestionables, útiles, prácticas y enfocadas al desarrollo de futuros avances. Es decir, hacer de los transportes algo simple y sencillo, en lugar de una rutina tediosa sujeta a las inclemencias del tiempo, las retenciones y los posibles imprevistos.

Porque quizás el futuro de la obra pública española no pase por carreteras que se adapten a los nuevos vehículos y conductores, si no por vehículos y conductores que se adapten a las nuevas carreteras.

Resumen del proyecto

El presente proyecto trata sobre el estudio de los sistemas DWPT como solución a los actuales problemas del transporte. Se ha optado por estos sistemas debido a las ventajas que presenta y a la información obtenida en diferentes experiencias piloto a lo largo del mundo.

Para ello se han tenido en cuenta diferentes factores, desde la contaminación medioambiental o las normativas a ese respecto hasta los costes para la administración y los posibles usuarios.

Todo ello para determinar la viabilidad que una inversión en esta tecnología tendría, entendiéndose como “viabilidad” la valoración de los pros y contras de su instalación en la red de carreteras española.



Viabilidad de los sistemas de potencia inalámbrica en las carreteras españolas



Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En nuestro país fallecen 3 veces más de personas al año por las emisiones de los vehículos que por los propios accidentes¹, los cuales sumaron 1160 víctimas en 2016. Los motores que los impulsan, además de “sucios”, son cuanto menos “perezosos”; ya que cuentan con una eficiencia en el uso del combustible del 15-25%². Nuestras carreteras también cuentan con sus propios problemas: solo los atascos y retenciones generan 600 millones de euros en pérdidas anuales a las empresas, según datos de los principales ayuntamientos³; mientras que los accidentes generan otros 1,4 millones en pérdidas a la sociedad por cada víctima mortal, según un informe elaborado por la DGT⁴.

Mientras se elabora este proyecto, Madrid se encuentran en Fase II de contaminación, lo que implica la prohibición del aparcamiento en la “Almendra central” de la ciudad. Esta medida impuesta por el ayuntamiento (al igual que otros ayuntamientos de grandes urbes) pretende paliar los efectos de la contaminación que emiten los vehículos de combustión interna.

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés), España contaba con un parque móvil de 6.000 vehículos híbridos o eléctricos (EV por sus siglas en inglés) en 2015, comprometiéndose a alcanzar los 200.000 vehículos EV para 2020⁵. De hecho, este incremento se dará a escala mundial, tal como podemos comprobar en la *Figura 1*⁶. En 2017 España llevaba retrasos en la consecución de este compromiso en comparación con los demás países de la UE.

1 (El Mundo, 2017)

2 *Feasibility study*, pg. 223 (Highways England, 2015)

3 (Antena3noticias, 2016)

4 (ABC, 2011)

5 (IEA, Global EV Outlook 2016)

6 (IEA, Global EV Outlook 2016)

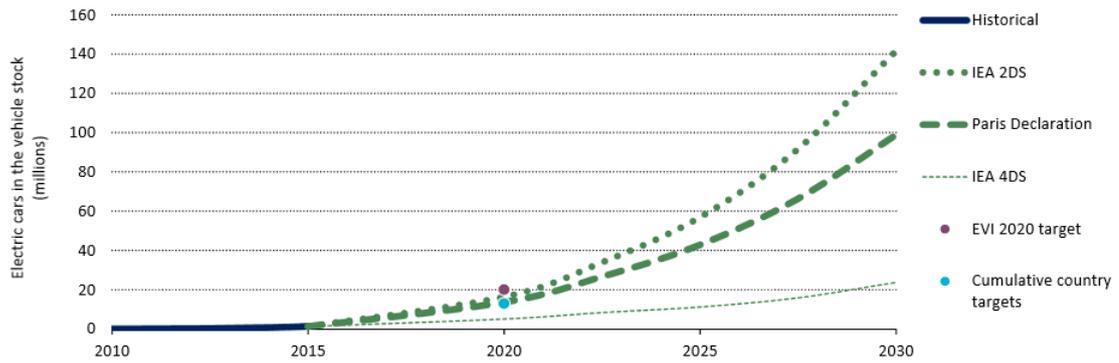


Figura 1. Evolución estimada del parque móvil de EV en el mundo según diferentes convenciones. (Fuente: (IEA, Global EV Outlook 2016))

Estos son solo algunos datos de la cara más oscura del transporte. Es fácil pensar que la solución de estos problemas corresponde a profesionales del sector del automóvil a la hora de diseñar mejores vehículos, o de los estados a la hora de restringir las emisiones contaminantes y aumentar las exigencias en seguridad. Sin embargo, existen soluciones aplicadas a la propia carretera que pueden solucionar, a priori, la mayor parte de estos problemas; soluciones que nos afectan a los ingenieros civiles.

El presente proyecto tratará sobre una de esas soluciones que destaca por su practicidad y utilidad: los sistemas DWPT, los cuales se explican en el *Capítulo 3*. Sin embargo, no hay que entender esta tecnología como una solución en sí misma; sino como una parte fundamental dentro de un ambicioso cambio en el paradigma del transporte que afecta, a partes iguales, a los usuarios, administración, empresas de diferentes sectores y, como dijimos, a los ingenieros de caminos.

De hecho, este estudio contempla la implantación de los sistemas DWPT aprovechándose de la intromisión cada vez más clara de los EV en nuestra sociedad. Esta tipología de vehículos, si bien es conocida desde hace tiempo, ha repuntado en los últimos años, lo que a medio plazo los puede convertir en un porcentaje importante del parque móvil nacional.



Figura 2. Vehículo eléctrico de finales del s. XIX (Fuente: Pinterest)



1.2. Objetivo

El presente documento analiza la viabilidad de dotar a nuestras carreteras actuales de un tipo concreto de sistemas, llamados sistemas DWPT (por sus siglas en inglés), los cuales evitarían o reducirían considerablemente los problemas actuales asociados al transporte. Para lograrlo, los sistemas DWPT buscan:

- 1) Fomentar gradualmente la inclusión de los vehículos EV en el parque móvil nacional. Lo que a su vez lograría:
 - Reducir las emisiones contaminantes.
 - Cumplir con las normativas internacionales sobre medio ambiente.
 - Reducir el consumo de energía en el transporte, mejorando la eficiencia y reduciendo gastos.
- 2) Dotar a la carretera de capacidad para gestionar el tráfico, aumentar la seguridad y mejorar las condiciones de comodidad de los usuarios; todo ello en tiempo real. Lo que a su vez lograría:
 - Disminuir la accidentalidad.
 - Hacer más cómodos los viajes para los usuarios al incluir nuevos servicios (cobertura móvil, Wi-Fi, asistencia en viaje, etc.).
 - Gestionar la red de carreteras en tiempo real, evitando retenciones y actuando rápidamente en caso de accidente.
 - Facilitar la inclusión de tecnologías incipientes (como el vehículo automático) o la mejora de tecnologías más asentadas (como los vehículos EV).

El estudio en la implantación de estos sistemas incluye tanto las carreteras ya existentes como las carreteras futuras.



1.3. Alcance

Determinar la viabilidad de estos sistemas exige el estudio de muchas variables que, a su vez, requieren estudios muy detallados (como registros históricos, comportamientos ante diferentes escenarios, proyecciones futuras, etc.). Dada, pues, la complejidad de este estudio, no es de extrañar que existan cifras groseras o susceptibles de variar en un futuro ante cambios imprevistos.

Para evitarlo, se ha pretendido extraer en todo momento la información más complicada de bibliografía oficial: desde informes previos que ya valoraban la tecnología DWPT (entre los que destaca el *Feasibility study*, del que se hablará más adelante) hasta fuentes ministeriales para los datos relativos a nuestro país. También se han contrastado muchos de los datos desde fuentes fidedignas como páginas web especializadas, artículos periodísticos o agencias internacionales. En la bibliografía se detalla este aspecto con más detalle.

Sin embargo, debido a la novedad de los sistemas DWPT, existen estimaciones que carecen de la suficiente información como para partir de datos sólidos; no quedando más remedio que plantear escenarios simplificados o suposiciones en base a la poca información disponible. A lo largo de este proyecto se ha pretendido puntualizar todas las limitaciones en aquellas estimaciones que partan de suposiciones, dejando claro que suposiciones proceden de las fuentes consultadas y cuales se han adoptado en este proyecto por criterios propios.

Por último, también se ha dado lo contrario: situaciones en las que la información disponible era excesiva o estaba planteada para situaciones muy complejas que poco tenían que ver con el presente proyecto. En esos casos se optó por hacer simplificaciones o por ignorar todo aquello que no aportara información útil. Al igual que antes se procuró destacar las posibles limitaciones de esta simplificación, reflejando la información utilizada y la que quedaba fuera del alcance de este proyecto.

Podemos concluir que la redacción de este trabajo parte de datos contrastados. Sin embargo, y siempre a juicio del autor, también ha sido necesario utilizar varias suposiciones y/o simplificaciones con sus respectivas limitaciones.



1.4. Fases en la elaboración del trabajo

El presente proyecto se planteó para que su elaboración fuese teórica, al consistir en una investigación y recopilación de informes y ensayos realizados anteriormente. Por ello, se planteó presentar el trabajo de la siguiente manera:

- *Capítulo 2: Antecedentes*

Presentación de la problemática que se pretende solucionar con este proyecto.

- *Capítulo 3: Sistemas DWPT*

Presentación y explicación de la solución planteada.

- *Capítulo 4: Metodología*

Explicación detallada de cómo se llevaría a cabo la instalación de esta tecnología, así como los impactos que generaría (tanto beneficiosos como perjudiciales).

- *Capítulo 5: Análisis de resultados*

Estudio de las ventajas y desventajas en la instalación de estos sistemas, con los que interpretar que problemas originales soluciona y que problemas nuevos genera.

- *Capítulo 6: Conclusiones*

En función de todo lo anterior, ¿resulta objetivamente viable la instalación de estos sistemas?

En todos estos capítulos se describen en mayor o menor medida los aspectos importantes necesarios para la valoración final. Por último, en el *Capítulo 7* podemos encontrar la bibliografía.



Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Antecedentes

2.1.1. Problemática de las emisiones contaminantes de los vehículos

El problema de la emisión de gases por los vehículos comenzó a estudiarse desde los años 60 en Los Ángeles, Estados Unidos. Por esa época, el boom en la compra de vehículos de gasolina comenzó a saturar la atmósfera de la ciudad generando el característico “smog” propio de ambientes contaminados⁷. Este problema y la búsqueda de motores más eficientes derivó en la sustitución de los carburadores (los cuales mezclaban cantidades variables de gasolina con aire antes de introducir la mezcla en los pistones) por inyectores eléctricos mucho más precisos.

De vuelta a nuestro continente, el primer intento en cuanto a la regulación de la emisión de gases por los vehículos se remonta a 1970: la directiva 70/220/CEE supuso una aproximación de las políticas nacionales en este aspecto de los países miembros⁸. Sin embargo, el gran cambio llegó con las normativas EURO. Este marco jurídico consiste en una serie de directivas, cada cual más restrictiva, que limita a la emisión de gases de los vehículos gasolina y diésel⁹. Cada directiva es una modificación de la directiva 70/220/CEE. A continuación se muestra un breve resumen¹⁰:

TABLA 1. Resumen de las sucesivas directrices EURO
(Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Fundación Vida Sostenible)

	FECHA DE ENTRADA EN VIGOR	DIRECTIVA CEE
EURO 1	1.993	91/441/CEE & 93/59/CEE
EURO 2	1.996	94/12/CEE & 96/59/CEE
EURO 3	2.000	98/69/CEE
EURO 4	2.005	98/69/CEE & 2002/80/CEE
EURO 5	2.008	COM(2005)683 - propuesto
EURO 6	2.015	2007/715/CE & 2009/595/CE

⁷ (Fundación Vida Sostenible, 2015)

⁸ (CEE, 1970)

⁹ (Fundación Vida Sostenible, 2015)

¹⁰ (Europa sobre ruedas)

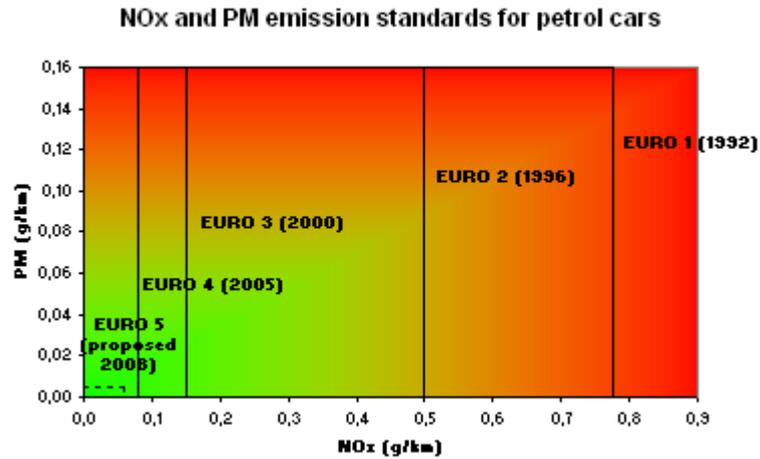


Figura 4. Gráfica comparativa de los niveles de contaminación permitidos según las distintas normativas Euro. Vehículos gasolina. (Fuente: Fundación Vida Sostenible)

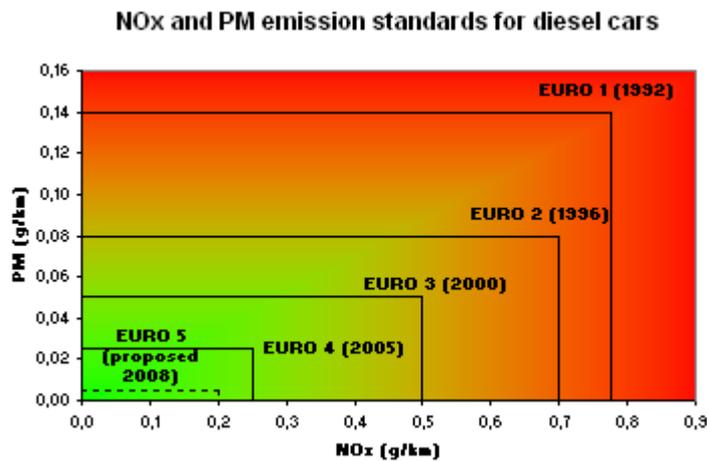


Figura 3. Gráfica comparativa de los niveles de contaminación permitidos según las distintas normativas Euro. Vehículos diésel. (Fuente: Fundación Vida Sostenible)

Muchas de las piezas que consideramos fundamentales en los vehículos actuales provienen o han evolucionado notablemente debido a la implantación de estas normativas. Este es el caso del catalizador, el filtro antipartículas, los sistemas de sobrealimentación, etc¹¹.

¹¹ (Fundación Vida Sostenible, 2015)



2.1.2. Primeras regulaciones de las energías limpias

Por su posición geográfica, España cuenta con una relativa facilidad para generar energía a partir de fuentes renovables. Si bien, en un primer momento, la obtención de energías alternativas en nuestro país se limitó a experiencias piloto allá por la década de los 80¹². Más adelante estas experiencias piloto se convirtieron en ambiciosas políticas que involucran a varios Estados. En este marco de aumento de las energías renovables (y tal como ocurrió con la limitación de emisiones en los vehículos) la Unión Europea (UE) ha tenido un peso considerable al promover numerosas legislaciones vinculantes para todos sus estados miembros.

En España podemos empezar a hablar de la regulación de la gestión de energías renovables en la década de los 80 con la ley 82/1980¹³ de conservación de la energía. Esta ley se creó con la principal intención de mejorar la eficiencia energética, entre otros aspectos. Sin embargo, para hablar de la incentivación por parte del Estado del uso de las energías renovables, hubo que esperar hasta la década de los 90 con el Plan Energético Nacional 1991-2000^{14,15} y la Ley 40/1994, con la que se consolida el régimen especial. En relación a esta última ley cabe destacar el Real Decreto 2366/1994, el cual contempla como régimen especial, entre otras, instalaciones que utilizan calor residual. Por otro lado, y en relación al régimen especial y ordinario, cabe mencionar la ley 54/1997 del Sistema Eléctrico que distingue ambas producciones.

En el año 1999 se establece un Plan de Fomento de las Energías Renovables (PFER)¹⁶ con vistas al futuro, es decir, para promover su crecimiento permitiendo un consumo de al menos el 12% en 2011. En la siguiente gráfica podemos ver desglosadas cada una de las energías renovables en su contribución al consumo de energía primaria en España¹⁷.

¹² (Lorenzo, 2003)

¹³ (BOE, 1981)

¹⁴ (España, Plan Energético Nacional: 1991-2000, 1991)

¹⁵ (El Mundo, 2000)

¹⁶ (España, Plan de Fomento de las energías renovables , 1999)

¹⁷ (Energía y sociedad)

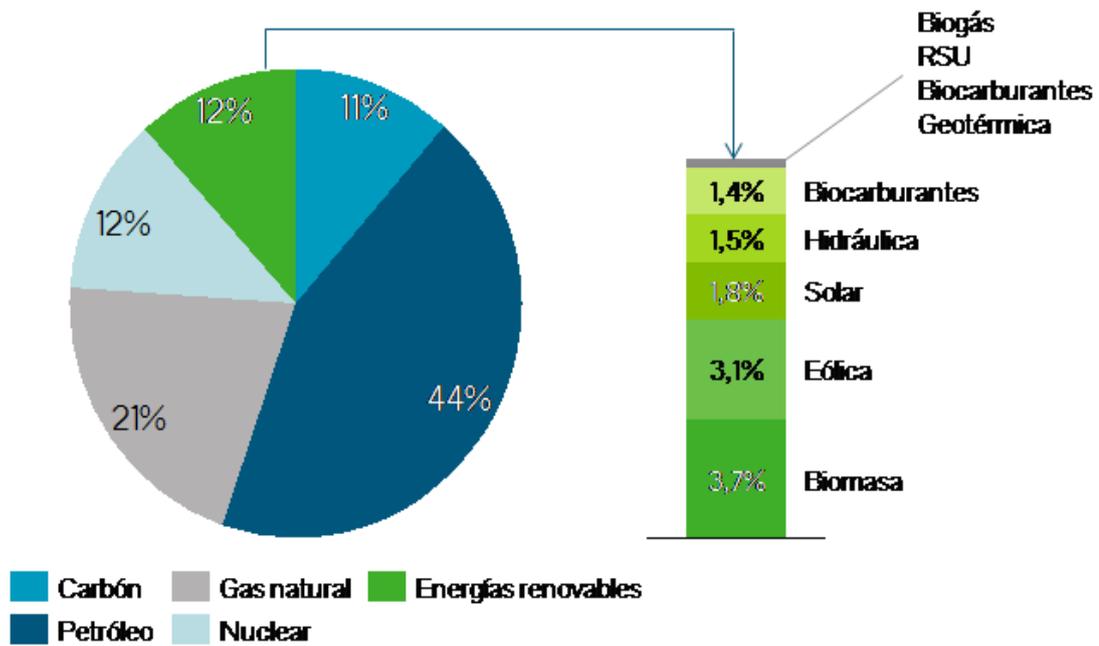


Figura 5. Contribución de las Energías Renovables al consumo de energía primaria en España (2011)
(Fuente: (Energía y sociedad, 2011))

El PFER resultó ser insuficiente, por lo que en el año 2005 se establece un nuevo plan: el Plan de Energías Renovables 2011-2020¹⁸, que añadió al primer compromiso (destinar el 12% del consumo de energía total a las energías renovables) otro nuevo relacionado con el uso de biocarburantes en el transporte para el año 2010. Este último plan supuso para la energía fotovoltaica un aumento de 135 a 400 MW.

En el año 2007 se establece el Real Decreto 661/2007¹⁹, por el que se les concede a las Comunidades Autónomas la capacidad de otorgar la condición de instalación de régimen especial.

Si bien ha quedado demostrada la importancia que las políticas medioambientales han tenido en los últimos años, a día de hoy España sigue contando con numerosos compromisos internacionales en materia de contaminación, tal como veremos en el *Apartado 2.2.*

¹⁸ (España, Plan de Energías Renovables: 2011-2020, 2005)

¹⁹ (BOE, 2007)



2.1.3. Experiencias piloto en el transporte limpio

Las últimas décadas han venido con normativas, a priori, más exigentes. Ya no es suficiente con diversificar la obtención de energía con fuentes más limpias, sino que se hace prioritario disminuir los niveles de contaminación de los sectores que la consumen. En efecto; la industria, los electrodomésticos, el transporte, ... todos los aspectos de la sociedad han sufrido mayores exigencias en cuanto a la eficiencia del consumo y la disminución de residuos que dejan tras de sí.

Por lo que a nosotros respecta, la evolución del transporte terrestre ha experimentado, entre otros, la inclusión de los vehículos EV. De hecho muchas políticas nacionales y regionales han ido en esta dirección, como por ejemplo el reciente plan MOVEA 2017 (el cual agotó todos sus fondos destinados en poco más de 24 horas²⁰) o la “Feria del Vehículo Eléctrico VEM 2017” celebrada en Madrid en mayo de 2017²¹. Estos dos son ejemplos de actuaciones que destacan por su novedad, sin embargo, no son ni de lejos las más ambiciosas...

En noviembre de 2008 se formalizó en Reino Unido (RU) el “*Climate Change Act 2008*”²², un decreto que pretendía legislar las políticas del país con respecto al cambio climático. Los objetivos de esta norma implicaron nuevas y ambiciosas medidas, afectando a diversos sectores como la industria y el transporte, sin embargo, uno de estos objetivos destacó tanto que se le dio su propio nombre: “*2050 target*”²³ (“Objetivo 2050”). Este persigue la reducción del 80% de los gases de efecto invernadero para 2050.

Según el “*Feasibility study: Powering electric vehicles on England’s major roads*” (2015:22), del que hablaremos más adelante, en 2013 el 25% de la emisión de CO₂ en RU provenía del transporte (en España contamos con cifras muy parecidas, ver *Apartado 4.3.4.*), de ahí que este sector sea prioritario en las medidas adoptadas para el Objetivo 2050. Para reducir esta emisión se insistió en promover el uso de vehículos EV²⁴ y para ello se estudiaron diversas experiencias piloto con el fin de hacer más

²⁰ (Cincodias.elpais, 2017)

²¹ (hibridosyelectricos, 2017)

²² (UK government, 2008)

²³ (UK government, 2013)

²⁴ (Highways England, 2013)



atractiva su adquisición. En ese contexto llegamos a julio de 2015, momento en el que se publica el “*Feasibility study: Powering electric vehicles on England’s major roads*”²⁵ (“Estudio de viabilidad: Fomentar los vehículos eléctricos en las carreteras principales de Inglaterra”), a partir de ahora *Feasibility study*, un proyecto encargado por “Highways England” (HE), operador de las carreteras inglesas, que analiza la viabilidad de los sistemas DWPT para los usuarios de la red de carreteras británica que tengan vehículos EV.

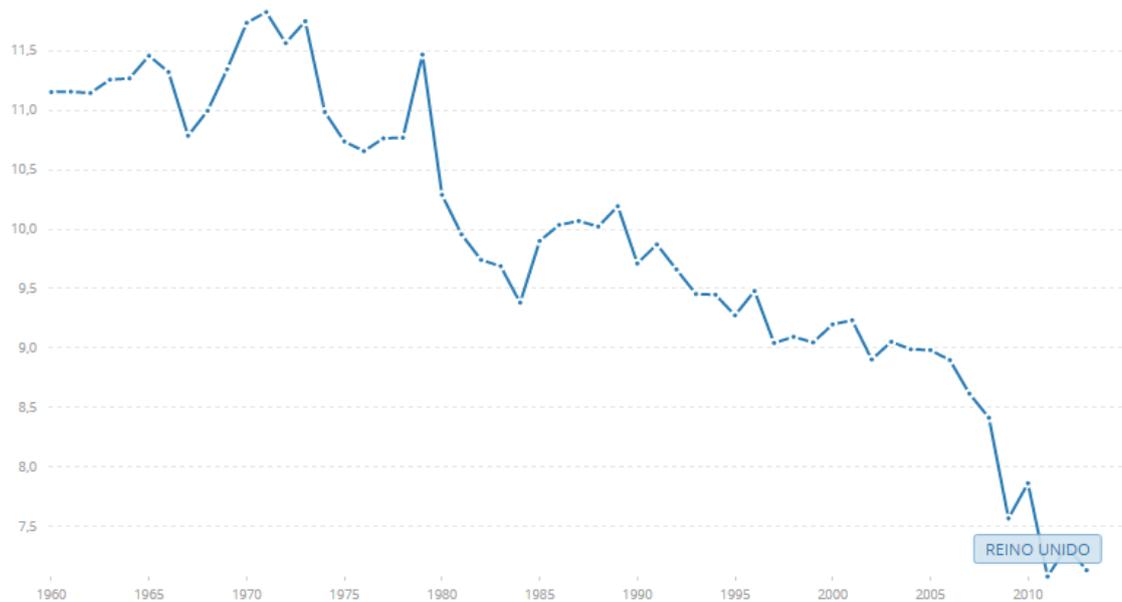


Figura 6. Emisión de CO2 en RU en toneladas métricas per cápita (1960-2013).
(Fuente: Banco Mundial)

Según este documento, la tecnología DWPT se está considerando de forma prioritaria (delante de otras tecnologías tales como la carga rápida de la batería y la carga conductora aérea) por una serie de razones. Por citar algunas según el *Feasibility study* (2015:22):

- Podría aplicarse en todas las clases y tipos de vehículos (a diferencia de algunas opciones de carga conductiva, como los sistemas basados en catenarias).
- Supera los problemas con el rendimiento de la batería al recibir energía en movimiento.
- Debido a que los sistemas DWPT pueden instalarse bajo la carretera sin ninguna infraestructura visible adicional, no introducen riesgos de seguridad adicionales (colisión o seguridad eléctrica).

²⁵ (Highways England, 2015)



- Requiere una necesidad de mantenimiento menor que el resto de opciones.

Para su redacción, se analizaron otros proyectos y prototipos existentes en el mercado, de los que destacan el autobús desarrollado por el KAIST en Corea del Sur (el cual funciona con un sistema DWPT a lo largo de sus 24 km de trayecto²⁶) o el sistema de carga inalámbrica *Primove Bombardier*.

El *Feasibility study* constituye uno de los documentos más consultados como bibliografía en el presente trabajo.

2.2. Compromisos internacionales actuales

Recapitulando, hasta este momento hemos mencionado las numerosas directrices que han marcado las tendencias nacionales sobre reducción en la emisión de gases contaminantes, así como la importancia del sector del transporte terrestre en la consecución de estos objetivos.

Actualmente se desarrollan gran cantidad de normativas y disposiciones, tanto nacionales como internacionales. Si bien la mayor parte de las normativas medioambientales vienen impulsadas por la UE como objetivos vinculantes para el conjunto de países miembros. Según el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, los principales objetivos nacionales, en cuanto a reducción de las emisiones son²⁷:

- Una reducción del 20% en las emisiones de CO₂ (con respecto a los niveles de 1990) para el año 2020. Coincidente con el periodo del Segundo Protocolo de Kioto.
- Una reducción del 40% en las emisiones de CO₂ (con respecto a los niveles de 1990) para el año 2030. Coincidente con el periodo del Acuerdo de París.
- Una reducción del 80% en las emisiones de CO₂ (con respecto a los niveles de 1990) para el año 2050. Según la comunicación realizada por la Comisión Europea en el año 2011.

²⁶ (G. Bejerano, 2013)

²⁷ (MAPAMA)



Por su parte, la limitación de las emisiones de CO₂ vehiculares se sustenta en las normativas que restringen los gramos de CO₂ emitidos por un motor convencional por km recorrido. Teniendo en cuenta que la consecución de esos objetivos depende de aspectos técnicos que atañen solo a las marcas comerciales, lo cual está fuera del alcance de este proyecto, y que en el presente proyecto tratamos de vehículos eléctricos, los cuales no emiten gases de efecto invernadero; no tendremos en cuenta los objetivos de reducción de emisiones vehiculares.

Más recientemente, en el año 2015, la Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés) realizó un informe completo sobre las políticas energéticas en España titulado “Energy policies of IEA countries. Spain. 2015 Review”. Ese proyecto refleja desde la emisión de gases de efecto invernadero en la producción de energía hasta el desarrollo tecnológico en el sector, sin embargo, en su capítulo 9 habla explícitamente de las energías renovables. A continuación incluiré extractos de ese mismo capítulo traducidos literalmente del inglés (2015:128):

La política energética renovable de España está alineada con los objetivos de la UE 2020. Por ello, para 2020, España tiene la obligación de que las energías renovables supongan el 20% del consumo final bruto de energía. Además de este objetivo global, España y otros Estados miembros de la UE tienen como objetivo nacional vinculante, para esa misma fecha, el cubrir el 10% del combustible del transporte con energía renovable. Más allá de 2020, los estados miembros de la UE han acordado aumentar esa cuota a un 27% en el consumo de energía para 2030. El objetivo es vinculante para la UE en su conjunto. Todavía no se ha decidido el nivel de esfuerzo que debe realizar cada estado miembro de la UE para cumplir este objetivo.

España ha avanzado claramente hacia el objetivo de 2020, aumentando año tras año la proporción que la energía renovable supone en el consumo de energía final bruto. De acuerdo con Minetur: 12,1% en 2005; 15,6% en 2011; 16,8% en 2012; 16,3% en 2013 y alrededor del 17% en 2014. La participación se ha incrementado principalmente como resultado del aumento de la producción de electricidad renovable, pero también como resultado del aumento del uso de energía renovable para el calor y el transporte y la disminución del consumo total de energía.

Para alcanzar el objetivo de 2020 desde los niveles de 2014, el gobierno centra la atención en incrementar la electricidad renovable. Se prevé una necesidad adicional de energía de 8,95 GW (principalmente viento) para 2020, y para ello tiene previsto organizar nuevas licitaciones en los próximos años. El gobierno también planea aumentar la obligación de usar biocombustibles en el transporte.



El uso de biocombustibles en el transporte se basa en el compromiso adquirido, en virtud de la directiva de la UE relativa a las energías renovables (2009/28/CE), de abastecer el 10% de las necesidades energéticas en el transporte por carretera con fuentes procedentes de energías renovables antes de 2020. Existía un objetivo anterior, no vinculante, de alcanzar una cuota del 5,75% para 2010. Para alcanzar el objetivo de la UE, España ha establecido una obligación para el uso de biocombustibles. Antes de 2013, el uso de biocombustibles también fue fomentado por incentivos fiscales, pero fueron abolidos en un esfuerzo por equilibrar el déficit presupuestario del gobierno.

Por lo que respecta a las energías renovables para el transporte, la obligación española de biocarburantes se encuentra en el 4,1%, muy por debajo del 10% requerido para 2020 según la legislación de la UE. Para conseguir el objetivo del 10%, el gobierno planea aumentar la mezcla obligatoria en los combustibles, haciendo que esta contenga más biocarburantes. Esto es precisamente lo que el gobierno debe hacer.

Como podemos observar, en estos extractos quedan reflejados los objetivos de España en relación con sus compromisos con la UE y, sin embargo, nótese que estos mismos objetivos no distan mucho de los que busca RU en el “2050 target”, por lo que en la práctica no sería descabellado aplicar parte de sus políticas en nuestro país. De hecho, precisamente es en el uso de un transporte más limpio donde España arrastra un mayor retraso, lo que justifica aún más el empleo de un proyecto ambicioso como el planteado en el *Feasibility study*.

La implantación de unas instalaciones de estas características a gran escala en España provocaría un cambio drástico en el consumo de energías y emisión de gases de efecto invernadero. Su instalación no nos aportaría más energía renovable a la red (como pretenden la mayoría de las políticas actuales), sino un consumo responsable y eficiente de esta, lo que se traduciría en un aumento considerable de la energía renovable aprovechada para el transporte, además de otras ventajas:

- La consecución de los objetivos europeos en cuanto a la directiva 2009/28/ CE.
- Una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero.
- Un aliciente en la adquisición de vehículos EV.



Capítulo 3

Sistemas de transferencia dinámica de potencia por conexión inalámbrica

3.1. Introducción

Los sistemas DWPT (Dynamic Wireless Power Transfer), en español sistemas de transferencia dinámica de potencia por conexión inalámbrica, son, en esencia, una tipología de carga para los vehículos EV. Existen infinidad de sistemas cuando hablamos de cargar vehículos EV con corriente eléctrica, si bien los más destacados por su simplicidad y futura proyección son:

- 1) **Sistemas enchufables²⁸**: Es el sistema que se ha empleado para cargar cualquier dispositivo eléctrico. En nuestro caso empleamos un cable que conecta el coche a la red (*Figura 7*).



Figura 7. Ejemplo de sistemas enchufables (Fuente: Feasibility study (2015:37))

- 2) **Sistemas estáticos de recarga inalámbrica²⁹**: Esta tecnología se basa en la inducción magnética para evitar la necesidad de ningún cable. Para ello se utiliza un dispositivo enterrado conectado a la red, el cual recarga el vehículo mediante otro dispositivo conectado en su parte inferior. Es la misma tecnología que se emplea en la recarga de ciertos dispositivos móviles. Para que se produzca la recarga es necesario colocar ambos dispositivos a la menor distancia posible, el uno sobre el otro. En la *Figura 8* se ve un ejemplo del sistema de recarga *Primove* de la casa comercial *Bombardier*³⁰.

²⁸ (Endesa vehículo eléctrico, 2017)

²⁹ (ABC, 2015)

³⁰ (Primove.Bombardier, 2017)

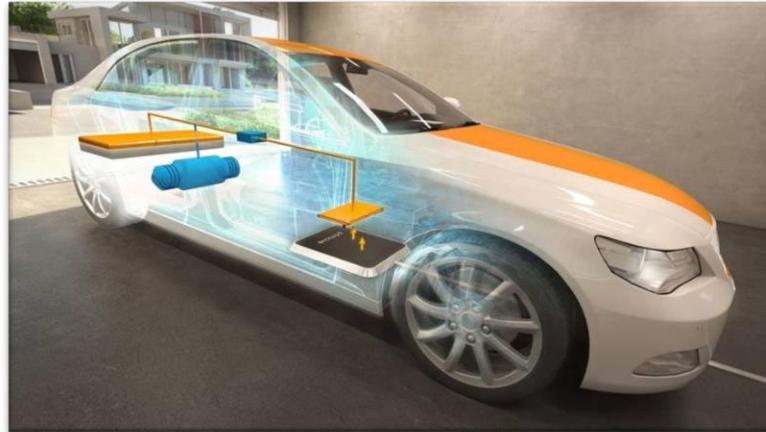


Figura 8. Ejemplo de sistema estáticos de recarga inalámbrica
(Fuente: (Primove.Bombardier, 2017))

3) **Sistemas de transferencia dinámicos de electricidad por contacto:**

Consiste en colocar elementos conductores que proporcionen electricidad a lo largo de la trayectoria de vehículos. Es, por ejemplo, el sistema que emplean los trolebuses o los trenes eléctricos mediante la catenaria.

El *Feasibility study* (2015:36) planteó y estudió el empleo de este sistema para el transporte de vehículos por carretera, demostrando que solo resulta viable para vehículos de cierto tamaño (en el caso de soluciones de pantógrafo,



Figura 9. Soluciones de pantógrafo con este sistema
(Fuente: Feasibility study (2015:37))

como se muestra en la *Figura 9*). Además, requiere una considerable cantidad de infraestructuras y cables sobre el suelo que pueden presentar un considerable reto de mantenimiento y un potencial peligro para la seguridad.

Recientemente se abrió un tramo de autopista en la ciudad alemana de Hesse con esta tecnología³¹. Este proyecto piloto financiado por Siemens pretende solucionar varios de los problemas que arrastra esta tecnología, consiguiendo reducir los costes por kilómetro e, incluso, permitir los adelantamientos.

4) **Sistemas dinámicos de recarga inalámbrica:** Los sistemas DWPT se encuentran catalogados aquí. Consiste en una evolución de la solución 2)

³¹ (Movilidad eléctrica, 2017)



pero aplicada a lo largo de la trayectoria de desplazamiento de los vehículos. Para ello se emplea una sucesión de dispositivos enterrados bajo la carretera, lo que presenta una serie de ventajas que las hacen especialmente atractivas como veremos más adelante.

Actualmente, además del *Feasibility Study*, existen diferentes proyectos financiados por diferentes entidades y empresas con el fin de testear estos sistemas. Como el campo de prácticas de Renault, Qualcomm y el Instituto Vedecom³², o el anterior proyecto de la línea de bus que se recarga mientras circula por la ciudad de Gumi, Corea del Sur³³, por citar algunos ejemplos.

Si bien cada empresa y proyecto tiene sus matices y patentes, por regla general el funcionamiento de los sistemas DWPT atiende a la secuencia que se explica en los siguientes apartados. La información principal mostrada en estos se extrajo del *Feasibility study*, en caso contrario se referenciará conforme proceda.

3.2. Principio de funcionamiento

La **Transferencia de Potencia por Conexión Inalámbrica (WPT)** inductiva, proceso en el que se basan la mayoría de los sistemas DWPT estudiados, funciona del mismo modo que un transformador. En la *Figura 10* podemos ver su funcionamiento esquemático de forma intuitiva.

- 1) La CA de la red se convierte en una frecuencia más adecuada (más alta) para el acoplamiento inductivo a través de un entrehierro por el circuito de control de potencia.
- 2) Esto alimenta el circuito primario, que se encuentra debajo de la superficie de la carretera.

³² (corrienteelectrica.renault, 2017)

³³ (G. Bejerano, 2013)

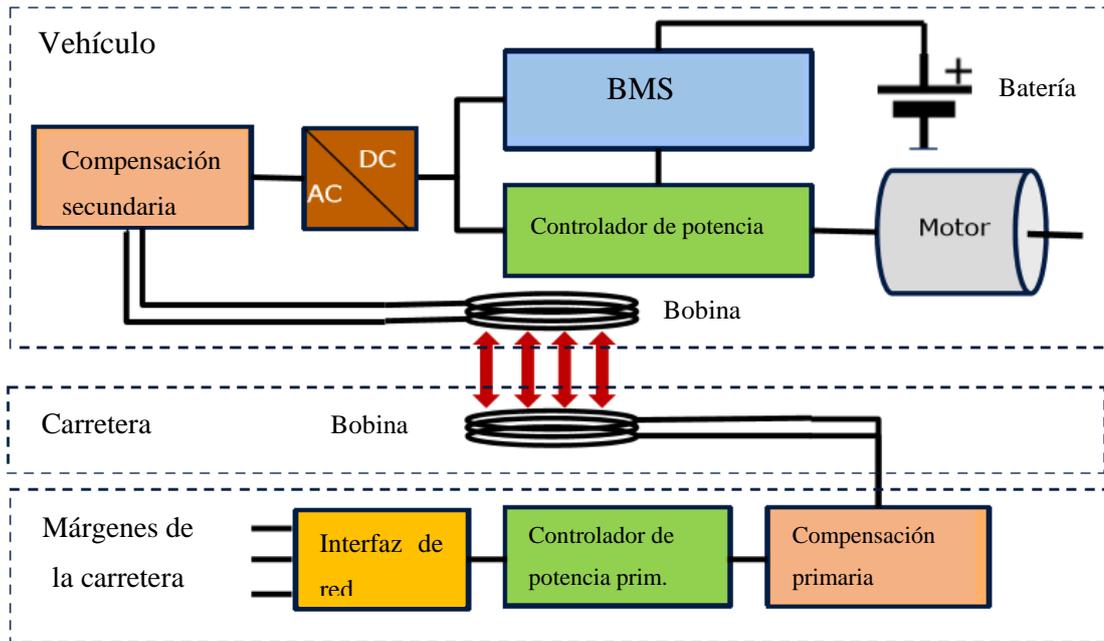


Figura 10. Esquema de funcionamiento del sistema DWPT (Fuente: Feasibility study (2015:224))

- 3) Los circuitos de compensación primarios y secundarios garantizan que las dos bobinas se sintonizan en la misma frecuencia de resonancia. Esto se lleva a cabo variando la capacitancia de los circuitos.
- 4) La corriente se transfiere por inducción magnética al circuito secundario colocado en el vehículo.
- 5) La corriente se convierte en corriente continua (CC), esta será la que alimenta a la batería o directamente al motor eléctrico.
- 6) Finalmente, la energía almacenada en la batería puede ser utilizada por el motor y la electrónica.

El principio de la transferencia inductiva de energía inalámbrica es el mismo para entornos estáticos y dinámicos, pero la extensión de un sistema WPT a un entorno dinámico requiere que el sistema se adapte al movimiento de los vehículos. En un escenario dinámico de transferencia de potencia, una serie de bobinas primarias se despliegan a lo largo del carril de conducción. Para que el sistema en carretera comience a emitir energía cuando el EV esté sobre él, debe haber un sistema de comunicación que reconozca al vehículo que se aproxima y active la transmisión de potencia en el momento oportuno (*Figura 11*). Además, debe estar interconectada con



la red eléctrica para gestionar la información de suministro y pago de energía (sistema de gestión administrativa).

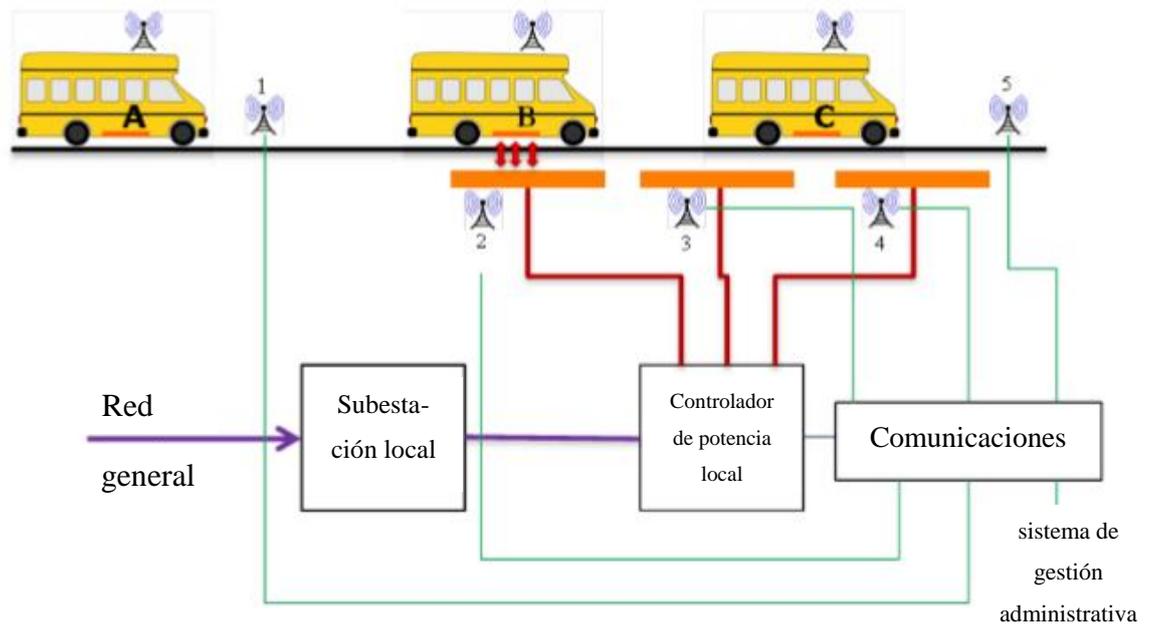


Figura 11. Esquema de comunicación y gestión entre el sistema DWPT y el vehículo (Fuente: Feasibility study (2015:225))

El reconocimiento de los vehículos que vayan a usar esta tecnología puede llevarse a cabo con sistemas más rudimentarios (como un lector de matrículas al comienzo del tramo) o más complejos (como un sistema instalado en el vehículo que permita comunicarlo con el sistema DWPT en tiempo real).

Por otra parte, la estructura del propio sistema DWPT instalado en la carretera depende del tipo de abastecimiento que vaya a dar. Si bien este tema no nos corresponde como ingenieros civiles, si resulta importante conocer sus capacidades para estimar el flujo de vehículos que permite: El *Feasibility Study (2015:91)* planteó dos tipologías de sistemas DWPT (estas tipologías pueden ser distintas en la actualidad tras los avances cosechados por varias casas comerciales, sin embargo las utilizaremos como referencia para nuestras estimaciones) diferenciadas por la potencia que eran capaces de dar y la cantidad de vehículos que podían suministrar a la vez. Ambos sistemas cuentan con una sucesión de bobinas agrupadas en “segmentos”, los cuales reciben energía de unos inversores. Por último, estos inversores están conectados a su vez con subestaciones de la red general:



En la primera disposición (*Figura 12*) cada segmento puede ser ocupado por hasta dos vehículos diferentes, separados aproximadamente cada 25 m. Cada vehículo puede recibir un máximo de 100 kW, independientemente de que sea ligero o pesado.

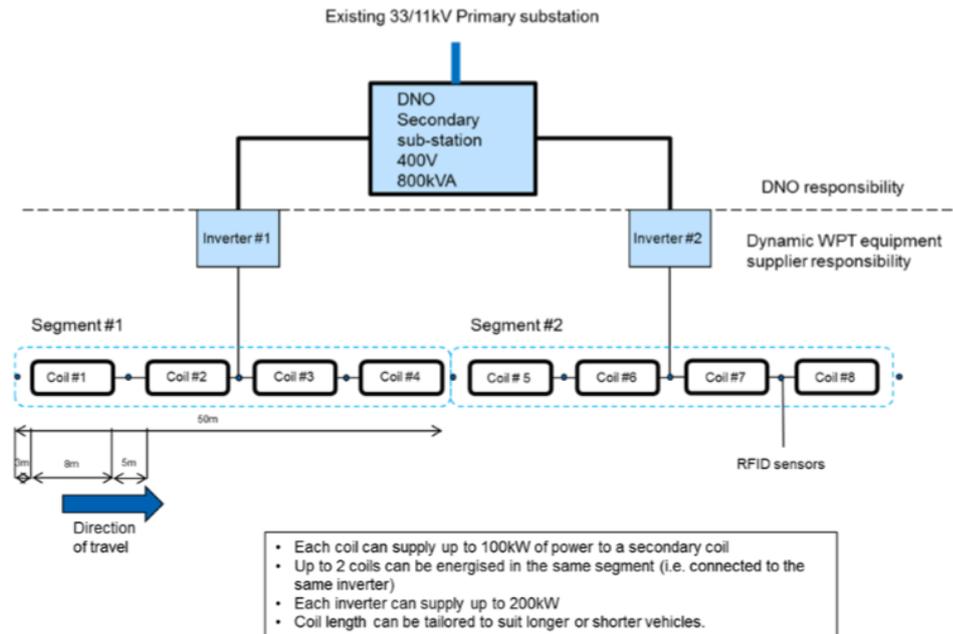


Figura 12. Muestra esquemática de la primera disposición (Fuente: Feasibility study (2015:91))

En la segunda disposición (*Figura 13*) cada segmento solo puede ser ocupado por un vehículo, lo que obliga a mantener una distancia entre dos vehículos sucesivos de aproximadamente 40 m. Cada vehículo puede recibir un máximo de 140 kW, independientemente de que sea ligero o pesado.

Los cálculos del *Feasibility Study* implicaban una serie de suposiciones, la principal es la de instalar estos sistemas en autovías o autopistas de 3 carriles o más por sentido. Esta medida se hace debido a que los sistemas DWPT se diseñaron para aportar energía a una velocidad de 55 mp/h (~88,5 km/h), por lo que una disminución como esta con respecto a los 120 km/h permitidos puede provocar colapsos puntuales en vías de solo dos carriles. Sin embargo, este sistema es perfectamente posible en la mayoría de nuestras vías principales con solo 2 carriles, aunque impliquen estudios de tráfico adicionales. Otras suposiciones fueron solo el carril derecho está equipado con un sistema WPT, que la eficiencia en el traspaso de energía entre la red eléctrica y la bobina secundaria es del 80% y que el factor de potencia es de 0,972.

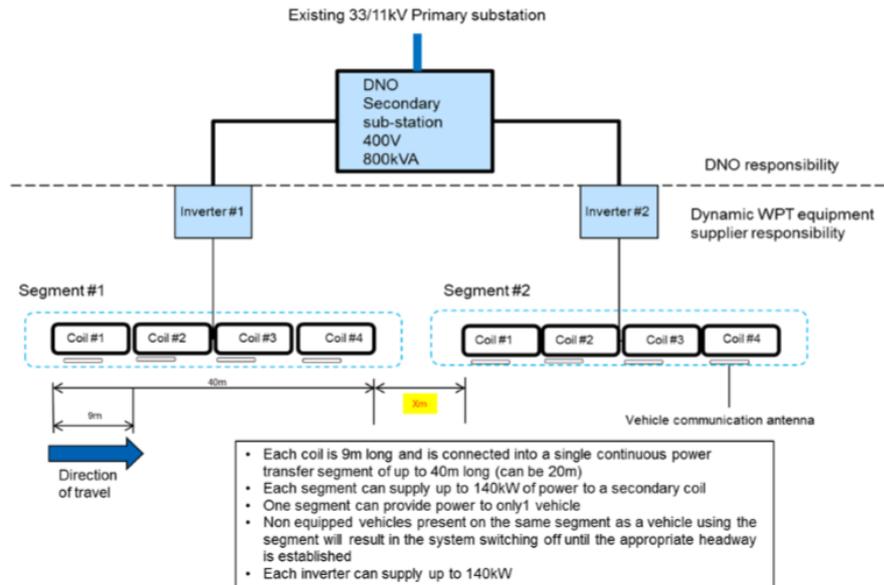


Figura 13. Muestra esquemática de la segunda disposición (Fuente: Feasibility study (2015:93))

Un aspecto importante que no está muy definido es la libertad a la hora de cambiar de un carril con un sistema DWPT a otro que no lo tenga, aunque sea por un breve momento (por ejemplo, para adelantar un vehículo que va más lento). En última instancia, la posibilidad de este movimiento dependerá del grado de comunicación que haya entre el vehículo y el sistema DWPT (como veremos en el *Apartado 3.5.*); si bien, con el dispositivo adecuado, puede ser técnicamente posible.

3.3. Otras aplicaciones de los sistemas DWPT

Ya hemos visto como el principal fin de estos sistemas instalados en las carreteras es el de proporcionar la energía necesaria a los vehículos eléctricos que por ellas circulan, haciendo que algo tan cotidiano como repostar pase a ser una anécdota. Sin embargo, la colocación de una red de sistemas electrónicos a lo largo de la carretera permitiría dotar a estas de otras funciones útiles, tanto para el administrador de las vías como para los usuarios que las utilizan:

Gestión de redes y autopistas inteligentes:

Es decir, ayudar a regular el tráfico proporcionando un flujo regular que evite colapsos y atascos. Este servicio es quizás el más difícil de cuantificar, ya que depende en gran medida de las tasas de penetración de esta tecnología (porcentaje de vehículos



adaptados con la tecnología DWPT sobre el total de la flota de vehículos) y la longitud del sistema desplegado a través de la red de carreteras.

Disposición de comunicación y conectividad:

Dado que no existe una conexión física entre las bobinas secundarias del vehículo y el equipo de alimentación en el suelo, los sistemas DWPT se basan en el uso de comunicaciones inalámbricas para garantizar que el sistema funcione como se pretende. Por ello, sería una buena opción la instalación de otros sistemas inalámbricos como sistema de identificación por radiofrecuencia, Wi-Fi, Bluetooth, etc. Que provean de diferentes servicios o comodidades al usuario.

Apoyo a la automatización de vehículos:

La automatización de vehículos es un tema que ha visto mucha atención en los últimos años. El rendimiento de estos sistemas sería más eficiente con vehículos que circulen exactamente por encima de las bobinas, cosa para la cual se pueden programar a los vehículos totalmente autónomos. Por lo que esta tecnología haría que los trayectos fueran más baratos al evitar la pérdida de energía por una ineficiente conducción humana.

Ahorro y reducción de las emisiones contaminantes:

Esta tecnología solo puede emplearse por vehículos EV, es decir, vehículos eléctricos o híbridos. Esto implica por un lado la utilización de tecnología eléctrica, la cual representa con esta tecnología, según el *Feasibility study* (2015:223) un rendimiento total del 75% (en comparación, los vehículos con motor de combustión interna tienen un rendimiento total del 15-25%), lo que se reflejaría en un coste de consumo increíblemente menor. Por otra parte, la emisión de gases de efecto invernadero debidos a vehículos de combustión interna puede disminuir

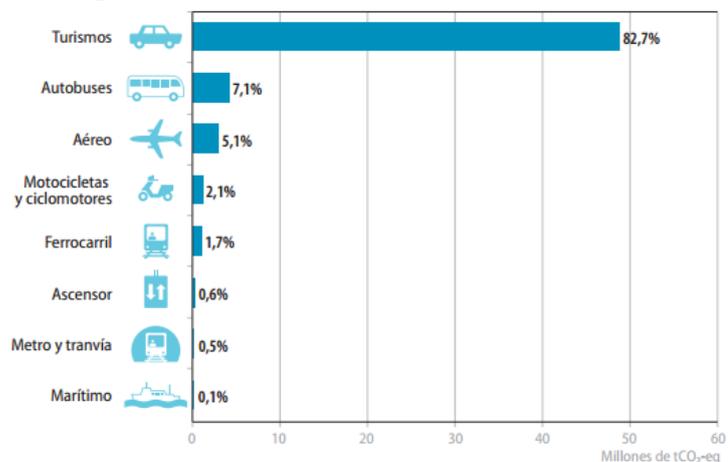


Figura 14. Gases de efecto invernadero debidos a diferentes transportes [millones de t CO₂ eq.] (Gómez Garay, 2015) (Fuente: www.eoi.es)



drásticamente con la propagación de vehículos EV alimentados con esta tecnología. En la *Figura 14* se puede comparar el porcentaje de emisión de estas partículas analizando diversos vehículos.

3.4. Especificaciones técnicas

Vista toda la información de los sistemas DWPT, pasemos ahora a los dos aspectos técnicos que mejor definen cuantitativamente a estos sistemas: La potencia requerida y el costo de instalación más explotación.

Antes de nada, se hace necesario insistir en que toda la información procede del *Feasibility Study*. Como en ese trabajo se estudió concienzudamente los sistemas DWPT desde varios puntos de vista, se consideró suficiente durante la redacción de estas palabras poner los resultados finales debidamente referenciados para poder consultar el documento original en caso de precisar los axiomas, ensayos previos y datos de partida. Con ello se busca evitar sobrecargar este apartado con información y explicaciones redundantes.

3.4.1. Potencia requerida

Depende de dos variables: Los requerimientos de los vehículos³⁴ y la capacidad de transmisión de los sistemas DWPT³⁵.

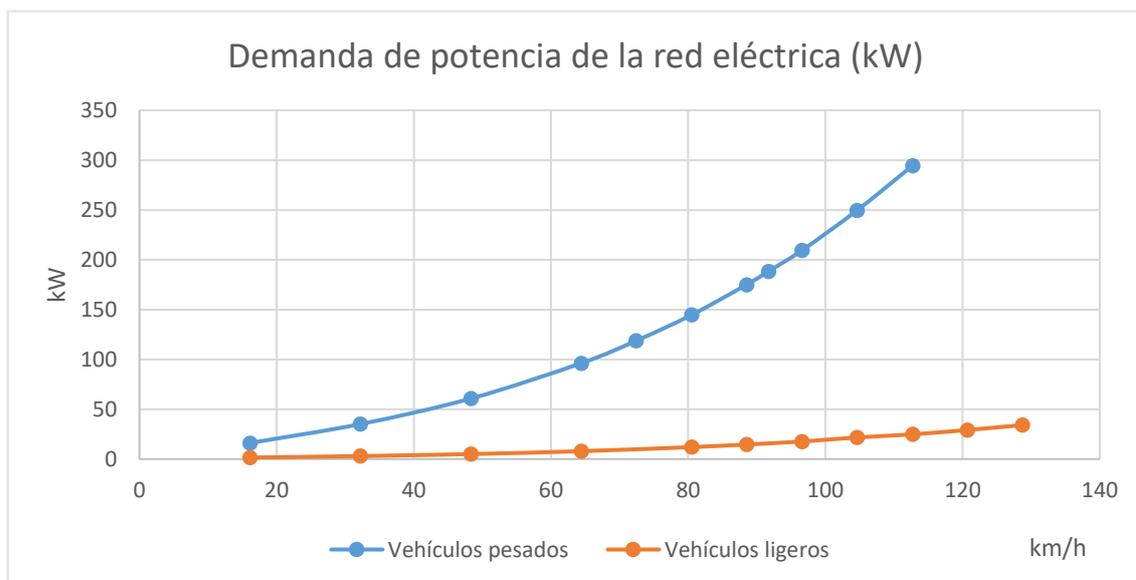


Figura 15. Consumo de potencia de los vehículos ligeros y pesados en función de su velocidad. (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Feasibility Study (2015:90 y 91))

³⁴ *Feasibility study*, pg. 89-91 (Higways England, 2015)

³⁵ *Feasibility study*, pg. 91-94 (Higways England, 2015)



Los requerimientos de los vehículos se han medido de forma experimental y están perfectamente definidos y tabulados (La *Figura 15* los muestra gráficamente).

Pero la última variable resulta más difícil de determinar ya que depende del tipo de sistema DWPT empleado (o, como comentamos previamente, disposición de este), del porcentaje de vehículos con capacidad de usar el sistema (a partir de ahora **penetración**) y de las fluctuaciones en el tráfico a lo largo del día.

Debido a la complejidad de esta variable, el mismo *Feasibility study (2015:201)* planteó dos escenarios claramente diferenciados: uno de demanda media (Opción A) y otro de mucha demanda (Opción B). Depende del caso estudiado, pero para nuestras estimaciones emplearemos ambos escenarios para así obtener un resultado optimista y otro restrictivo.

La **Opción A** tendrá un sistema DWPT capaz de suministrar potencia a un vehículo cada 45 metros, y estará limitado a un aporte de 40 kW para los vehículos ligeros y 140 kW para los pesados. Se estima que el nivel de penetración sea de un 30% para vehículos ligeros y un 50% para vehículos pesados.

La **Opción B** tendrá un sistema DWPT capaz de suministrar potencia a dos vehículos cada 50 metros, y estará limitado a un aporte de 40 kW para los vehículos ligeros y 100 kW para los pesados. Se estima que el nivel de penetración sea de un 50% para vehículos ligeros y un 75% para vehículos pesados.

Nótese que ni una opción ni otra suministran suficiente potencia a un vehículo pesado yendo a su máxima velocidad, por lo que estos necesitarán, en cualquier caso, un sistema extra que supla el déficit (p.e. una batería).

3.4.2. Energía eléctrica consumida y rendimiento

Se define energía eléctrica como la potencia requerida por un sistema eléctrico multiplicado por el tiempo que se usa. Resulta fácil, por tanto, determinar la energía eléctrica que el sistema DWPT aporta a un vehículo yendo a una determinada velocidad por cada km recorrido.



Si bien la unidad en el sistema internacional (SI) de la energía es el Julio, para nuestro caso resulta una unidad muy pequeña. Por ello es más conveniente usar el kilovatio-hora (kWh), entendiéndose como la energía consumida por un aparato de 1 kW de potencia durante una hora:

$$Energía(J) = Potencia (W) \times Tiempo(s)$$

$$Tiempo \text{ en recorrer } 1km (h) = 1(km) \times \frac{1}{Velocidad \left(\frac{km}{h}\right)}$$

$$Energía(kWh) = Potencia \text{ requerida } (kW) \times \frac{1}{Velocidad \left(\frac{km}{h}\right)}$$

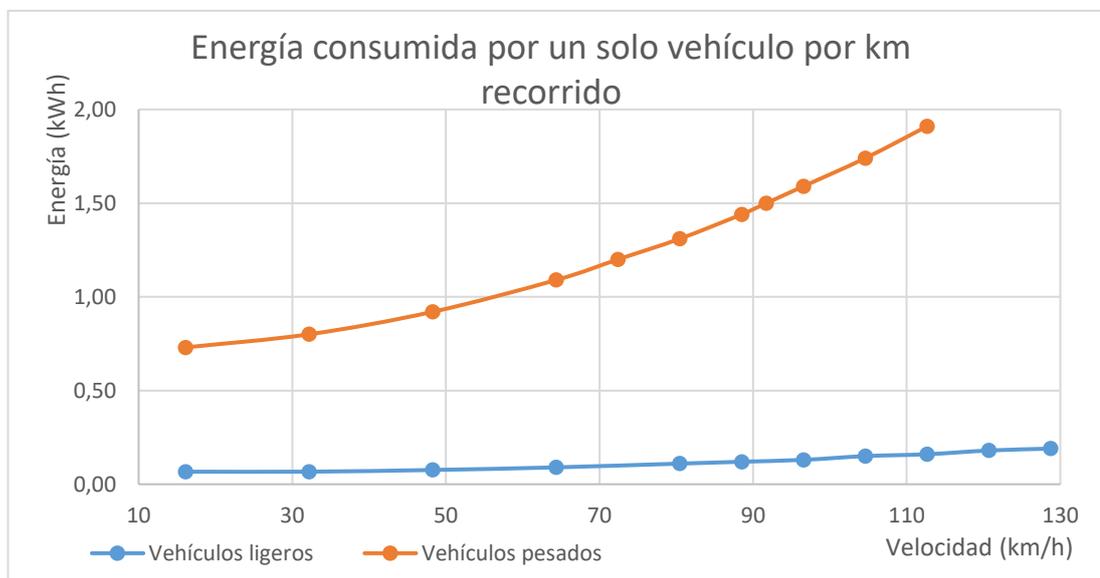


Figura 16. Consumo de energía de los vehículos ligeros y pesados, por km recorrido, en función de su velocidad

(Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de potencia requerida)

En la *Figura 16* podemos ver el consumo de energía por kilómetro de cada vehículo. Sin embargo, el consumo bruto sería mayor al existir una serie de pérdidas en el traspaso de energía entre las bobinas y debido al rendimiento del motor. Como mínimo, teóricamente la eficiencia de los motores eléctricos es del 75%³⁶, mientras que la eficiencia del traspaso de energía entre las bobinas (sistema DWPT) es del 80%³⁷. Lo que da una eficiencia total de estos sistemas, en un escenario pesimista, del 60% (muy por encima del 25% de los motores convencionales³⁶).

³⁶ Feasibility study, pg. 223 (Higways England, 2015)

³⁷ Feasibility study, pg. 94 (Higways England, 2015)



3.5. Aspectos comerciales de los sistemas DWPT

En este apartado se mencionarán brevemente los detalles referidos a la gestión de los sistemas DWPT desde el punto de vista del uso que dan de ellos los usuarios y del posterior abonado de la tarifa eléctrica.

El uso de estos sistemas requiere energía eléctrica suministrada por la red general, la cual ha de ser abonada por los propios usuarios. La entidad encargada de administrar el abastecimiento y el cobro puede ser una empresa privada o la misma administración, según el sistema de gestión adoptado (ver *Apartado 3.6.*). Mientras que el coste de la energía sería con una tarifa industrial (como la energía suministrada en las vías férreas). Por su parte, el *Feasibility study (2015:108-111)* planteó un sistema de tarifas para los usuarios según la ruta, el tipo de vehículo, etc. Sin embargo este planteamiento se escapa del alcance de este proyecto. Para más información sobre los costes ver el *Apartado 4.3.1.*

Anteriormente, en el *Apartado 3.2.*, mencionamos la necesidad de reconocer a los usuarios de esta tecnología para que los sistemas DWPT puedan suministrar la energía eléctrica automáticamente conforme el vehículo se desplazaba por encima. Este mismo sistema ha de calcular también la energía suministrada para poder proceder luego a su cobro. En resumen, el sistema ha de reconocer al usuario, determinar su posicionamiento en tiempo real para poder activar las bobinas con el mínimo desfase y contabilizar la energía proporcionada para proceder a su posterior cobro. Para ello, el *Feasibility study (2015:124-125)* planteó las siguientes soluciones:

- 1) Sistemas de reconocimiento automático de matrículas al comienzo y final del tramo con sistemas DWPT: cuenta con la ventaja de ser el más barato, sin embargo no resulta viable al depender en exclusiva de las condiciones de visibilidad, lo que lo anularía en caso de mal tiempo o de que los vehículos circulen demasiado juntos en situaciones de retención.
- 2) Lector de identificación por ondas de radio: funcionan en cualquier situación de visibilidad y su coste no es muy elevado, sin embargo tampoco resulta viable por tener un rango de actuación muy corto (4 metros) y funcionar solo ante velocidades reducidas.



- 3) Lector de identificación por microondas: funciona en cualquier condición climática, tiene un rango de 10 metros y permite circular hasta los 200 km/h; sin embargo requiere un coste de instalación elevado en los vehículos.
- 4) Sistema de circuito y transpondedor en carretera: Cuenta con las mismas ventajas y desventajas que el lector por microondas, sin embargo requiere una instalación compleja en la carretera.

De estas opciones, la recomendada por el *Feasibility study (2015:125)* era el lector de identificación por microondas (MFID por sus siglas en inglés) pese a su mayor precio de adquisición. De hecho, este mismo estudio alertaba acerca de la posibilidad de fraude al manipular el equipo. Para evitarlo propuso la vinculación del vehículo con una cuenta creada por el conductor, cuenta que contaría con sistemas de seguridad y a la que se enviaría la información del uso de los sistemas DWPT y su correspondiente coste.

Así, el MFID soluciona tres grandes problemas en la utilización de los sistemas DWPT, sin embargo, la verdadera complicación radica en poder gestionar toda esta información en tiempo real. Para ello, el *Feasibility study* dedica todo el Apartado 7.3. de su estudio al “Sistema de gestión de la infraestructura” (IMS por sus siglas en inglés). El IMS consiste en todo el sistema, tanto físico (Hardware) como electrónico (Software), que gestiona y procesa la información de forma autónoma y en tiempo real, para así proporcionar controles lógicos al sistema DWPT en general y a los sistemas físicos de carga en particular. En otras palabras: el IMS es el ordenador que detecta la información que le envía el MFID sobre el usuario que se acerca, se encarga de suministrarle la cantidad precisa de energía, para finalmente enviar toda la información al administrador del sistema DWPT y proceder así al cobro; todo ello de forma autónoma.

El IMS actúa como un Software SCADA, el cual es un concepto que se refiere a un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y control el proceso automáticamente. Provee toda



la información que se genera en el proceso productivo y permite su gestión e intervención³⁸.

Las consideraciones principales del sistema IMS para su funcionamiento incluirían:

- La identificación del usuario
- La longitud del tramo del sistema DWPT
- El apagado de emergencia ante sobrecargas considerables
- La información de uso del sistema por el usuario
- El monitoreo remoto
- La contabilidad y facturación

Por último, la vida útil de los sistemas DWPT se ha proyectado en 20 años según el *Feasibility study*. Esta información no ha podido ser contrastada con otros sistemas más actuales, pudiendo variar considerablemente según la tipología en la puesta en obra (ver *Apartado 4.2.*).

3.6. Responsabilidades de las partes afectadas

Normalmente la decisión de construir grandes obras de carreteras corresponde a la administración (sea estatal, autonómica, etc.), la cual justifica la inversión en función de motivos técnicos y/o políticos concretos. Sin embargo, una obra de estas características implicaría la participación de muchos más actores debido a la novedad y costos de los sistemas DWPT.

Si bien un estudio completo sobre los agentes implicados exige mucha más información (y de hecho daría para la elaboración de un TFG en sí mismo), en el presente trabajo nos limitaremos a destacar los aspectos más importantes de los tres principales actores involucrados, dejando los aspectos más relevantes, como el proceso constructivo o la participación económica, para más adelante.

³⁸ (Wikipedia, 2017)



El presente capítulo está basado en diferentes fragmentos del *Feasibility study*. Cabe destacar que este estudio es de hace dos años, por lo que parte de la información puede haber quedado desfasada. Para evitarlo se procurará complementar los apartados con datos más actuales debidamente referenciados.

3.6.1. Compromisos de los usuarios³⁹

El compromiso de los usuarios se refleja en la cantidad de usuarios de esta tecnología que habrá en las carreteras. De ellos dependerá la tasa de penetración que destacamos previamente. Además, como se comentó en el apartado anterior, los usuarios deberán abonar el consumo de energía que el IMS contabilice. Este pago se podrá hacer directamente a la eléctrica o primero a la administración para que esta lo abone a la eléctrica.

Existen dos categorías de usuarios principales: los conductores de vehículos privados (principalmente turismos) y los conductores profesionales dedicados al transporte de pasajeros y mercancías (principalmente autobuses y camiones).

La novedad del sistema implica una serie de inversiones iniciales que requiere de las empresas una cierta capacidad solvente. Por ello, las empresas dedicadas al transporte consultadas en el *Feasibility study (2015:27)* fueron aquellas con presencia nacional o, al menos, con una fuerte presencia regional. En cuanto a su disposición a adoptar este sistema, el mismo estudio concluyó que la tecnología de vehículos EV aún tenía que resolver grandes problemas para que resultara rentable. Tal como podemos observar en la siguiente traducción de la página 31 de dicho estudio:

Algunas operadoras consideran que el mejor rendimiento de los nuevos motores Euro VI para carga liviana y pesada cumple con el requisito de reducir las emisiones sin aumentar el riesgo para las empresas, mientras que las tecnologías de combustibles alternativos crean un riesgo de inversión. El valor residual de los vehículos DWPT también resultó ser un factor de disuasión en las decisiones sobre el reemplazo de vehículos comerciales, ya que se espera que los vehículos equipados con DWPT cuesten más que los vehículos diésel estándar y sin embargo tengan un menor valor residual en las primeras etapas de adopción.

Los operadores comerciales requieren un retorno de la inversión de 18 meses a tres años. Por lo tanto, cualquier costo adicional de arrendamiento o compra de vehículos tendría que equilibrarse con ahorros en los costos de operación para compensar estos costos adicionales durante este período de

³⁹ (Feasibility study. Capítulo 4, 2015)



tiempo relativamente corto. Las partes interesadas de la industria indicaron que los factores importantes en las decisiones de inversión relacionadas con la tecnología DWPT serían la automatización y la facilidad de uso del sistema DWPT, la practicidad y la simplicidad de la carga y el nivel de reducción de CO2.

La encuesta mostró que, aunque los encuestados eran principalmente positivos con los vehículos eléctricos, era poco probable que tuvieran vehículos eléctricos en los próximos cinco años; para la mayoría, los EV se consideraban demasiado caros y no ofrecían suficiente autonomía para ser útiles.

De estos datos, si bien a priori no muy halagüeños, se puede concluir que las empresas no descartan la opción de los sistemas DWPT, incluso se muestran afines. Sin embargo, antes necesitan la garantía de que los vehículos EV, más caros y con menor valor residual, se amorticen en un corto espacio de tiempo. Cosa que ocurrirá cuando la tecnología avance hasta abaratarse y resuelva los problemas propios de motores eléctricos.

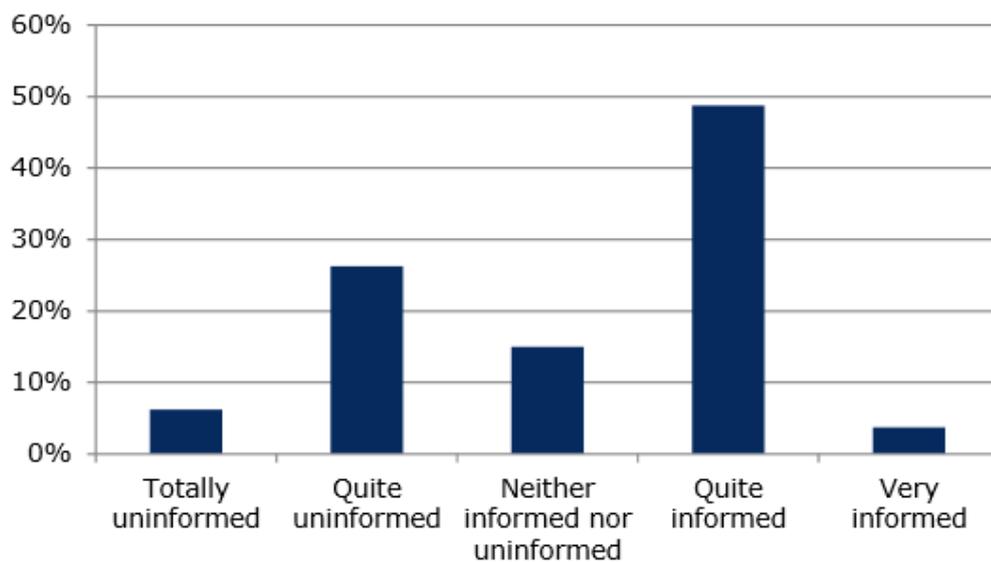


Figura 17. Gráfica que muestra cómo se consideran los encuestados de informados acerca de los vehículos EV (en valores relativos). [en inglés]
(Fuente: Feasibility study (2015:29))

Por otro lado, las conclusiones extraídas del sector privado son totalmente distintas. En este caso el principal problema es la desinformación del público sobre los vehículos EV (Figura 17), si bien, por regla general, suele existir un consenso sobre la utilidad y beneficios de esta tecnología.



El estudio realizado por el *Feasibility study (2015:27)* pretendía reflejar la opinión de gente con una cierta experiencia en el tema, para ello preseleccionó 200 personas que tenían o habían tenido un vehículo EV para elaborar un cuestionario completo por internet. Resulta llamativo como hasta un tercio de ellos consideraban que no estaban bien informados acerca de este tipo de vehículos (*Figura 17*). El siguiente fragmento corresponde a traducciones literales de las páginas 27 y 31:

El estudio demostró que, para entender a los consumidores privados, es necesario comprender sus actitudes, las cuales han demostrado ser un factor determinante clave para comprender el uso futuro de vehículos eléctricos y vehículos pesados (ETI, 2013). Las actitudes se refieren a una variedad de atributos personales tales como la preocupación, la conciencia, la comprensión, la opinión y las creencias.

[A la vista de los resultados,] los consumidores parecían confiar en la tecnología DWPT y solo una minoría tenía reticencias sobre la seguridad, pero una gran proporción dijo que todavía estaría preocupado por quedarse sin carga. Esto sugiere que la autonomía sigue siendo una barrera psicológica que debe abordarse a través del marketing, la información, los avances tecnológicos y / o la experiencia adicional.

Las siguientes gráficas muestran parte las respuestas de los consultados. He escogido estas gráficas debido a que son las más representativas a la hora de expresar la opinión de los usuarios con respecto a los vehículos EV y los sistemas DWPT:

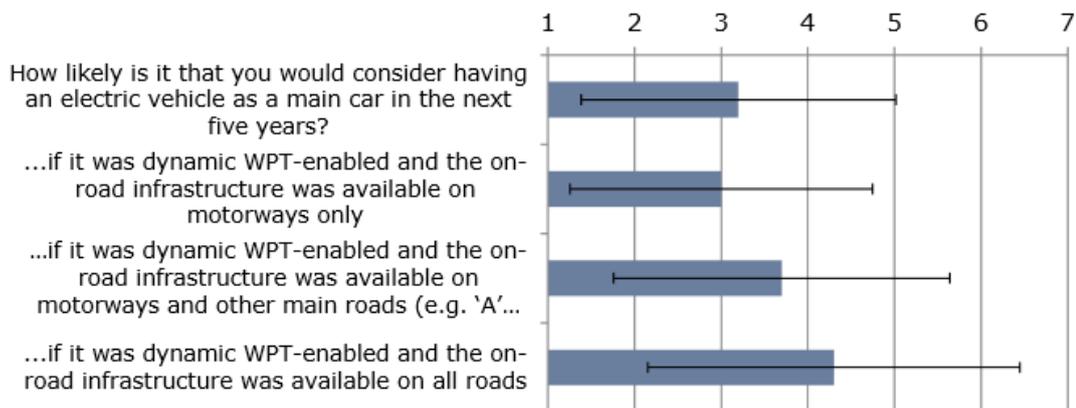


Figura 18. Consumo de automóviles: Probabilidad esperada de compra de EV: respuesta media e intervalo (1 = nada probable, 7 = muy probable). [en inglés]
(Fuente: Feasibility study (2015:31))

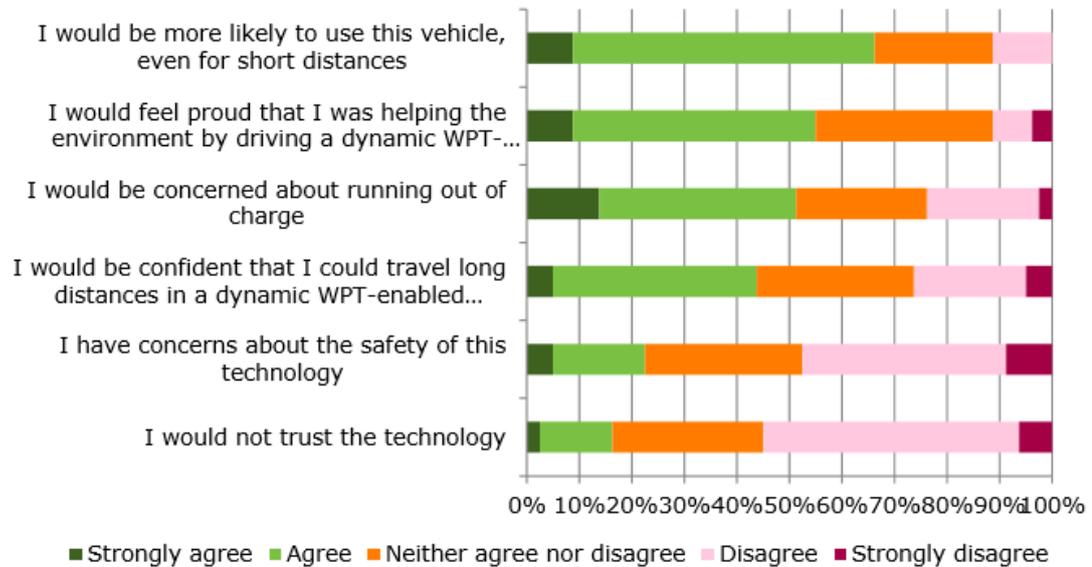


Figura 19. Consumidores de automóviles: nivel de acuerdo con otras declaraciones WPT. [en inglés] (Fuente: Feasibility study (2015:32))

A la vista de esto, se puede concluir que existe una gran apreciación del público, lo que puede interpretarse como una potencial cantidad de usuarios. Sin embargo, y al igual que en las empresas privadas, la tecnología de los vehículos EV todavía ha de resolver grandes problemas a la par que se ha de informar y concienciar al público en general.

Hoy en día existen medidas en este camino, ya sean por planes financiados por el Estado como el Plan MOVEA⁴⁰ (que nombramos anteriormente), o por la tendencia que muestran algunas casas comerciales con estrategias de márketing sobre sus vehículos EV⁴¹ (de las que hablaremos más adelante). Una mención destacable es la de la marca comercial “Tesla”, la cual lleva revolucionando el sector de la automoción con avances que suelen ser mediáticos⁴².

Como conclusión a todo lo dicho, podemos destacar la valoración positiva de la tecnología DWPT entre los usuarios, tanto profesionales como privados. Sin embargo se hace necesaria la mejora de la tecnología en vehículos EV que abaraten estos vehículos y que permitan una mayor autonomía. Además se hace fundamental informar a la sociedad.

⁴⁰ (Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, 2017)

⁴¹ (Lexus, 2017)

⁴² (Escuela de Organización Industrial, 2016)



Por último, se concluye que los sistemas DWPT no se puede entender y valorar como una tecnología independiente, sino que son y serán un complemento de la conducción de vehículos EV. De ahí que, en las encuestas de usuarios, tanto privados como comerciales, coincidan en “el problema del huevo y la gallina”: los resultados muestran que las decisiones de compra de vehículos EV aumentarán considerablemente con una amplia red de sistemas DWPT, pero la oportunidad de negocio inicial será nimia sin una demanda de usuarios previa.

3.6.2. Compromisos del resto de empresas del sector privado afectadas

Hemos destacado la perspectiva de las empresas privadas dedicadas al sector del transporte, sin embargo estas no son las únicas afectadas de forma directa o indirecta. En este apartado mencionaremos empresas del sector energético, del sector de la automoción y del sector de las telecomunicaciones que proporcionen otros servicios a la red.

Con “privado” nos referimos a que no tienen intervención directa del estado, aunque esto no sea del todo exacto para el caso del sector energético. Con ello se pretende diferenciar el papel de estas empresas con respecto al papel de la administración (de la que hablaremos en el siguiente apartado) y, sobre todo, facilitar la comprensión de la importancia y perspectiva de estas empresas con respecto a los sistemas DWPT.

La importancia de las diferentes casas comerciales de vehículos quedó clara en el apartado anterior cuando destacamos la relación entre los sistemas DWPT con los vehículos EV. Sin embargo, no solo basta con la inversión que estas empresas dediquen al desarrollo de tecnologías EV, también se hace fundamental que estas se adapten a los sistemas DWPT para que el vehículo pueda aprovecharse de esta tecnología.

Explicado de otra manera: el aprovechamiento de los sistemas DWPT conlleva la instalación de sistemas añadidos con los que acondicionar el motor eléctrico sin afectar al rendimiento y seguridad de este. De ahí que necesiten contar con la garantía del fabricante (sobra decir que la garantía del fabricante debe cumplir a su vez con la legislación de tráfico vigente).



El estudio de estos sistemas se escapa del alcance del presente proyecto, sin embargo destacaremos que este puede ser de elaboración propia (por parte de la marca) o bien como adaptación de un sistema ya inventado: como los sistemas desarrollados por Bombardier (el sistema Primove)⁴³ o Qualcomm (el sistema Halo)⁴⁴. Como conclusión se puede extraer que la instalación de estos sistemas en cada vehículo EV repercutirá en el precio final de este.

Las compañías energéticas serán las encargadas de proveer potencia y energía eléctrica desde la red general hasta las bobinas situadas debajo de la calzada. El aporte de potencia y energía necesarios se explicó en el *Apartado 3.4.*, mientras que el aspecto económico se definirá más adelante.

De estas compañías hay que destacar su responsabilidad a la hora de dimensionar las instalaciones necesarias para el correcto funcionamiento de los sistemas DWPT. El *Feasibility study (2015:175-176)* fue consciente de la dificultad que implicaba, de ahí que mencionara la necesidad de tramos de prueba donde testear los sistemas:

Los efectos de cargas significativas en la red son bien entendidos por la industria de suministro de electricidad. Se les exige que provean de un suministro estable y seguro a clientes residenciales y comerciales a la vez que hacen frente a las cargas más grandes y perjudiciales de algunos usuarios industriales (hornos de arco, por ejemplo). Sin embargo, la carga presentada por un sistema DWPT no es típica. Las bobinas de transferencia de energía incrustadas en la infraestructura de la carretera deben proporcionar ráfagas de energía muy cortas (tan breves como unos pocos milisegundos a la vez), a niveles tan altos como 100 kW o más. Este tipo de carga pulsátil muy irregular es inusual y posiblemente única. Varios proyectos han especulado como posibles soluciones; por ejemplo, suministrando almacenamiento de energía local en forma de sistemas de batería de segundo uso para suavizar la potencia.

Y más adelante, en el *Feasibility study (2015:178)*:

La red general a alta tensión (HV por sus siglas en inglés) suministraría a una subestación local que convierta la HV a baja tensión (LV por sus siglas en inglés) trifásica. La LV se distribuiría a las “Unidades a los Laterales de la Carretera” (RSU por sus siglas en inglés) que proveen a los sucesivos abastecedores de los sistemas DWPT. Estas unidades RSU normalmente se ubicarían cerca del borde de la carretera para minimizar las pérdidas incurridas en la transferencia de energía desde las RSU a las bobinas primarias en el camino. Es probable que la distribución de la potencia desde

⁴³ (Primove.Bombardier, 2017)

⁴⁴ (Qualcomm, 2017)



las RSU a las bobinas primarias varíe entre los abastecedores; algunos pueden tener más de una RSU, y algunos pueden incorporar parte de la electrónica de control en la carretera en lugar de en la RSU. Será responsabilidad de los proveedores en esta versión de prueba proporcionar los requisitos técnicos de instalación completos para garantizar que sus equipos estén instalados correctamente. La ubicación de la subestación no es determinante. El tramo de pruebas en sí podría ser un bucle o una sola recta con áreas de giro en cada extremo

Por último, están los sistemas de telecomunicación para proveer de otros servicios adicionales a los usuarios, como Wi-Fi o cobertura. Estos servicios dependen de proveedores de telecomunicación y, al ser un servicio adicional, su puesta en marcha será decisión del operador de la carretera.

3.6.3. Compromisos de la administración

La titularidad y gestión de la carretera donde estarían instalados los sistemas DWPT sería de la administración. La única recomendación sobre la carretera, mencionada en el *Feasibility Study*, es que sea una autopista (en el caso de España, la implantación de estos sistemas en autovías requeriría estudios adicionales de seguridad al existir una cantidad de enlaces mucho mayor que en las autopistas) de 3 o más carriles para evitar posibles saturaciones debido al sobreuso del carril derecho (donde estaría instalados los sistemas DWPT). Independientemente de que estas carreteras sean estatales, autonómicas, municipales o de cualquier otra índole.

Los compromisos de la administración pasan, por tanto, por la inversión inicial, el mantenimiento y la gestión a lo largo de la vida útil de los sistemas DWPT. Adicionalmente deberán de organizar al resto de actores, por mencionar las principales funciones:

- Imponer las condiciones de uso a los usuarios.
- Mantener un seguimiento y administrar el uso y cobro mediante el sistema de gestión de la infraestructura (IMS).
- Definir los costos del kWh a las compañías eléctricas y actuar en caso de grandes variaciones en el precio de la electricidad con el fin de mantener unos costos estables.
- Asegurar el pago de los usuarios a la compañía eléctrica.
- Imponer las exigencias técnicas a las marcas de vehículos.



- Estudiar y actualizar la información disponible acerca de los sistemas DWPT con el paso del tiempo para mejorar la eficiencia de su uso y su seguridad.
- Contratar y administrar servicios adicionales como el Wi-Fi, red 5G, etc.

Como se puede observar, el papel de la administración resulta clave, siendo fundamental determinar qué organismo sería el encargado de gestionar estos sistemas (DGT, Ministerio de Fomento, algún organismo nuevo creado especialmente para ello, etc.). Sin embargo, en este proyecto no se recomendará que organismo debería gestionarlo por considerarlo una cuestión fuera de su alcance.

El interés de esta inversión por parte de la administración es quizás la parte más comprometida del proyecto. Se ha destacado reiteradamente la novedad de estos sistemas y la falta de una necesidad actual por parte de la población; de ahí que su instalación, en lugar de responder a una necesidad actual, pretenda responder a una potencial necesidad futura y, sobre todo, facilitar la transición a los vehículos EV. En otras palabras, la instalación de estos sistemas implica una oferta que busca atajar y a la vez crear una incipiente demanda.

Las ventajas de esto se han mencionado largo y extendido en el *Capítulo 1* y en el *Capítulo 2*: no solo permitiría al gobierno cumplir con todos los compromisos internacionales pendientes para el futuro a corto y medio plazo, sino que también reducirá los niveles de polución de los vehículos de combustión en los núcleos poblados.

Un ejemplo referido a esto último: recientemente la contaminación atmosférica fue ampliamente estudiada por el Banco Mundial en su informe *“The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action”*⁴⁵, publicado en septiembre de 2016. Este estudio concluyó que la economía española pierde unos 42.951 millones de dólares (2,8% del PIB)⁴⁶ por este motivo, así como genera unas 15.000 muertes prematuras⁴⁷. De estas, el número estimado de víctimas directamente relacionadas con la contaminación de vehículos asciende a 3.897⁴⁸ (más de 3 veces el número de víctimas debido a accidentes de tráfico). Si bien la adopción de un porcentaje cada vez mayor de vehículos EV no solucionará la contaminación atmosférica, si que supondrá

⁴⁵ (Banco Mundial, 2016)

⁴⁶ (El País, 2015)

⁴⁷ (Eldiario.es, 2016)

⁴⁸ (El Mundo, 2017)



una disminución más que notable. En el *Apartado 4.3.3.* y en el *Apartado 4.3.4.* se destacan todos los beneficios que supondría la instalación de estos sistemas, tanto para la administración como para el resto de los actores.

El estudio también planteó la posibilidad de participación conjunta de capital privado y público en la construcción y mantenimiento de este tipo de infraestructuras. Las fórmulas podrían ser diferentes: desde la construcción pública y gestión y mantenimiento privada; hasta la construcción, mantenimiento y gestión con fondos mixtos. Sin embargo, esta cuestión queda fuera del alcance de este proyecto.



Capítulo 4

Metodología

Determinar la viabilidad de un sistema completamente nuevo implica estudiarlo desde diferentes perspectivas con el fin de valorar y cuantificar sus ventajas e inconvenientes. Este proceso también tiene sus valoraciones subjetivas, las cuales varían según la opinión de cada persona. Como destacamos a principios del apartado 3.5., la inversión en obra pública responde casi siempre a motivos técnicos y/o políticos. Si bien los motivos políticos se escapan de nuestro alcance, si podemos procurar un estudio que justifique, llegado el caso, una base técnica para esta nueva tecnología.

En el anterior capítulo se ha insistido en las ventajas que los sistemas DWPT tienen en la reducción de la contaminación y en la consecución de los compromisos internacionales. Pero, al fin y al cabo, la reducción en la polución depende del grado de penetración de esta tecnología en nuestro parque móvil, por lo que sus potenciales logros siempre podrán ser discutibles. En el presente capítulo hablaremos de los aspectos más objetivos, es decir:

- Puesta en obra. Es decir, las distintas formas que se han planteado para colocar esta tecnología en las carreteras actuales y futuras.
- Valoración económica según diferentes escenarios. Lo que se traduce en unos costes finales por kilómetro.

La intención es, una vez terminado este capítulo, contar con toda la información necesaria para extraer las conclusiones pertinentes.



4.1. Normativas y disposiciones legales

El presente proyecto se basa en informes, noticias, proyectos y demás documentación de dominio público; pero también tiene como referencia numerosas normativas y disposiciones legales.

Como normativas se entiende las recomendaciones y las normalizaciones sobre procesos, sistemas y documentación. Es decir, la base sobre la que asienta toda la información técnica del presente proyecto. Por su parte, las disposiciones legales abarcan todos los decretos y legislaciones redactadas y cuyo cumplimiento es obligatorio. A continuación se enumerarán las más importantes (algunos de los cuales ya se mencionaron previamente):

- **UNE 157001:2014** Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico
- Ley de contratos del estado aprobado por el decreto 923/1965 de 8 de abril.
- Reglamento general de contratación para aplicación de dicha ley RD 3354/67. de 28 de diciembre.
- **LEY ORGÁNICA 16/2007**, de 13 de diciembre, complementaria de la Ley para el desarrollo sostenible del medio rural.
- **Ley 21/2013**, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- **REAL DECRETO 661/2007**, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- **LEY 40/1994**, de 30 de diciembre, de ordenación del Sistema Eléctrico Nacional.
- **REAL DECRETO 2366/1994**. de 9 de diciembre. sobre producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas. de cogeneración y otras abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables.
- **LEY 8/1990**, de 25 de julio, sobre reforma del régimen urbanístico y valoraciones del suelo
- **LEY 82/1980**. de 30 de diciembre. sobre conservación de energía.
- **DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO** de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.



- Convenio relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural de Europa (**Convenio de Berna**) de 1979, ratificado por la Unión Europea.
- **DECLARACIÓN DE PARÍS SOBRE LA EFICACIA DE LA AYUDA AL DESARROLLO**
- **Plan Energético Nacional 1991-2000.**
- **El Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020** relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, y atendiendo a los mandatos del Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial y de la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible.

4.2. Puesta en obra

La ejecución de obras de carretera han de estudiarse atendiendo a las características propias de los tramos afectados. Así, si la instalación de los sistemas DWPT se realiza en una autovía o autopista, lo más práctico sería ejecutarse por la noche (cuando el tráfico sea menor) y afectando solo al carril derecho (donde irán instalados estos sistemas). Mientras que en un tramo urbano debería estudiarse las posibles afecciones al tráfico, a los residentes, la existencia de vías alternativas donde desviar el tráfico, la existencia de servicios afectados (alcantarillado, tuberías de gas, redes de telefonía, ...), etc.

Como los detalles de la ejecución de una construcción en particular se han de estudiar minuciosamente en su correspondiente “Proyecto de construcción” y “Proyecto de trazado”, en el presente capítulo solo destacaremos los métodos constructivos. Si bien no se entrará en este aspecto (debido a la falta de información y a lo complejo que resultaría), es evidente que la ejecución de cualquiera de los métodos han de cumplir con las condiciones descritas en las normativas españolas para la construcción de carreteras: como la 6.1-IC, 6.3-IC, PG-3, disposiciones municipales, etc. Para ello se recomienda la previa construcción de tramos de prueba.

El *Feasibility study*, en su apartado 6.4., estudió tres métodos constructivos para la instalación de sistemas DWPT. A continuación los nombraremos por orden de menos a más invasivo, destacando sus ventajas e inconvenientes y centrándonos en los detalles y afecciones que supondría su instalación:



4.2.1. Método basado en zanjas

Como su nombre indica, consiste en cortar una franja de carretera a modo de zanja, dentro de la cual se colocará un molde de hormigón donde irán situadas las bobinas y demás sistemas. A continuación se rellena y se coloca una capa de revestimiento. En la siguiente figura se puede ver de forma esquemática:

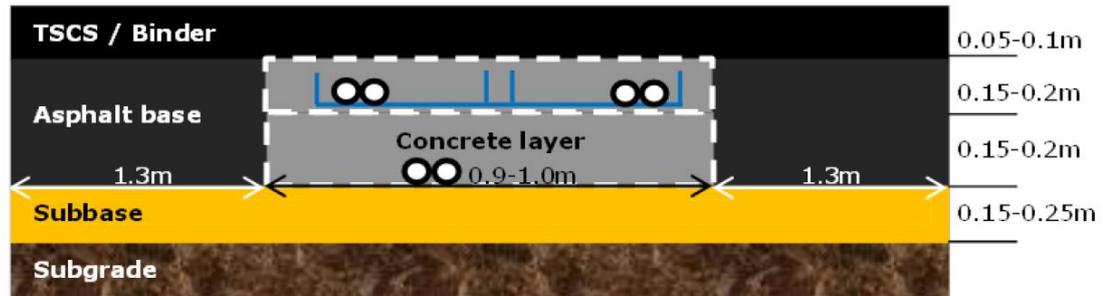


Figura 20. Esquema de las diferentes capas según el método basado en zanjas. [en inglés]
(Fuente: Feasibility study (2015:78))

Este método es el más barato ya que solo manipula en parte la infraestructura ya construida, sin embargo, la introducción de una sección de hormigón dentro del pavimento casi con seguridad generaría fisuras reflejadas en la superficie asfáltica en contacto con el hormigón, así como también se agrietarán las zanjas transversales por donde se comunican las bobinas con las subestaciones en los márgenes de la carretera. Para evitarlo el *Feasibility Study* propone el uso de membranas antifisura tipo S.A.M.I. o la puesta en obra de mallazo entre el hormigón y el asfalto. Dichos sistemas se han utilizado en algunos tipos de raíles incrustados (*Figura 21*), donde el raíl está contenido dentro de una estructura de hormigón en lugar de estar construido sobre durmientes y balasto. En estas soluciones el raíl se mantiene dentro de un elastómero



Figura 21. Solución de membrana elastomérica para un conjunto raíl- travesía
(Fuente: Feasibility study (2015:78))

con un manguito de plástico. Esto separa físicamente el raíl de acero del hormigón y reduce la vibración y el ruido. Otra opción que podría considerarse sería inclinar los lados de la zanja para reducir los esfuerzos verticales.



Para la excavación de la zanja, bastan con zanjadoras que permita cortes de entre 0,35 y 2,2 metros de ancho por 0,35 metros de profundidad. Aunque para grandes actuaciones se puede plantear la fabricación de equipos especializados (Figura 22). Un detalle importante recogido en el



Figura 22. Zanjadora especializada en cunetas
(Fuente: Feasibility study (2015:79))

Feasibility Study (2015:78) es el de añadir una cobertura final de material asfáltico a todo el ancho de la carterá de unos 10 centímetros para proteger el sistema, favorecer la homogeneidad del carril y evitar las grietas mencionadas previamente.

Por su parte, el molde de hormigón puede ser prefabricado o in-situ, si bien se recomienda el prefabricado para poder extender a continuación el relleno y la capa asfáltica superior, ahorrándose así mucho tiempo de ejecución.

En definitiva, la utilización de este método implicaría las siguientes fases:

- 1) El corte de una zanja longitudinal (de en torno a 1,00x0,35m) a lo largo del tramo de carretera donde irán instalados los sistemas DWPT. Seguido del corte de zanjas transversales menores por donde irían los cables que conectan las bobinas primarias con las subestaciones eléctricas en los márgenes de las carreteras.
- 2) La construcción del molde de hormigón dentro de la zanja (incluyendo la membrana u otro sistema para evitar fisuras en la superficie de contacto hormigón-pavimento). Dicho molde puede ser fabricado in-situ o prefabricado recomendando la primera opción por la rapidez de ejecución.
- 3) La instalación y comprobación de los sistemas DWPT.
- 4) El cerrado estanco del molde de hormigón con una tapa de hormigón también.
- 5) La aplicación de una cobertura de 5-10 cm que de homogeneidad al acabado y reduzca las fisuras. El *Feasibility Study* menciona el uso de material bituminoso para ello, sin embargo, queda por ver la posibilidad de usar otro material de acuerdo a la normativa 6.1-IC: *Secciones de Firme*.



4.2.2. Método de construcción de carriles completos

Esta opción implicaría eliminar las capas del carril al completo para, a continuación, reconstruirla in situ. Esta solución supone un punto intermedio entre el anterior método por zanjas y el método prefabricado que veremos más adelante.

En este caso, las unidades DWPT y las tuberías de conexión asociadas se colocarían en unidades prefabricadas (similares a los moldes de hormigón antes descritos) y el pavimento se construiría alrededor de ellas. El uso de moldes prefabricados podría evitar la necesidad de dos vertidos de hormigón, y así acelerar la puesta en obra. La construcción de un carril completo permitiría colocar juntas de unión longitudinales (a lo largo de todo el carril con sistemas DWPT instalados) y transversales (distanciados una distancia dada como, por ejemplo, la distancia entre dos segmentos consecutivos. Ver apartado 3.2). La inclusión de juntas individualizaría los segmentos, lo que facilitaría y abarataría el mantenimiento y la sustitución en caso de rotura; si bien también supondría una conducción más molesta al pasar constantemente por las juntas. Además, este método resulta más caro que el método de zanjas debido a la mayor obra necesaria.

Como en el anterior sistema, no se hacen necesarias herramientas especiales para este método de construcción, principalmente fresadoras y maquinaria común para la construcción de firmes, si bien la puesta en obra es más compleja. En definitiva, la utilización de este método implicaría las siguientes fases:

- 1) Eliminación de las capas de pavimento del carril derecho (con sistemas DWPT). Dependiendo de la profundidad requerida y de las características de la carretera, es posible que también se elimine parte de la base.
- 2) Preparación de la base o la capa sobre la que se coloque, a continuación, el molde prefabricado con los sistemas DWPT (junto con los cables que comunican con las subestaciones eléctricas de los márgenes). Esto incluye la colocación de membranas elastoméricas u otra solución que evite fracturas en el contacto entre el molde y la carretera.
- 3) Ejecución de las sucesiones capas de pavimentos juntos con los riegos que correspondan. La extensión y compactación deberá realizarse teniendo en



cuenta que el molde se encuentra en la mitad del carril, por lo que no se podrá realizar con apisonadoras ni rodillos que ocupen todo el carril.

- 4) Una vez extendidas las diferentes capas hasta llegar a la altura del molde. Extender la capa superior de rodadura para proporcionar homogeneidad y un mejor acabado (de forma similar que el anterior método).

Otra posible desventaja de este método radica en que se debería aplicar una política de inspección y mantenimiento de rutina por el alto número de uniones longitudinales y transversales. Lo que sumado a las otras desventajas no hacen a este método tan económicamente interesante como los otros dos, salvo en obras concretas de nueva construcción.

4.2.3. Método de construcción de carriles completos prefabricados

Una alternativa a la reconstrucción de carril completo descrita anteriormente sería sustraer igualmente todas las capas del carril derecho, pero en lugar de reconstruirlo buscaríamos reemplazarlo por una sección prefabricada, cuyo ancho sea el del carril entero, con todos los componentes en su interior. Optativamente se puede aplicar una superficie asfáltica en la parte superior de la pieza prefabricada (como en los anteriores métodos), si bien no resulta necesario ya que con estas piezas prefabricadas se puede alcanzar acabados con mayores prestaciones. La explicación completa de este método se escapa del alcance de este proyecto, por lo que a continuación se destacarán los aspectos más importantes⁴⁹:

Las desventajas de este sistema son el coste (siendo previsiblemente el método más caro) y la necesidad de transportar las piezas prefabricadas desde las fábricas. Por su parte, las ventajas de este sistema son la facilidad y relativa rapidez de montaje y la mayor calidad final de la carretera. De hecho, existen algunas experiencias en el montaje de carreteras con elementos prefabricados que están dando resultados muy satisfactorios, como el proyecto ModieSlab (*Figura 23.a*) desarrollado por el operador de las carreteras holandesas (Rijkswaterstaat). Este sistema utiliza piezas prefabricadas de tamaños variables (la menor es de 2x2 m y la mayor de 9x4 m) totalmente ajustables entre sí y con formas variables para adaptarse a las curvas y badenes. Además, gracias

⁴⁹ (U. S. Department of Transportation, 2014) y *Feasibility study*, pg. 80-81 (Highways England, 2015)



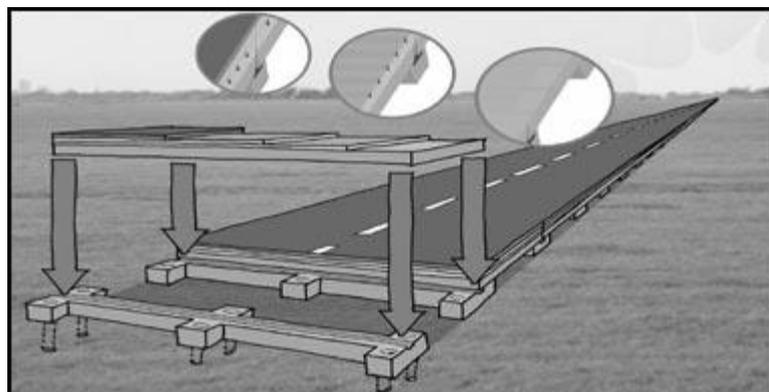
a la calidad de las piezas, se le pueden dar acabados especiales como la capa reductora de ruido que se muestra en la *Figura 23.b*. Si bien no se ha probado con sistemas DWPT en su interior, este sistema de piezas prefabricadas es susceptible de adaptarse para este fin.



a. Montaje del proyecto Modieslab
(Fuente: Feasibility study (2015:80))



b. Sección de las piezas prefabricadas Modieslab
(Fuente: Feasibility study (2015:81))



c. Croquis de la colocación de las piezas prefabricadas Modieslab
(Fuente: Federal Highway Administration (U. S. Department of Transportation))

Figura 23. Sistema Modieslab



Como se comentó, esta modalidad es posiblemente la más cara, además requiere de estudios de previsión más complejos para poder abastecer la obra con las piezas prefabricadas desde las fábricas de producción. Sin embargo, resulta ser la modalidad recomendada por el *Feasibility Study* por la rapidez en la sustitución de las piezas (como veremos a continuación), por la calidad del producto final (proporciona acabados especiales como reducción de sonido, facilidad para la evacuación de aguas, etc.) y, finalmente, proporciona mucha más vida útil (al aportar una calidad de fábrica en el aislamiento y estanqueidad de los sistemas DWPT).

Las ventajas no solo se dan durante la fase de construcción, ya que la modulación de las diferentes secciones prefabricadas permite la sustitución de una pieza defectuosa en tiempo récord y sin apenas necesidad de obra. Lo que sumado a la mayor vida útil permite reducir considerablemente los costes de mantenimiento.

El sistema ModieSlab no es el único que plantea la construcción de carreteras mediante elementos prefabricados, pero si uno de los más susceptibles de utilizar con sistemas DWPT en su interior. Esta solución nació en 2001, entre otras, a partir del programa “Roads to the Future” patrocinado por el Ministerio de Transportes de Países Bajos. Si bien este sistema incluye grandes novedades, lo realmente interesante es su forma de trabajar: las piezas prefabricadas responden a esfuerzos de flexión, comportándose de forma parecida a los vanos isostáticos de un puente. Estas piezas pueden estar apoyadas sobre zapatas aisladas, de forma que transmiten las acciones por las esquinas (*Figura 23. a*); o sobre zapatas combinadas (zapatas aisladas unidas mediante vigas, de forma que actúen como una sola), de forma que transmiten las acciones desde dos laterales (*Figura 23. c*). Las zapatas sobre las que asientan pueden ser cimentaciones superficiales o encepados de pilotes, según la calidad de los estratos.

Según la *Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera*, en la página 121 de su publicación “*Innovaciones en pavimentos de hormigón (NÚM. 166 - JULIO/AGOSTO 2009)*”:

La estructura [del ModieSlab] consta de losas prefabricadas de hormigón que abarcan la anchura total [del carril]. Las losas están conectadas a unas vigas prefabricadas de hormigón armado con anclajes de pretensado y planos de deslizamiento; no hay pasadores. Se han realizado avances para colocar las losas directamente sobre un pavimento ya existente sin necesidad de utilizar pilotes ni vigas.



Un ModieSlab típico consiste en una losa de hormigón armado de unos 320 mm cubierta con una capa de rodadura de hormigón poroso de dos capas. Los 15 mm superiores de este hormigón poroso es de grano fino, mientras que los 35-55 mm inferiores son de árido grueso. Las losas tienen un sistema de drenaje con sumideros para desaguar el agua de lluvia que penetra a través de la capa de rodadura del hormigón poroso. El sistema ModieSlab contiene un sistema de tuberías para regular la temperatura de las losas, lo que permite controlar la dilatación, la nieve y el hielo.

Por todo lo comentado, la construcción de esta solución es la que requiere una mayor complejidad y cantidad de estudios (sobre todo frente a las posibles afecciones a la carretera existente, obras colindantes, drenajes transversales, etc.). Mención aparte es la aplicación de este sistema en obras de paso superiores: la aplicación de este sistema se ha reducido a tramos de prueba muy concretos, por lo que ni el *Feasibility Study* ni la bibliografía consultada proporcionaban información sobre la utilización de este método en puentes. La construcción de este método requiere de maquinaria especializada en eliminar capas de carretera, maquinaria propia de cimentaciones (superficiales o profundas según el caso) y camiones que transporten las piezas prefabricadas de las fábricas al lugar final. Por lo general, la utilización de este método implicaría las siguientes fases:

- 1) Eliminación de las capas de pavimento del carril derecho (con sistemas DWPT). Dependiendo del grosor de las piezas prefabricadas, es posible que también se elimine parte de la base.
- 2) Puesta de las cimentaciones según el caso. Una solución óptima es la del uso de pilotes hincados con cabezas de geometría diseñada especialmente para la colocación de las piezas prefabricadas. Esta solución se puede realizar con maquinaria de hinca común o diseñar una maquinaria específica con mayores rendimientos. El uso de una u otra solución dependerá de estudios más completos que se escapan del alcance de este proyecto, así como de la disponibilidad de los datos de las experiencias piloto (a los cuales no he tenido acceso).
- 3) Una vez terminadas las zapatas/encepados, se colocan sobre ellas las piezas prefabricadas especialmente adaptadas a la geometría de la carretera.



4.2.4. Programa de mantenimiento

Para el operador de la carretera, el programa de mantenimiento depende principalmente de la metodología de construcción empleada. El sistema DWPT, por su parte, se diseñó para que no requiera mantenimiento durante su vida útil.

El primer sistema basado en zanjas destaca por los peligros que una mala puesta en obra puede acarrear en la zona de contacto hormigón-asfalto. Por ello se contemplaron algunas soluciones para evitar o, al menos, reducir el problema sustancialmente. De igual manera, se recomendó en las tres opciones la puesta en obra de una capa superficial de asfalto de unos 10 cm de grosor. En ese caso la vida útil y el programa de mantenimiento irá principalmente ligado a esa capa de asfalto.

Para asegurarse de que las uniones funcionen y no causen problemas con la capacidad de servicio del pavimento, se debe implementar un programa de inspección y mantenimiento de rutina. Esto podría implicar el uso de estudios para monitorear el desarrollo de cualquier grieta y cualquier cambio en la calidad del pavimento. Es preferible un programa de mantenimiento que evite el uso de personal en las calzadas con mucho tráfico, sin embargo, en algún momento puede ser necesario realizar inspecciones visuales con equipos andando por los puntos importantes (como las subestaciones eléctricas). De hecho, lo más probable es que la inspección de los equipos eléctricos se realice de forma periódica, con lo que se podría aprovechar y realizar la evaluación visual de la calzada al mismo tiempo. Debido a la novedad de este sistema y a la falta de experiencia en su mantenimiento, se recomienda realizar inspecciones mensuales o bimensuales durante los dos primeros años tras la instalación. O, al menos, hasta que se haya acumulado la experiencia suficiente en la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas de pavimento como para presentar un programa de mantenimiento alternativo.

En caso de que se aplique la capa superior de asfalto (la cual se espera que tenga un periodo de 8-10 años de vida útil), se presentará un programa de mantenimiento que incluirá el fresado y reemplazo de la capa superficial (~ 35-50 mm), la cual se puede hacer de noche cuando los volúmenes de tráfico son mucho más bajos.

En caso de no contar con la capa superior de asfalto, se tendrán que planear los correspondientes planes de mantenimiento atendiendo a la naturaleza de la calzada. Si



bien se hará hincapié en las inspecciones visuales para garantizar que no haya juntas defectuosas y que la superficie esté en buenas condiciones y sea resistente.

4.2.5. Puesta en obra de algunas experiencias piloto

Como ejemplo a los métodos expuestos previamente podemos mostrar la puesta en obra de algunas experiencias comerciales destacables de esta tecnología:

El sistema Qualcomm Halo, desarrollado conjuntamente con Renault, elaboró una pista de prácticas cerca de París de aproximadamente 100 metros para poder testear su tecnología DWPT. Tal como podemos ver en la *Figura 24*, se utilizó el método de construcción de un carril completo con el molde donde se encuentran los sistemas en el centro de la carretera. En su caso, dado que es una pista de prácticas, en lugar de asfaltar la capa superior se colocaron tapas sobre los sistemas para poder abrirlos nuevamente en caso de tener que corregir algún problema.



Figura 24. Puesta en obra del sistema Qualcomm Halo
(Fuente: Hexus.net)

Dejo a continuación el enlace de un video, subido a la página web de Qualcomm, elaborado por esta casa comercial que explica (en inglés) brevemente esta tecnología, su puesta en obra y sus potenciales usos:

<https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/18/wireless-dynamic-ev-charging-evolution-qualcomm-halo>



Otro sistema destacado es el Primove Bombardier, el cual tiene diversos proyectos con tecnología WPT como la ruta de autobús que cubre el recorrido de Berlín hasta su aeropuerto. Si bien no es un sistema de carga dinámico, existe la opción de adaptarlo como tal. Pero lo realmente interesante es la puesta en obra utilizando una placa prefabricada con todos los componentes en su interior. Solo hizo falta preparar la base y subbase sobre la que asienta y las capas de alrededor, tal como se aprecia en la *Figura 25*.



Figura 25. Puesta en obra del sistema Primove Bombardier
(Fuente: YouTube)

Igualmente dejo el enlace de un video donde se aprecia toda la puesta de montaje en cámara rápida. Este vídeo ha sido elaborado por la casa comercial y subido a YouTube:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZKdHICBFT08>

Pero quizás la experiencia piloto más destacable sea la del autobús OLEV desarrollado por el Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología (KAIST por sus siglas en inglés). Esta fue la primera gran experiencia que se desarrolló exitosamente con tecnología DWPT en el año 2013. Consiste en un autobús que funciona con la carga que le suministran las bobinas instaladas bajo el suelo a lo largo de su recorrido de 24 kilómetros (ida y vuelta) entre Seúl y el campus del KAIST⁵⁰.

⁵⁰ (Noticias de la ciencia, 2013)



Su puesta en obra se realizó con el método de las zanjas, cortando directamente sobre la carretera ya construida, y construyendo el molde de hormigón in-situ; tal como se aprecia en la *Figura 26*.



Figura 26. Puesta en obra del sistema OLEV desarrollado por el KAIST
(Fuente: Popucity)

Al igual que en el resto de los casos, adjunto un enlace con una explicación más detallada (en inglés) sobre su funcionamiento. El video esta subido a YouTube:

<https://www.youtube.com/watch?v=8Z9FW9ijP3Y>

Por último, en nuestro país existe una experiencia piloto con esta tecnología, si bien a una menor escala: el “proyecto VICTORIA” en la ciudad de Málaga⁵¹. Este proyecto, presentado en septiembre de 2013, buscaba la utilización y aprovechamiento de tecnología de recarga inductiva en el transporte público. Para ello se planteó el uso de autobuses eléctricos en la Línea 16 de la ciudad que se recargaban mediante tres sistemas:

- Recarga mediante cableado en las cocheras durante la noche.
- Recarga mediante inducción estática gracias a placas situadas en la base de las estaciones a lo largo del recorrido.
- Recarga mediante inducción dinámica en un tramo de 150 metros al final del recorrido.

⁵¹ (LaOpinióndeMálaga, 2017)



Aunque si bien esta experiencia puede aportar datos interesantes de cara a futuras inversiones en esta tecnología en nuestro país, conviene destacar las diferencias del proyecto VICTORIA⁵² con respecto a los sistemas DWPT planteados en este proyecto:

- Las bobinas en el suelo están dimensionadas para las condiciones de tráfico y especificaciones de los autobuses, no para un tráfico general que incluya tanto VL como VP. Por lo que los valores de potencia, energía, intensidad eléctrica, etc. son diferentes.
- Para el proyecto VICTORIA se instalaron sistemas de conducción autónoma que guiaran los autobuses durante el tramo de 150 metros a fin de evitar pérdidas durante la inducción circulando justo por encima de las bobinas. En los sistemas DWPT planteados en este proyecto no se contemplan estos sistemas de guiado autónomo.
- El sistema de comunicación vehículo-carretera en el proyecto VICTORIA requiere que el autobús realice una parada antes y después de usar el sistema de recarga dinámico, además se ha de recorrer a una velocidad de 10 km/h. Este planteamiento es del todo incompatible con las condiciones de tráfico en las carreteras.
- Todas estas diferencias hacen que el sistema empleado en el proyecto VICTORIA sea más “sencillo” que el propuesto en este proyecto. Esta mayor sencillez se hace patente en el método constructivo empleado por este proyecto (que veremos más adelante), el cual mantiene muchas diferencias con respecto a los métodos antes planteados.

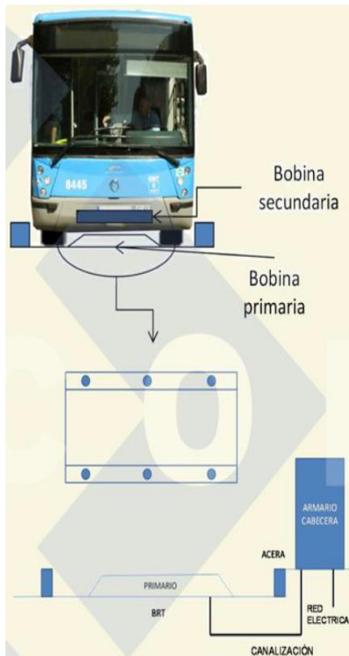
El planteamiento del método constructivo se centró en la transmisión efectiva de la potencia inductiva. Para ello se propuso la instalación de bobinas conectadas cada cierta distancia que aportaban energía al autobús cuando este pasaba por encima de ellas a baja velocidad.

Sin embargo, a fin de disminuir los costos de instalación, la construcción de las bobinas principales se realizó en placas sobre el suelo (en lugar de dentro), conectadas a la red principal mediante pequeñas canalizaciones (ver *Figura 27.a*). Estas placas, si bien son resistentes y no conllevan riesgos para las personas, solo resultan viables en

⁵² (Mascarell, 2014)



este caso que existen sistemas de guiado. Sin estos sistemas, el pisado continuado de vehículos (incluyendo VP) podría dañar las placas significativamente, además de que supondrían un peligro para las grandes velocidades de las autovías y autopistas. Es por ello que esta solución no se ha planteado previamente para los sistemas DWPT mencionados en este proyecto.



a. Croquis gráfico
(Fuente: Mascarell, 2014)



b. Imagen del tramo de 150 metros de prueba (C/ Imperio Argentina)
(Fuente: GoogleMaps)

Figura 27. Proyecto VICTORIA (Málaga)

Si bien el proyecto VICTORIA guarda diferencias con respecto a lo perseguido en este trabajo, si resulta un claro ejemplo del alcance y aplicaciones de esta tecnología para un escenario muy concreto, con el aliciente de encontrarse en nuestro país. El seguimiento de esta experiencia podrá arrojar datos utilizables para proyectos futuros más ambiciosos como el aquí planteado, teniendo siempre en cuenta las diferencias antes comentadas. Datos como la aceptación de estas tecnologías por parte de los usuarios, los ahorros reales en combustible y dinero que aporta o el impacto en el tráfico urbano que supone adaptar el carril derecho; por citar algunos.

Este es el primer proyecto con tecnología DWPT llevado a cabo en nuestro país. El proyecto fue financiado principalmente por la Unión Europea y liderado por Endesa, a continuación se muestra el enlace de un vídeo explicativo elaborado por Endesa y subido a YouTube:



<https://www.youtube.com/watch?v=IX8fK86Ulu4>

También se incluye el enlace a una presentación (en inglés) impartida por Eduardo Mascarell, responsable del proyecto (Endesa), donde destaca los aspectos más importantes del proyecto VICTORIA:

<https://www.youtube.com/watch?v=9vcTFf5Jh1w>

4.3. Valoración económica

En la práctica, la viabilidad de todo proyecto se determina por el coste de este. Por ello este apartado es quizás el más importante y, a la vez, el más complicado de determinar de forma exacta.

Ya se ha mencionado varias veces la novedad de un sistema así, por lo que las primeras valoraciones no pueden sino ser estimaciones basadas en estudios dedicados a diferentes temas sin relación entre sí. En este aspecto el *Feasibility study* elaboró un capítulo entero recopilando información muy detallada, por lo que se ha utilizado como base de la que se han extraído los datos que nos interesan y que se ha ido completando con información actualizada. Sin embargo, antes de comenzar, es fundamental tener presente lo siguiente:

- Mencionar todos los costes y beneficios implicaría un estudio que se escapa del alcance del presente proyecto. Por lo que este apartado se limita a destacar solo aquellos más determinantes.
- Los costos y beneficios aquí mostrados son un compendio de la información disponible en experiencias y estudios previos en todo el mundo, por lo que no reflejan las peculiaridades de nuestro país.
- Muchos de los costos dependen del convenio o contrato con las empresas intervinientes, desde las eléctricas hasta las constructoras. Por lo que, en un posible escenario de construcción, estos contratos serán determinantes.
- Los costos de experiencias piloto, como es lógico, son especialmente elevados. En el caso de grandes construcciones donde se pueda normalizar



la fabricación de los diferentes componentes, o de que mejore la tecnología con el paso del tiempo; estos costos se reducirían sustancialmente.

- Algunas de las estimaciones extraídas de trabajos como el *Feasibility study* parten de estimaciones futuras que pueden variar. Esto es especialmente importante en los beneficios, los cuales dependen del número de personas que usen esta tecnología en el futuro.

Como resumen, podemos decir que este apartado sirve como estimación grosera en cuanto a costes y beneficios, por lo que serán necesarios más estudios en el futuro.

En cuanto a la estructura del apartado, el *Feasibility study* planteó la separación de los impactos según si afectan a aspectos económicos (relativo a las empresas), medioambientales, sociales (relativo a los usuarios privados) o relacionados con las cuentas públicas (tal y como dictamina la normativa inglesa para la elaboración de proyectos de tráfico). En este proyecto se ha optado por mantener esa separación entre potenciales impactos, pero clasificándolos a su vez según sean costes directos, costes indirectos, beneficios directos o beneficios indirectos. Con “directos” nos referimos a aquellos impactos generados por la mera construcción y puesta en uso de los sistemas DWPT, mientras que “indirectos” son aquellos impactos que provocará, en mayor o menor medida, su uso con el paso del tiempo. Otro detalle importante es que se ha procurado cuantificar todos estos impactos en un valor monetario, si bien en algunos casos no ha sido posible. Finalmente, se dejará el análisis de resultados para el *Capítulo 5* y las conclusiones para el *Capítulo 6*.

4.3.1. Costes directos

Factores medioambientales

Los costos medioambientales directos vienen principalmente por parte del paisajismo. Ya en las carreteras actuales existe la necesidad de elaborar estudios de impacto paisajístico en aquellas zonas naturales protegidas (LIC, ZEC, etc.) o de especial interés paisajístico (centros históricos, carreteras cerca de miradores, etc.). La instalación de los sistemas DWPT requeriría la construcción de sistemas e infraestructuras en los márgenes de las carreteras (tales como zanjas o subestaciones eléctricas), lo que perjudicaría aún más el impacto paisajístico tanto en zonas rurales como urbanas. Este costo no se puede cuantificar.



Factores sociales

Existen dos costos directos principales que afectan a los usuarios:

El primero consiste en el aumento del coste de adquisición debido al mayor precio de los vehículos EV en comparación con los vehículos convencionales, y a la necesidad de instalar los sistemas DWPT en dichos vehículos, lo que encarecería aún más el coste inicial. Para el primer detalle podemos comparar diferentes modelos EV con sus vehículos convencionales equivalentes, tal como se muestra en la *Tabla 2*. En ella podemos ver el incremento del precio de adquisición que, si bien puede ser muy distinto según el modelo, ronda el 90% para vehículos de menos de 15.000€ y el 40-60% para vehículos de más de 15.000€. Estos porcentajes se reducen a la mitad en el caso de adquirirlos con ayudas.

Sin embargo, la estimación del sobrecoste por la instalación de los sistemas DWPT en los vehículos no resulta posible por falta de información.

El segundo costo directo es el que los usuarios han de pagar por el uso de los sistemas DWPT. Como se mencionó en el *Apartado 3.5.*, para poder utilizar estos sistemas los usuarios han de registrarse y crear cuentas desde las que poder abonar la energía que consuman. Esta energía estaría a coste industrial (como la energía suministrada a las vías férreas) y regulado por la administración para evitar fuertes fluctuaciones en el precio. Si bien el *Feasibility study (2015:108-111)* planteó el pago por tarifas que dependían del uso privado o comercial del vehículo EV, de la franja horaria, de la longitud del trayecto, etc.; se entiende que un sistema de pagos tan complejo se escapa del alcance de este trabajo, por lo que nos limitaremos a contabilizar el pago según el precio de la electricidad a coste industrial a 30 de noviembre de 2017 en España: **0,084 €/kWh con IVA⁵³**.

53 (MINETAD, 2017)



Tabla 2. Comparación de vehículos EV con sus equivalentes convencionales (Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de www.xataka.com)

Vehículos eléctricos	Precio (de tarifa) [€]	Precio (con ayudas) [€]	Vehículos convencionales equivalentes	Precio [€]	Incremento del precio de tarifa	Incremento del precio con ayudas
Peugeot iOn Pequeño utilitario	23.190,00	17.690,00	Peugeot 108 68cv	12.080,00	91,97%	46,44%
KIA Soul EV Crossover pequeño	24.126,00	18.626,00	Kia Soul 132CV	12.900,00	87,02%	44,39%
Volkswagen e-up! Pequeño utilitario	27.530,00	22.030,00	Volkswagen e-up 75CV	14.110,00	95,11%	56,13%
Renault ZOE** Utilitario	21.625,00	16.125,00	Renault Clio 90CV	15.450,00	39,97%	4,37%
Nissan LEAF Berlina compacta	29.170,00	23.670,00	Nissan Pulsar 115CV	18.700,00	55,99%	26,58%
Volkswagen e-Golf Berlina compacta	36.530,00	31.030,00	Volkswagen Golf 110CV	22.690,00	61,00%	36,76%
Nissan e-NV200 Evalia Furgoneta mediana	37.188,00	31.688,00	Nissan Evalia 110CV	24.552,00	51,47%	29,06%
Media:	28.479,86	22.979,86		17.211,71	68,93%	34,82%

Factores relativos a las cuentas públicas

Estos costes incluyen la compra, instalación/construcción, mantenimiento y explotación (es decir, proveer de electricidad) de los sistemas DWPT en las carreteras españolas durante su periodo de vida útil. Según el apartado 9.1.4.1. del Feasibility Study (2015:185-186):

Los principales artículos de costo de capital son:

- *Compra del equipo DWPT (convertidores de potencia, equipos de control y sistemas de comunicación, bobinas de inducción, ...).*
- *Instalación del equipo en la carretera.*
- *Proporcionar una conexión adecuada a la red de suministro de electricidad.*
- *Mantenimiento.*
- *Costos de administración y administración para cualquier sistema de registro y pago de usuarios.*
- *Cargos de electricidad abonados al proveedor.*



Actualmente, hay muy poca información disponible sobre la cual basar estimaciones sólidas de los costos de infraestructura. La información ha sido proporcionada por un fabricante, lo que sugiere que se puede lograr un costo para el equipo de aproximadamente £ 0.6M por km. Por otra parte, sobre la base de la experiencia en otros esquemas de carreteras, TRL⁵⁴ ha realizado una estimación de £ 1M por km para instalar el equipo en la carretera (asumiendo el método de instalación más barato). Se espera que sea posible combinar la instalación de las bobinas DWPT con el reasfaltado que se realiza en tareas de mantenimiento en las carreteras, aprovechando así la obra en curso y el cierre de carriles y evitando costos adicionales para la administración. Esto lleva a un costo estimado para comprar e instalar el equipo DWPT de £ 1.6M por km (para un carril).

El costo de proporcionar una conexión a la red de suministro dependerá de la distancia entre la sección de la carretera que se está electrificando y un punto de conexión adecuado, así como de la demanda de potencia máxima. Hay dos enfoques diferentes que podrían considerarse de cara a la electrificación: el primero consiste en proporcionar una conexión separada a la red por cada km de carretera, el segundo consiste en proporcionar una única conexión de muy alta potencia en un número pequeño de ubicaciones con una red de suministro local junto a la carretera (análoga a cómo están conectados los sistemas de electrificación ferroviarios). A efectos de este informe se ha considerado el primer caso, con una estimación de £ 455k por km, según el Operador de la Red de Distribución (DNO por sus siglas en inglés).

Dadas las incertidumbres significativas en las estimaciones anteriores, y el hecho de que aún no hay experiencia británica de instalación de DWPT a gran escala, se ha agregado un "sesgo de optimismo" del 60% a estos costos en el análisis descrito más adelante en este informe.

54 Los niveles de preparación tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) son un método para estimar la madurez de alguna incipiente tecnológica durante su proceso de adquisición. Se determinan mediante una evaluación de preparación tecnológica que examina los conceptos del programa, los requisitos tecnológicos y las capacidades tecnológicas demostradas (**Wikipedia, 2017**).



En ausencia de evidencia empírica del costo de mantenimiento, se aplicó una cifra del 1% de los costos iniciales por año durante el período de vida útil.

También habría costos de "administración interna" para la administración del usuario. No se disponía de información sobre cuáles podrían ser, por lo que el modelo usó la suposición de que los costos de administración serían del 5% del costo de la electricidad, proporcionando así algún vínculo con la cantidad de usuarios. Es difícil identificar sistemas comparables existentes, sin embargo, el gobierno holandés especificó un costo de administración del 5% en las especificaciones que emitió para los esquemas de precios de carreteras (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006).

Por último, existe la posibilidad de añadir servicios de cobertura 4G, 5G o Wi-Fi a los usuarios que utilizan la carretera. Sin embargo depende de los acuerdos a los que la propia administración llegue con las compañías de telecomunicaciones. Por lo que su estudio, de nuevo, se sale del alcance de este proyecto.

4.3.2. Costes indirectos

Factores relativos a las cuentas públicas

Los únicos costos indirectos contemplados en este proyecto son los impuestos que el Estado deja de percibir en conceptos de “impuestos sobre el carburante” y de “IVA sobre el carburante” debido a la gradual sustitución del parque móvil de vehículos convencionales por vehículos EV. Estos costos se estiman a partir de la cantidad de carburante ahorrado a lo largo de los 20 años de vida útil de los sistemas DWPT.

En el *Apartado 3.4.* mencionamos la existencia de dos escenarios de penetración para la tecnología DWPT, sin embargo, para poder cuantificar esta pérdida en impuestos se hace necesario plantear una evolución en los porcentajes de penetración de los vehículos ligeros (VL) y pesados (VP) a lo largo de los años. El *Feasibility study (2015:106)* planteó una situación en el año 0 con un 10% de penetración de los VL y un 5% para los VP debido a que los vehículos EV ya están disponibles en el mercado, por lo que la adopción de sistemas DWPT para estos vehículos resulta más sencilla.



Luego aplicó un incremento lineal del 5% de penetración anual en ambos tipos de vehículos. Para llegar a un máximo de un 30% en la penetración de los VL (año 4) y un 75% en la penetración de los VP (año 14). Esto se debe a que el estudio se centraba en un solo carril de DWPT, lo que impone limitaciones de capacidad en el número de usuarios, reduciendo así la tasa de penetración hasta dejarla alrededor del 30%.

El impuesto sobre el carburante es el conocido como Impuesto Especial sobre carburantes (IE), el cual se desglosa en tres impuestos⁵⁵:

- Tipo General: impuesto fijo por litro, aplicado sobre cada tipo de combustible. Ver *Tabla 3*.
- Tipo Especial: impuesto actualizado anualmente por litro, aplicado sobre cada tipo de combustible. Ver *Tabla 3*.
- Tramo autonómico del impuesto de Hidrocarburos: impuesto fijo por litro, depende de la CC.AA., estableciendo cada una la cuota que crean oportuna (algunas CC.AA. no lo aplican). Para esta estimación no lo tendremos en cuenta ya que cada CC.AA. tiene un valor diferente, lo que complicaría en exceso la estimación. Sin embargo, téngase en cuenta que el valor que nos dé será menor del real.

Tabla 3. Tipos impositivos estatales del impuesto de hidrocarburos (mayo 2017)
(Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de javiersevillano.es)

	Tipo General [€/1000L]	Tipo Especial [€/1000L]	Total [€/1000L]
Gasolina sin plomo (excepto gasolina 98)	400,69	24,00	424,69
Gasoil	78,71	24,00	102,71

⁵⁵ (Sevillano, 2017)



Otras suposiciones son:

- El IVA del carburante es del 21% sobre el precio del carburante al que ya se ha aplicado el IE⁵⁶.
- La cantidad de VL y VP aptos para circular que configuran nuestro parque móvil actual vienen reflejados en la *Tabla 4*. La cual se basa en los datos del “Parque de vehículos-Anuario 2016” publicado por la dirección General de Tráfico (DGT). Aplicaremos una tasa de crecimiento del parque móvil nacional del 0,533% anual. Este es el valor de la tasa de crecimiento del número de turismos en los últimos 6 años.

Tabla 4. Evolución del parque móvil estudiado en este proyecto
(Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos del Anuario-2016 publicado por la DGT)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Turismos	22.277.244	22.247.528	22.024.538	22.029.512	22.355.549	22.876.830
Furgonetas	2.314.595	2.287.818	2.244.116	2.230.376	2.260.371	2.305.271
Total VL	24.591.839	24.535.346	24.268.654	24.259.888	24.615.920	25.182.101
Camiones	2.746.196	2.696.904	2.643.236	2.609.108	2.591.147	2.574.209
Autobuses	62.358	61.127	59.892	59.799	60.252	61.838
Total VP	2.808.554	2.758.031	2.703.128	2.668.907	2.651.399	2.636.047

- La mitad de los motores convencionales de los VL son gasolina y la otra mitad diésel. Mientras que todos los motores convencionales VP utilizan diésel. Se aplicarán los valores de consumo, para una velocidad de 70 millas/h (112,7 km/h), estimados en el *Feasibility study (2015:188)* en su *Apartado 9.2.2.* (ver *Tabla 5*).

Tabla 5. Consumo de combustible por km recorrido
(Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos del Feasibility study (2015:43))

	VL (gasolina)	VL (diésel)	VL	VP
consumo [L/km]	0,068	0,052	0,060	0,356

La estimación del costo indirecto se realizó con ayuda de una hoja Excel en la que se calculó el ahorro del consumo de carburante en L/km (para VL y VP) y,

⁵⁶ (Sevillano, 2017)



posteriormente, la reducción en los impuestos con IVA, en €/km. Este proceso se repitió desde el 2018 hasta el 2038 (teniendo en cuenta el incremento anual del parque móvil) para, finalmente, sumarlo. Así, el **costo indirecto asciende a 4.319.338,35 €/km** que el estado deja de percibir en concepto de impuestos a los carburantes. A continuación se adjunta una gráfica donde podemos ver la evolución del parque móvil en el escenario planteado (*Figura 28*) y otra gráfica donde se muestra el ahorro obtenido en este escenario, tanto en combustible como en impuestos (*Figura 29*):

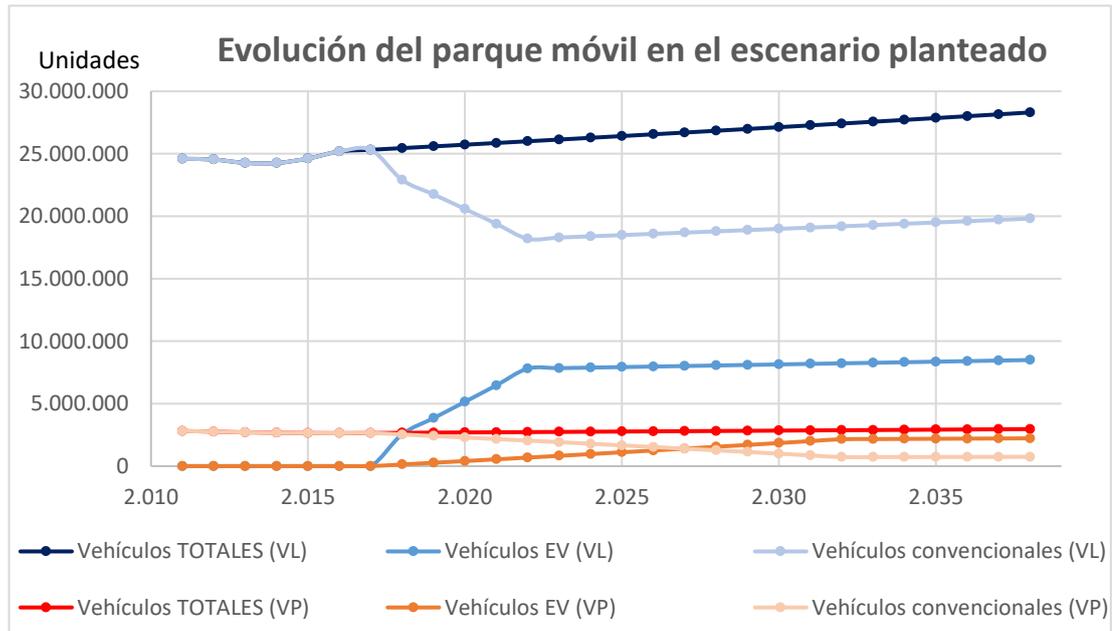


Figura 29. Evolución del parque móvil en el escenario planteado. (Fuente: Elaboración propia)

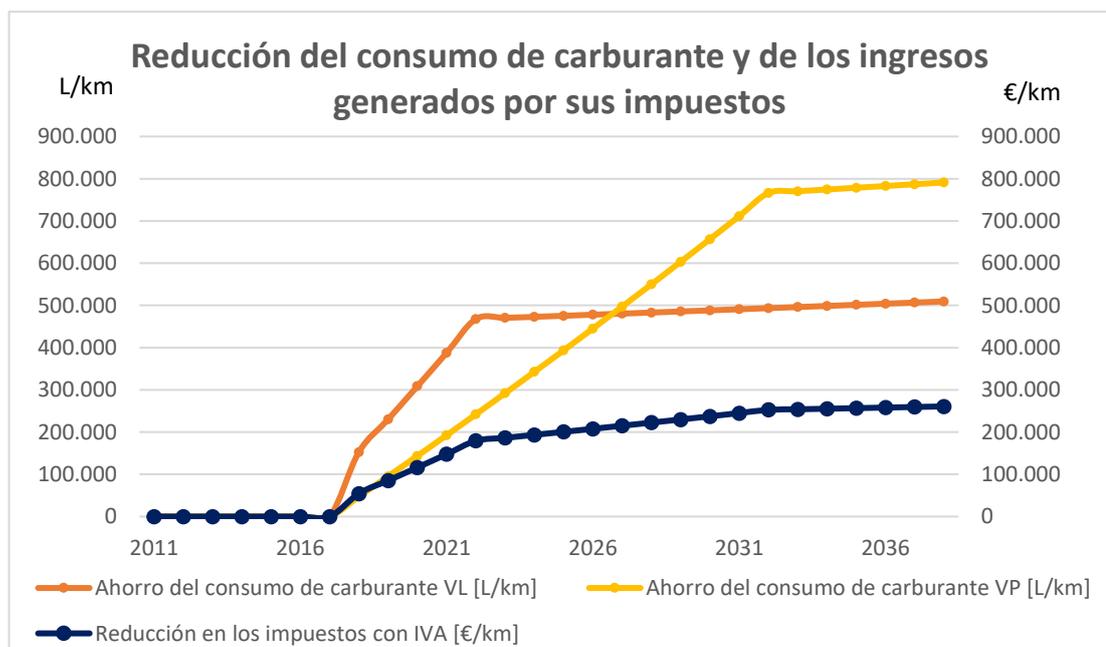


Figura 28. Reducción del consumo de carburante y de los ingresos generados con sus impuestos. (Fuente: Elaboración propia)



Con el fin de no complicar en exceso los cálculos ya que nuestra intención es tener estimaciones groseras, este apartado arrastra las siguientes limitaciones:

- No se ha contabilizado tramo autonómico del impuesto de Hidrocarburos.
- No se ha contabilizado el IVA sobre la electricidad que aportarían los sistemas DWPT a los usuarios (y que habría que descontar a los costos obtenidos), el cual está actualmente en el 21%.
- No se ha aplicado el Valor Actual Neto (VAN) a lo largo de los 20 años de vida útil, con lo que obtendríamos el valor real del costo indirecto teniendo en cuenta la inflación.

4.3.3. Beneficios directos

Factores económicos

El beneficio directo más evidente será el ahorro que los usuarios tendrán al utilizar estos sistemas. Si ponemos en perspectiva el consumo de electricidad y combustible que tendrían dos motores equivalentes yendo a la misma velocidad, y aplicáramos las tarifas de cada uno, podríamos tener una aproximación bastante acertada del ahorro real por kilómetro recorrido:

- Según el *Apartado 4.3.1.*, el costo de la electricidad sería de 0,084 €/kWh.
- El precio de la gasolina es de 1,255 €/L, y el del gasoil de 1,165 €/L⁵⁷.
- Se aplicará la media de consumo (por kilómetro recorrido) y el rendimiento del sistema DWPT estimados en el *Feasibility study (2015:188)*. Ver *Apartado 3.4.2.* y *Apartado 4.3.2.*

Tabla 6. Comparativa de los costos al usuario entre ambas tipologías de motores.
(Fuente: Elaboración propia a partir de los parámetros descritos arriba)

	Motores convencionales			Motores EV			
	Consumo (L/km)	Precio (€/L)	Costes (€/km)	Consumo (kWh/km)	Precio (€/kWh)	Costes brutos (€/km)	Costes con una eficiencia del 60% (€/km)
VL (gasolina)	0,068	1,255	0,0853	0,16	0,084	0,0134	0,0224
VL (diésel)	0,052	1,165	0,0606				
VP (diésel)	0,356	1,165	0,4147	1,91	0,084	0,1604	0,2674

⁵⁷ Valores actualizados a 14/diciembre/2017 (www.dieselogasolina.com, 2017)



La *Tabla 6* está referida para vehículos circulando a 70 millas/h (112,7 km/h). En ella podemos observar como los vehículos ligeros a gasolina ahorrarían casi cuatro veces más en combustible (ahorro del 73,75%), y los diésel ahorrarían casi tres veces más (ahorro del 63,02%). Por su parte, los vehículos pesados con motor diésel ahorrarían más de dos terceras partes (ahorro del 35,53%). Como anécdota ilustrativa, un viaje Cáceres-Madrid, ida y vuelta, costaría a un usuario privado en torno a los 13,44 €.

Existen dos limitaciones en esta estimación que se deben destacar, si bien ambas se contrarrestan hasta cierto punto:

- La progresiva mejora en la eficiencia de los motores convencionales, que se traduciría en un menor consumo.
- El reducido valor del rendimiento de los sistemas DWPT. Tal como se mencionó en el *Apartado 3.4.2.*, este valor representa un escenario pesimista, por lo que en la práctica las pérdidas serán probablemente menores.

Factores medioambientales

Otro beneficio interesante, si bien menos notable, es el aprovechamiento de las bobinas instaladas bajo la calzada para evitar heladas. Los sistemas DWPT tienen pérdidas que afectan al rendimiento final en la transmisión de energía eléctrica. Si bien no existe información para determinar qué porcentaje de estas pérdidas serían debidas a la bobina primaria instalada bajo la calzada, si se puede saber que estas hipotéticas pérdidas se manifestarían en forma de calor. Así, el uso de las bobinas incrementaría la temperatura de la calzada, siendo este incremento función de la tipología de la puesta en obra y de la cantidad de usuarios aprovechando el sistema DWPT.

Este hecho permitiría reducir en mayor o menor medida el uso de sal en las carreteras, lo que derivaría en un ahorro de sal y de mantenimiento de la carretera. Pero el principal beneficio sería medioambiental, al evitar la saturación de sal en las cercanías de la carretera.



4.3.4. Beneficios indirectos

Factores económicos

Al final del apartado 3.5.1. se mencionó la relación de dependencia entre la tecnología DWPT y la inclusión de los vehículos EV. Paralelamente, el *Feasibility study* planteó la instalación de los sistemas DWPT en autopistas de 3 carriles, si bien en el futuro se puede plantear la instalación de estos sistemas en las vías urbanas. Lo que tendría las implicaciones económicas destacadas previamente para los usuarios, junto con otro factor importante:

Existe una clara tendencia por parte de los ayuntamientos de las grandes ciudades, de elaborar gradualmente normativas cada vez más restrictivas sobre las emisiones contaminantes de vehículos (limitación de edad del vehículo, limitaciones en el acceso al centro, etc.). A la vez que se premia la adquisición de vehículos eléctricos e híbridos (cargadores gratuitos, estacionamiento gratuito en las zonas centrales, etc.). Si a esta tendencia le sumamos los beneficios, mencionados en el apartado anterior, que una red de sistemas DWPT tendría; la motivación para adquirir vehículos EV se incrementaría sustancialmente tanto por parte de los privados como de las empresas. Lo cual sería justificación suficiente para la instalación de estos sistemas DWPT.

Otro efecto positivo indirecto de la instalación de los sistemas DWPT son los puestos de trabajo que estos sistemas generarían, tanto en la instalación en las carreteras como en la industria. Según el *Feasibility study (2015:182)*:

Se espera que una gran inversión en la compra e instalación de equipos DWPT en una porción de la red de carreteras, creara un número significativo de empleos y estimulara una cadena de suministros manufacturada. Sin embargo, no está claro qué parte del equipo podría fabricarse en España y cuánto se tendría que importar.

A medida que la instalación de los sistemas necesarios en el vehículo empiece a producirse en masa y se integren en las líneas de producción, es probable que el impacto en la demanda de mano de obra no sea apreciable. Por otro lado, se esperaría que la instalación en las infraestructuras viales



requiera de más mano de obra, lo que se traduciría en nuevos empleos a lo largo del territorio nacional.

Este efecto, sin embargo, resulta difícilmente cuantizable al depender en exclusiva de la inversión que haga a este respecto la administración. Llegando a ser despreciable si solo se instalaran tramos de prueba.

Factores medioambientales

Como sabemos, la utilización de los sistemas DWPT permite proveer de energía a los vehículos EV. Estos vehículos no emiten residuos a la atmósfera (al menos no directamente como veremos más adelante), en contraposición a los motores ICE convencionales que sí lo hacen. Por ello, la principal ventaja medioambiental que tienen estos sistemas es fomentar el porcentaje del parque móvil que representan este tipo de vehículos, y así evitar la emisión de dos grupos de contaminantes:

- Gases de efecto invernadero, de entre los que destaca el CO₂.
- Gases tóxicos perjudiciales para el ser humano y que reducen notablemente la calidad del aire, de entre los que destacan los NO_x y las partículas en suspensión (PM por sus siglas en inglés).

Antes de comenzar conviene incidir en que la utilización de vehículos EV no tiene por qué significar la no emisión de estos gases a la atmósfera. Estos vehículos utilizan energía eléctrica para funcionar, la cual se genera en una central eléctrica que puede emitir estos mismos gases o no. Por lo que es posible que, en lugar de evitar residuos, los vehículos EV solo desplazan el foco donde se generan (si bien esto continuaría siendo un beneficio en las ciudades atmosféricamente contaminadas). A esto se le conoce como “Intensidad de Carbono”, es decir, a la cantidad de emisiones de CO₂ en una economía en su conjunto (si bien se puede aplicar el mismo concepto para los NO_x y PM). Resulta obvio, por tanto, que la producción de electricidad en plantas de carbón (con a su alta tasa de contaminación) mantendría la Intensidad de Carbono más o menos igual, lo que en la práctica no daría ningún beneficio medioambiental. En el otro extremo, las fuentes renovables como la hidroeléctrica, solar, eólica, etc., no emiten residuos a la atmósfera, reduciendo sustancialmente la Intensidad de Carbono.



Para este apartado solo se tendrá en cuenta el ahorro en emisiones que los vehículos EV aportarían en contraposición a los motores convencionales. Sin incidir en la procedencia de la energía eléctrica y, por tanto, sin tener en cuenta la variación final en la Intensidad de Carbono.

A partir de aquí, se han destacado estos dos grupos principales de contaminantes emitidos por los motores convencionales por ser los que se emiten en mayor cantidad y los que más afectan a la población. En la *Tabla 7*⁵⁸ se muestran los valores de gases contaminantes emitidos en los últimos 10 años de los que se tienen cifras definitivas:

Tabla 7. Valores de emisiones contaminantes
(Fuente: Elaboración propia)

		Emisiones de vehículos en España			Emisiones totales en España		
		CO2 (kt)	NOx (t)	PM** (t)	CO2 (kt)	NOx (t)	PM** (t)
2005	Diésel	68.785	443.711	55.563	407.820	2.274.537	472.790
	Gasolina	23.270	64.320	1.854			
2006	Diésel	72.682	440.238	52.542	400.757	2.248.417	469.085
	Gasolina	22.181	49.339	1.569			
2007	Diésel	76.288	442.342	50.859	409.643	2.251.002	471.213
	Gasolina	21.357	39.764	1.425			
2008	Diésel	72.818	404.149	45.153	378.755	2.075.336	435.067
	Gasolina	19.672	30.917	1.209			
2009	Diésel	67.951	366.822	40.566	338.288	1.924.613	427.816
	Gasolina	18.473	25.167	1.149			
2010	Diésel	66.125	349.780	37.953	324.001	1.823.130	411.675
	Gasolina	17.028	20.166	1.083			
2011	Diésel	62.941	328.656	32.709	326.566	1.830.229	409.413
	Gasolina	15.847	16.418	858			
2012	Diésel	57.436	297.948	27.912	320.876	1.784.818	399.006
	Gasolina	15.735	14.561	774			
2013	Diésel	60.268	*	*	289.556	1.563.126	370.909
	Gasolina	13.991	*	*			
2014	Diésel	61.324	*	*	293.598	1.597.578	375.504
	Gasolina	13.780	*	*			
2015	Diésel	63.861	*	*	310.286	1.600.422	368.649
	Gasolina	13.872	*	*			

* Sin datos

** PM2,5 + PM10

58 Fuentes de los datos:

- Sistema Español de Inventario de Emisiones.
- Inventario nacional de emisiones a la atmósfera 1990-2012, Capítulo 7: Transporte por carretera.
- Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990 - 2015 (Revisión 2017), y *Tablas* adjuntas.



Lo más destacable de estas cifras son las tendencias de ambos grupos de contaminantes. Las normativas EURO han ido exigiendo valores cada vez más restrictivos en cuanto a los NO_x y las PM, de ahí que estas emisiones hayan ido reduciéndose gradualmente con respecto a las emisiones totales (ver Figuras 32 y 33). Sin embargo, estas mismas normativas no incluían la emisión de CO₂, por lo que estas emisiones se han mantenido en torno a un mismo porcentaje del total, sin sufrir reducciones (ver Figura 31). Si bien la estimación de las emisiones ahorradas puede ser extremadamente complejo de determinar, a continuación aplicaremos diferentes criterios para tener unos valores groseros que nos den una idea bastante aproximada:

Gases de efecto invernadero (CO₂):

Los gases de efecto invernadero son los responsables directos de las variaciones climatológicas a lo largo de la historia de nuestro planeta, por ello son especialmente seguidos por la comunidad científica. La Figura 30 muestra la emisión actual indiscriminada de estos gases en partes por millón (ppm), sobra decir que esto supone un problema gravísimo de continuar esta tendencia. Otro rasgo de estos gases es su facilidad de dispersión, pudiendo llegar a la otra punta del planeta empujados por los vientos⁵⁹. Existen numerosos gases de efecto invernadero, si bien el CO₂ destaca de entre los demás por las cantidades emitidas (especialmente por parte de los vehículos).

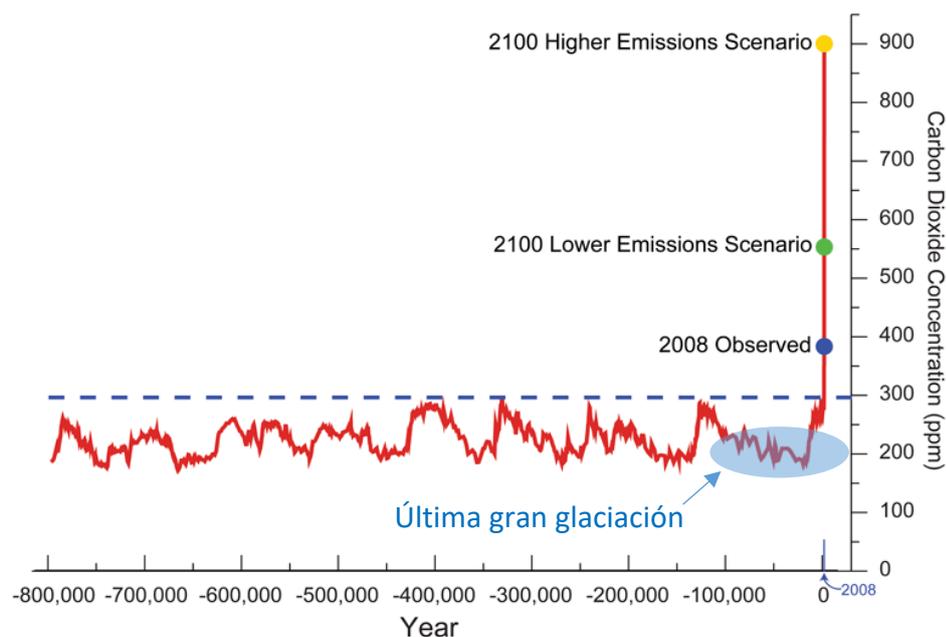


Figura 30. Concentraciones de CO₂ en los últimos 800.000 años.
(Fuente: NOAA, 2008)

⁵⁹ (wearewater.org, 2016)



Como destacamos previamente, los vehículos han emitido una cantidad muy regular de CO₂ con respecto a la emisión anual total de nuestro país, esto se puede apreciar claramente en la *Figura 31*. Además, contamos con las proyecciones de emisiones futuras en las “*Proyecciones de emisiones de gases a la atmósfera. Edición 2015-2050*”⁶⁰. Si bien estas proyecciones hacen referencia a la emisión de gases total, podemos extrapolar los resultados a la emisión de gases de los vehículos al ser estos proporcionales. Por lo que una manera sencilla de estimar los ahorros consiste en suponer que esta tendencia de emisiones de CO₂ de los vehículos continuará paralela a la emisión total durante la vida útil contemplada en el estudio. Para simplificar los cálculos se ha optado por ponerlos en valores relativos a la cantidad de CO₂ emitida en 2015. Si a esta tendencia le incluimos el % de penetración de vehículos EV que se estimó en el *Apartado 4.3.2.*, obtendríamos la cantidad de CO₂ que no se emitirá a la atmósfera por año. El sumatorio de todos los años nos daría el ahorro total.

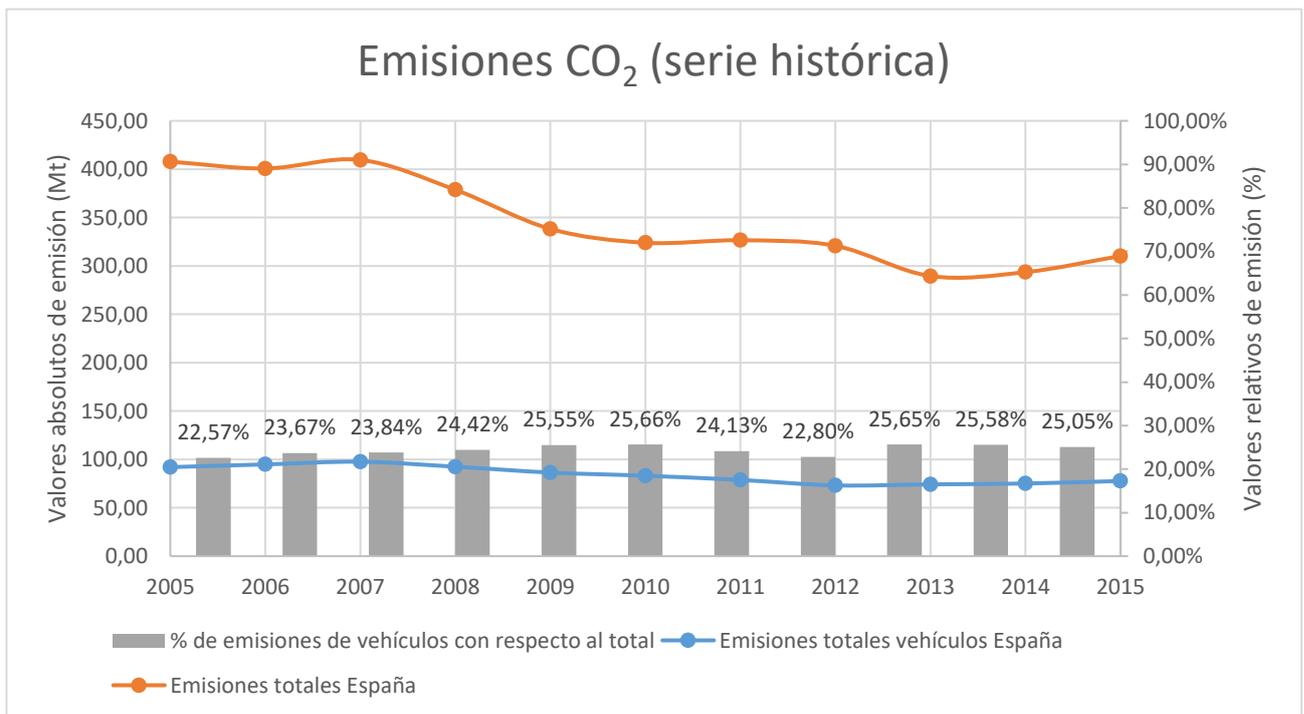


Figura 31. Registros de emisión de CO₂ en el periodo 2005- 2015.
(Fuente: Elaboración propia)

En la *Tabla 8* podemos ver estas operaciones mencionadas previamente. Dando una cantidad de **CO₂ ahorrada total de 573,003 millones de toneladas (Mt)** en el periodo 2016-2040.

⁶⁰ (MAPAMA, 2017)


 Tabla 8. Mt de CO₂ ahorrado cada año. La estimación está basada en las emisiones de 2015
 (Fuente: Elaboración propia)

	Proyecciones relativas sobre las emisiones de vehículos en España (con respecto a 2015)	% Penetración vehículos EV (<i>Apartado 4.3.2.</i>)	Emisiones CO ₂ de vehículos en España (Mt)
2015	100,00%	0,00%	77,733
2016	99,79%	0,00%	0,000
2017	101,02%	0,00%	0,000
2018	102,14%	9,53%	7,564
2019	103,15%	14,53%	11,647
2020	103,62%	19,53%	15,727
2021	104,22%	24,53%	19,869
2022	104,95%	29,53%	24,087
2023	105,84%	30,00%	24,683
2024	100,63%	30,47%	23,838
2025	101,31%	30,95%	24,372
2026	101,93%	31,42%	24,897
2027	102,53%	31,90%	25,421
2028	103,08%	32,37%	25,937
2029	103,56%	32,84%	26,439
2030	103,97%	33,32%	26,925
2031	104,99%	33,79%	27,577
2032	105,99%	34,26%	28,231
2033	106,99%	34,26%	28,498
2034	108,02%	34,26%	28,771
2035	109,09%	34,26%	29,056
2036	110,17%	34,26%	29,342
2037	111,26%	34,26%	29,635
2038	112,38%	34,26%	29,932
2039	113,52%	34,26%	30,235
2040	113,84%	34,26%	30,321

Total emisiones reducidas: 573,003

Gases tóxicos (NO_x y PM):

Los NO_x son todos los compuestos químicos formados a partir de la combinación del nitrógeno con el oxígeno (NO, NO₂ y NO₃)⁶¹; por su parte, las PM son cuerpos sólidos o gotitas de líquidos suspendidos en el aire debido a su diminuto tamaño⁶².

⁶¹ (diariomotor, 2015)

⁶² (Wikipedia, 2017)



Estos compuestos tienen menor capacidad de transmisión que el CO₂, por lo que las afecciones de estos gases preocupan más a nivel local: Se cree que están detrás del agravamiento e, incluso, aparición de irritaciones en los sistemas respiratorio y ocular y de enfermedades crónicas y cerebrovasculares. Resultan especialmente peligrosos para niños (los cuales pueden desarrollar bronquitis agudas ante grandes concentraciones de NO_x), ancianos y personas con enfermedades pulmonares y basculares. Son la principal causa de que no se recomiende hacer deporte al aire libre en las ciudades los días de alta contaminación. También son responsables en gran medida de la lluvia ácida⁵¹.

Si bien la evolución en la emisión de estos gases ha ido cada vez a menos, esta tendencia se ha podido observar con más fuerza en los vehículos. Y es que, como mencionamos previamente, las sucesivas normativas EURO hicieron hincapié en reducir cada vez más los NO_x (*Figura 32*) y las PM (*Figura 33*). En las dos figuras se puede observar como disminuye anualmente la emisión de estos compuestos, siendo aún menor la emisión de los vehículos (lo que se manifiesta como un porcentaje menor del total):

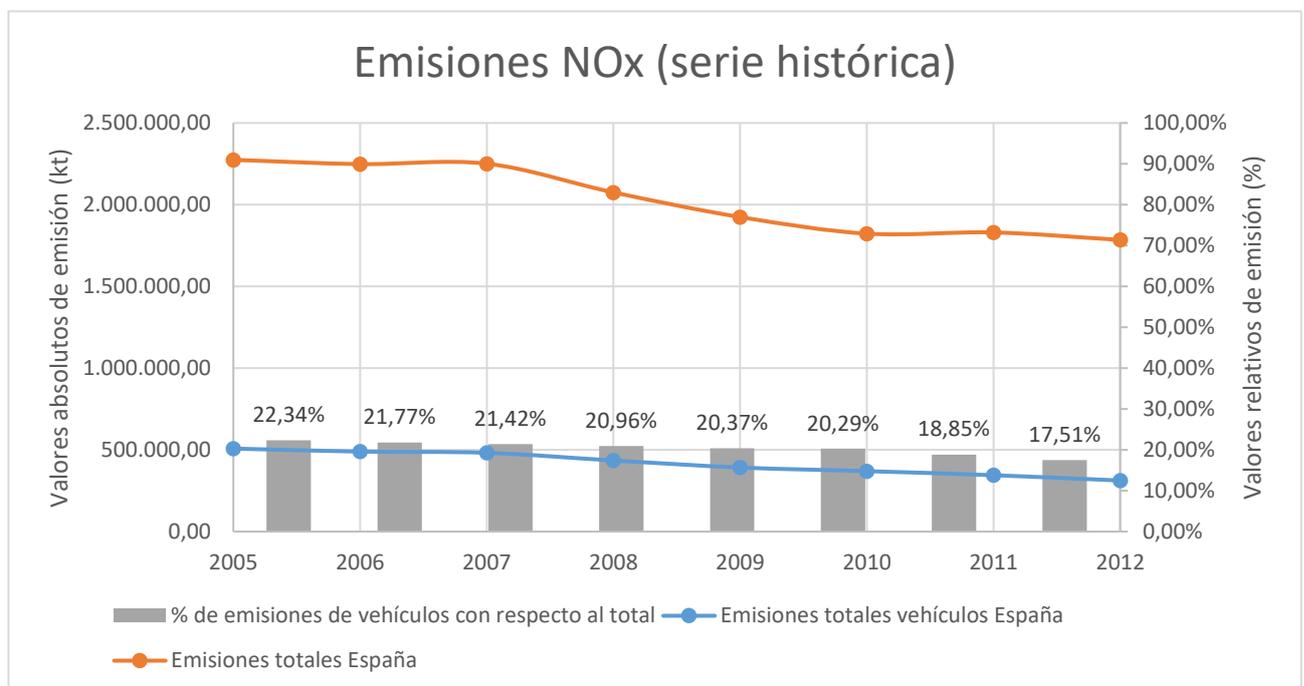


Figura 32. Registros de emisión de NO_x en el periodo 2005- 2012.
(Fuente: Elaboración propia)

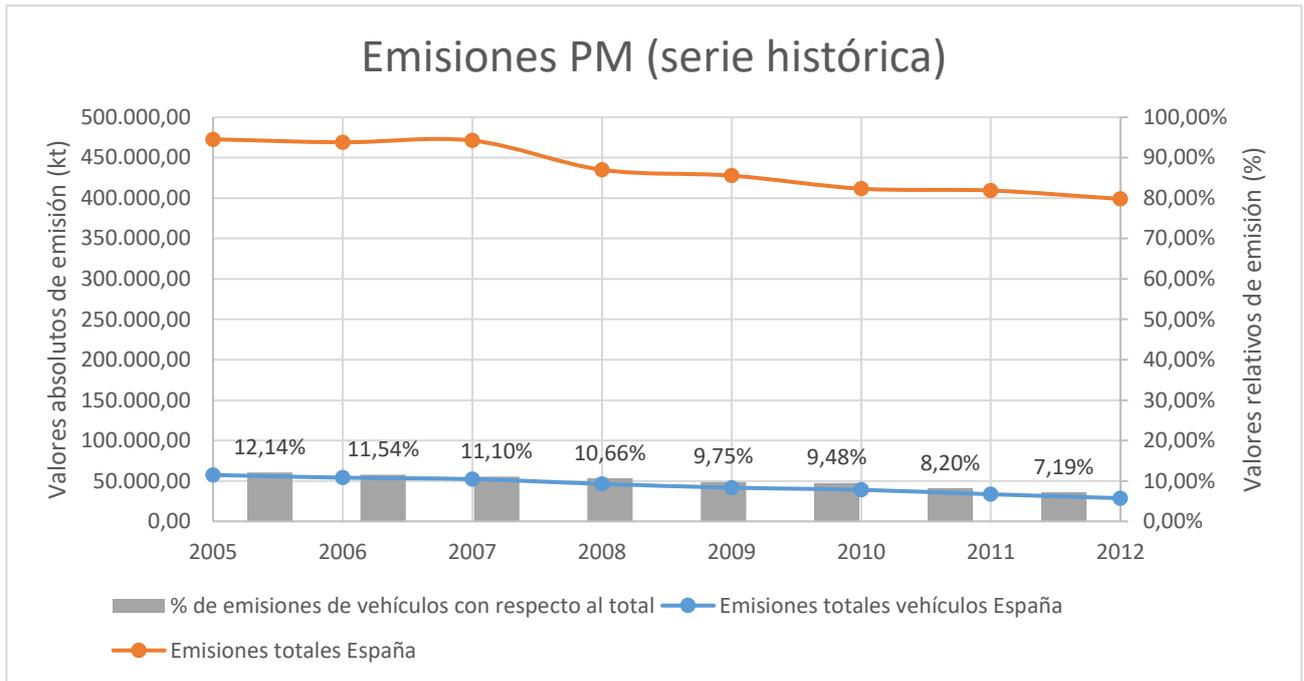


Figura 33. Registros de emisión de PM en el periodo 2005- 2012.
(Fuente: Elaboración propia)

La estimación del ahorro que la inversión en tecnología DWPT tendría con los NO_x y las PM no se puede estimar como en el caso del CO_2 ya que su emisión no va paralela a la emisión total. En lugar de ello, necesita contar con otro factor que valore la disminución de las emisiones procedentes de los vehículos con respecto al total. Para ello disminuirémos el % anual de cada emisión en un:

$$\text{Tasa de crecimiento } \text{NO}_x_{2005}^{2015} = \sqrt[9]{\frac{1.600.422}{2.274.537}} - 1 = -3,83\%$$

$$\text{Tasa de crecimiento } \text{PM}_{2005}^{2015} = \sqrt[9]{\frac{368.649}{472.790}} - 1 = -2,73\%$$

Teniendo este factor en cuenta (valores en azul), operamos igual que en la estimación de emisiones de CO_2 ahorradas. Se adjunta toda la información en la *Tabla 9*, donde los valores de las columnas son:

- 1) Proyecciones relativas sobre las emisiones de vehículos en España (con respecto a 2015).
- 2) Estimaciones del % que supondrá la emisión de los vehículos con respecto al total de emisiones.



- 3) % Penetración vehículos EV.
- 4) Emisiones NO_x de vehículos en España (t).
- 5) Emisiones PM de vehículos en España (t).

Tabla 9. t de NO_x y PM ahorrado cada año. La estimación está basada en las emisiones de 2015
 (Fuente: Elaboración propia)

	NO _x				PM			
	1	2	3	4	1	2	3	5
2015	100,00%	15,77%	0,00%	1.600.422,000	100,00%	5,74%	0,00%	368.649,000
2016	96,83%	15,24%	0,00%	0,000	98,85%	5,33%	0,00%	0,000
2017	93,66%	14,71%	0,00%	0,000	97,70%	4,94%	0,00%	0,000
2018	90,48%	14,21%	9,53%	19.605,025	96,55%	4,59%	9,53%	1.555,353
2019	87,31%	13,73%	14,53%	27.861,003	95,40%	4,26%	14,53%	2.174,375
2020	84,14%	13,26%	19,53%	34.856,667	94,25%	3,95%	19,53%	2.679,233
2021	83,29%	12,80%	24,53%	41.857,305	92,61%	3,66%	24,53%	3.068,067
2022	82,43%	12,37%	29,53%	48.169,919	90,97%	3,40%	29,53%	3.366,257
2023	81,58%	11,94%	30,00%	46.781,110	89,33%	3,15%	30,00%	3.116,196
2024	80,73%	11,54%	30,47%	45.416,049	87,69%	2,93%	30,47%	2.883,017
2025	79,88%	11,14%	30,95%	44.075,247	86,04%	2,72%	30,95%	2.665,706
2026	78,54%	10,76%	31,42%	42.495,643	84,17%	2,52%	31,42%	2.456,424
2027	77,20%	10,39%	31,90%	40.951,418	82,29%	2,34%	31,90%	2.261,931
2028	75,86%	10,04%	32,37%	39.442,721	80,41%	2,17%	32,37%	2.081,294
2029	74,52%	9,69%	32,84%	37.969,622	78,53%	2,01%	32,84%	1.913,629
2030	73,18%	9,36%	33,32%	36.532,126	76,66%	1,87%	33,32%	1.758,099
2031	73,82%	9,04%	33,79%	36.099,879	77,08%	1,73%	33,79%	1.663,563
2032	74,47%	8,73%	34,26%	35.663,022	77,50%	1,61%	34,26%	1.573,753
2033	75,11%	8,43%	34,26%	34.741,682	77,92%	1,49%	34,26%	1.468,161
2034	75,75%	8,15%	34,26%	33.841,661	78,35%	1,38%	34,26%	1.369,614
2035	76,40%	7,87%	34,26%	32.962,577	78,77%	1,28%	34,26%	1.277,644
2036	77,04%	7,60%	34,26%	32.104,051	79,19%	1,19%	34,26%	1.191,816
2037	77,68%	7,34%	34,26%	31.265,704	79,62%	1,11%	34,26%	1.111,722
2038	78,33%	7,09%	34,26%	30.447,160	80,04%	1,03%	34,26%	1.036,981
2039	78,97%	6,85%	34,26%	29.648,044	80,46%	0,95%	34,26%	967,238
2040	79,61%	6,61%	34,26%	28.867,985	80,88%	0,88%	34,26%	902,161

Total emisiones reducidas: 831.655,621

Total emisiones reducidas: 44.542,234

Según estos cálculos, ahorramos la cantidad total de **831.655,621 toneladas (t)**
 de NO_x y **44.542,234 toneladas (t)** de PM en el periodo 2016-2040.



La inclusión de esta tecnología ahorraría grandes cantidades de emisiones contaminantes, sin embargo su beneficio sería mucho mayor en las ciudades altamente contaminadas (sobre todo por los NO_x), donde una reducción podría evitar problemas de salud pública y una mejora en la calidad del aire. Imágenes como la mostrada en la *Figura 34* muestran la magnitud del problema.



Figura 34. Detalle de la ciudad de Madrid donde se aprecia un grado altísimo de contaminación atmosférica
(Fuente: Pinterest)

Por último, las limitaciones de esas estimaciones han sido:

- Los criterios empleados para la estimación de ambos grupos. Se utilizaron a fin de obtener resultados coherentes, si bien no aportan más que una estimación grosera.
- Los valores de penetración se tomaron del *Apartado 4.3.2.*, por lo que aquí se dan las mismas limitaciones que en ese apartado.
- Los valores mostrados en la *Tabla 7* (en los que se basan todas estas estimaciones) proceden de diferentes fuentes oficiales que, sin embargo, en ciertos casos daban valores contradictorios.
- La evolución del porcentaje que suponen las emisiones vehiculares con respecto al total en la *Tabla 9* (valores en azul), representan solo una tendencia que puede variar de forma diferente a la estimada.



Factores sociales

El *Feasibility study* (2015:184-185) estudió varios posibles impactos que la instalación de los sistemas DWPT podrían tener sobre la sociedad en su conjunto. A continuación se enumerarán estos impactos con las correspondientes alteraciones:

- **Desarrollo de actividades físicas en la carretera:** No se esperan impactos de ninguna clase. Los viajes realizados en la red de carreteras tienden a ser de larga distancia, por lo que, en la práctica, caminar y andar en bicicleta no constituyen alternativas. Otro caso sería instalar estos sistemas en núcleos urbanos, donde sería necesario elaborar estudios de impacto a este respecto.
- **Accidentabilidad:** La solución DWPT se propuso debido a que no altera la seguridad de la carretera, por lo que la instalación de esta tecnología no implica nuevos riesgos para la circulación. Los únicos problemas observados son: una reducción en la atención del conductor a su paso por los sistemas DWPT y un aumento del uso del carril derecho (donde estarían instalados estos sistemas). Este último podría ser un problema para las autovías, donde existen gran cantidad de enlaces, sin embargo son necesarios más estudios al respecto. Por otra parte, la electrificación de la carretera y el funcionamiento del IMS podría facilitar la gestión de los flujos de vehículos en la carretera, evitando conglomeraciones y demás situaciones de peligro.
- **Seguridad del IMS:** Resulta fundamental garantizar la seguridad en los datos y cobros de los usuarios que utilicen el sistema DWPT. Sin embargo, esto se consigue con medidas de seguridad como las que tienen otros dispositivos de cobro, por lo que no entraña especial dificultad.
- **Seguros:** No se ha mencionado el papel de las aseguradoras en todo el proyecto ya que escapa de su alcance. Sin embargo, en principio, no tendría por qué haber alteraciones con respecto a la política de seguros actual ya que este sistema no altera la manera de conducir, solo la tecnología que lo hace posible.
- **Asequibilidad:** Ya se mencionó con más detalle en los apartados anteriores. Como resumen podemos destacar que esta tecnología será relativamente cara los primeros años y hasta que se normalice su uso, por lo que no se espera



que los grupos sociales de bajos ingresos adopten este sistema hasta pasado un tiempo.

- **Calidad del viaje:** No se esperan impactos de ningún tipo excepto en la duración del viaje. Cabe la posibilidad de que, con el fin de una buena conexión sistemas DWPT - vehículo, se tenga que limitar la velocidad por debajo de la máxima permitida. Otro motivo por el que se pueda limitar la velocidad sería la de que los VL tuviesen que adaptarse a la velocidad de los VP que pudiesen tener por delante. Esto aún no está confirmado ya que depende del método de comunicación sistema DWPT – vehículo (ver *Apartado 3.5.*), e incluso en el peor de los casos estas limitaciones de velocidad serían muy leves ya que los sistemas DWPT están pensados para trabajar a velocidades promedio.
- **Ruido:** No se esperan impactos en las vías interurbanas ya que a más de 50 km/h el principal motivo de ruido es el contacto rueda – asfalto. Sin embargo si supondría un impacto en el caso de instalarlo en vías urbanas.

4.3.5. Observaciones y limitaciones

Tal como se mencionó al comienzo del Apartado 4.3, estas estimaciones de los impactos nos dan aproximaciones groseras. Esto es debido a que un mayor grado de detalle requeriría estudios e información que, o bien no existe, o bien sobrecargaría en exceso el presente proyecto. En este apartado mencionaremos algunas limitaciones (la mayoría extraídos del *Feasibility study (2015:194)*) que podrían alterar estos impactos y cuyo estudio se tendría que tener en cuenta para elaborar estimaciones más precisas:

- La tecnología aún no está desarrollada comercialmente por lo que aún no ha surgido un precio de mercado. Cualesquiera que sean las tecnologías adoptadas, los costos unitarios serán significativamente más bajos que los de cualquier vehículo experimental.
- Los valores de potencia requerida y, por tanto, energía consumida por los vehículos ligeros y pesados se tomaron de los valores obtenidos empíricamente de dos vehículos representativos: el **Nissan Leaf** para los **VL** y el camión **Scania Serie-R** para los **VP**. Estos valores de consumo pueden ser diferentes para otras marcas y modelos. Además, no se tienen valores de consumo para furgonetas, las cuales se han supuesto como VL.



- Si los costos de funcionamiento se reducen, es de suponer que los usuarios responderían con un aumento en el uso de la carretera. Esto inflaría las estimaciones sobre el crecimiento del tráfico (las cuales se basan en el uso actual de las carreteras), haciendo que el escenario con sistemas DWPT sean significativamente más complejos que el escenario de "no hacer nada". Comprender las implicaciones de tales cambios requeriría un complicado modelo de demanda.
- Este estudio parte de valores actuales que son susceptibles de cambiar con el paso del tiempo; como el precio de los combustibles, el precio de la gasolina, el rendimiento de los motores ICE, etc. Variaciones significativas en alguno de estos parámetros darían lugar a errores más o menos importantes en las estimaciones.
- El presente proyecto analiza la viabilidad de la instalación de los sistemas DWPT en autopistas, aunque no se haya escatimado a la hora de destacar las potenciales ventajas que tendría en tramos urbanos. Llegando en muchos casos a ser más útil en ellos que en las vías interurbanas. Sería muy conveniente elaborar un estudio de viabilidad para los tramos urbanos en el futuro.
- No se han supuesto implicaciones más amplias en el mantenimiento de la carretera, sin embargo, existe la posibilidad de que los cambios en el uso de la carretera tengan implicaciones en su desgaste. Más concretamente, existe la posibilidad de que, si se utilizan sistemas automatizados para mantener una posición central en el carril, sumado al posible aumento en el tráfico, se formen surcos a lo largo del camino tomado por las ruedas.

Estas limitaciones son solo las más importantes, pudiendo existir más. Por su parte, las limitaciones puntuales se han aclarado en sus respectivos apartados.



Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se pretende enumerar los beneficios e inconvenientes que tienen la instalación de los sistemas DWPT de forma esquemática y definitiva. Todo ello para poder determinar finalmente su viabilidad en el *Capítulo 6*.

5.1. Beneficios en la instalación de los sistemas DWPT

Reducción en las emisiones contaminantes

Las reducciones en las emisiones contaminantes se estimaron en el *Apartado 4.3.4*, para el intervalo 2016-2040, dando los resultados reunidos en la *Tabla 10*:

Tabla 10. Resumen de las t reducidas por la instalación de los sistemas DWPT en los tres grupos de contaminantes estudiados
(Fuente: Elaboración propia)

CO ₂ (t)	NO _x (t)	PM (t)
573,003 × 10 ⁶	831.655,621	44.542,234

La reducción de los tres tipos de contaminantes es visible, pero más especialmente en el caso del CO₂ donde las toneladas ahorradas equivalen a casi 7 veces y media la cantidad total emitida en el año 2015.

Por otra parte, el alto grado de suposiciones que se utilizaron para hacer estas estimaciones hacen que la cifra sea susceptible de variar considerablemente (especialmente en el caso de que se limite la emisión de CO₂ en futuras normativas EURO). Además, las políticas actuales de reducción de NO_x y PM en las emisiones vehiculares empujaban los ahorros de estos compuestos con la tecnología DWPT.



Cumplimiento de los compromisos internacionales

Como comentamos previamente, los datos arrojan ahorros sustanciales en la emisión de CO₂, sin embargo, esto no es suficiente para cumplir por mucho los compromisos internacionales, tal como se puede observar en la *Tabla 11* elaborada a partir de los datos del Sistema Español de Inventarios de Emisiones (SEIE) y las estimaciones de este proyecto.

Tabla 11. Proyecciones del ahorro en emisiones de CO₂ en relación a las emisiones de 1990.
(Fuente: Elaboración propia con datos del SEIE)

	% exigido en comparación con 1990	Sin sist. DWPT		Con sist. DWPT	
		Emisiones CO2 (Mt)	% en comparación con 1990	Emisiones CO2 (Mt)	% en comparación con 1990
1990	-	248,552	-	248,552	-
2015	-	310,286	124,84%	310,286	124,84%
2020	80,00%	281,549	113,28%	265,822	106,95%
2030	60,00%	282,504	113,66%	255,578	102,83%
2040	40,00%	309,332	124,45%	279,011	112,25%
2050	20,00%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos

Cabe destacar que el principal motivo de este fracaso en los objetivos de emisión es del conjunto de las actividades del país y no tanto de los transportes. Por último, estas cifras pueden variar ya que, cuando se elaboraron, España aún no se había adscrito al Acuerdo de París. Por lo que las emisiones futuras pueden ser menores.

Mejora en la eficiencia del consumo de energía en el transporte

La reducción en la energía necesaria para el transporte está garantizada con los nuevos motores eléctricos. Su rendimiento del torno al 75% los hace entre 3 y 4 veces más eficientes en comparación con el rendimiento del 15-25% de los motores ICE. Esto se traducirá en unos ahorros considerables para cualquier tipo de vehículo, si bien los VL notarán más esta reducción que los VP.



Por su parte, la instalación de los sistemas DWPT en nuestras carreteras tendrá la ventaja de acabar con la necesidad de grandes baterías para trayectos largos, lo cual tendrá dos efectos principales: Por un lado, ayudará a acabar con la barrera psicológica que los usuarios tienen sobre la escasa autonomía de los vehículos eléctricos. Por otro, permitirá la instalación de baterías mucho más pequeñas, lo que reducirá el costo de adquisición de vehículos EV. Si bien determinar esta reducción es complicado, como ejemplo tenemos la batería desarrollada por Tesla para el Tesla Model S: donde la batería de 85 kWh cuesta 9200€ mientras que la de 45 kWh cuesta 6080€. Dando una reducción de 78€ por cada kWh de menos⁶³.

En contraposición tenemos la reducción de la eficiencia, ya que las pérdidas en el uso de los sistemas DWPT reducen la eficiencia al 60% en el uso de la energía eléctrica. Si bien esa eficiencia sigue estando muy por encima del 20-25% de los motores ICE.

Reducción de la accidentalidad en las carreteras

La reducción de la accidentalidad depende principalmente del escenario escogido, aunque la participación de un sistema de gestión como el IMS puede favorecer la redistribución de vehículos reduciendo el peligro ante conglomeraciones (como se destaca más adelante). También avisaría a los servicios de emergencia y gestión de la carretera nada más detectar un accidente, a la vez de que prevendría a los demás usuarios que puedan verse afectados.

En el otro extremo tenemos la posible distracción del usuario, tanto por la instalación del sistema DWPT como por los servicios opcionales que este aporta (Wi-Fi, cobertura 5G, etc.). Además del riesgo que conlleva la utilización masiva del carril derecho en las autovías con gran cantidad de enlaces (si bien el peligro real se desconoce, necesitándose estudios al respecto).

⁶³ (Autobild, 2017)



Mejora de la comodidad en las carreteras

La comodidad en el uso de la carretera se vería mejorada por la cantidad de servicios adicionales de conectividad al usuario, así como por la posibilidad de reducción de las retenciones.

Por otra parte, el tiempo de trayecto puede verse alterado en los casos de que se instalen sistemas de comunicación sistema DWPT-vehículo que no funcionen a altas velocidades. Además, los servicios de conectividad, al ser opcionales, dependen de que el propietario (en este caso la administración) decida ofrecerlos; previo acuerdo con las empresas de telecomunicaciones. Esto repercutirá en un mayor costo, el cual puede ser abonado íntegramente por la administración o por los usuarios mediante un sistema de tarifas.

Gestión de las carreteras

La gestión del tráfico se vería mejorada con la presencia de un software como el IMS (explicado en el *Apartado 3.5.*). Su uso permitiría contabilizar en tiempo real el número de vehículos que circulan por una carretera en un momento concreto, pudiendo recomendar a los conductores el uso de carreteras alternativas (tanto los que se están acercando al tramo congestionado como los que ya circulan por él) en caso de llegar a una densidad de vehículos crítica. En un futuro, este mismo sistema IMS podría conectarse con los vehículos autónomos para gestionarlos y así evitar por completo las retenciones en casi cualquier condición de tráfico, si bien este escenario se escapa del alcance del proyecto.

Como desventajas tenemos la limitada capacidad de gestión del IMS en los primeros años, cuando la penetración de la tecnología DWPT sea aún muy baja. Para una correcta gestión se requiere que la mayoría de los vehículos y de las carreteras cuenten con esta tecnología, haciendo que sus ventajas desaparezcan cuando la presencia de ambas es baja.

Facilidad en la inclusión de otras tecnologías

La instalación de estos sistemas en las carreteras permitiría electrificar la carretera en sí misma. Esto permitiría el desarrollo y especialización de los motores EV, hasta el punto de revolucionar el sector. Con este tipo de tecnología instalada en



la mayor parte de la red de carreteras se conseguiría evitar los problemas de los vehículos EV asociados a la batería, lo que incrementaría drásticamente el interés de estos en detrimento de los motores ICE que dejarían de ser competitivos.

También avanzaría años el desarrollo de la tecnología de vehículos autónomos, ya que actualmente se ve lastrado en el aspecto técnico por la cantidad de sensores necesarios para que un vehículo recorra centrado el carril. Un sistema que provea al vehículo de energía desde el centro del carril le daría una referencia para mantenerse sin necesidad de complejos sensores, lo que sumado al sistema IMS le permitiría contar con la presencia y trayectoria de los vehículos que circulan alrededor.

Esto, sin embargo, no dejan de ser suposiciones sin referencias sólidas que las corroboren, por lo que cabe la posibilidad de que los cambios reales sean menores a los esperados y no supongan una ventaja apreciable en el desarrollo de esas tecnologías.

Otras ventajas

La creación de puestos de trabajo en la manufacturación de componentes para los sistemas DWPT y en la instalación de estos en las carreteras. Si bien la manufacturación apenas necesitaría nueva mano de obra y es posible que gran cantidad de los componentes se tengan que importar.

El calor generado por las pérdidas de las bobinas puede evitar heladas en las carreteras susceptibles de congelarse. Esto reduciría tanto el ahorro económico que supone reducir las dosis de sal esparcida, como el ahorro medioambiental al no contaminar las cunetas. Sin embargo, este comportamiento por parte de las bobinas solo se ha teorizado, necesitando comprobarlo en la práctica mediante ensayos en laboratorio y en carretera.

La reducción de ruidos al fomentar la incorporación de vehículos EV. Sin embargo, esta ventaja solo se daría a velocidades menores de 50 km/h (a más velocidad el principal ruido lo generan los neumáticos) por lo que solo valdría en ciudades.



5.2. Desventajas en la instalación de los sistemas DWPT

Aumento de los costos de adquisición de vehículos

Al ser una tecnología relativamente nueva en el mercado y no contar con la capacidad de manufacturación de los componentes que constituyen los motores ICE, los vehículos EV implican un mayor costo de adquisición. A estos precios habría que añadirle el costo de los sistemas acoplados al vehículo para poder utilizar la tecnología DWPT (para los cuales no se han encontrado datos sobre su precio). Además, las casas comerciales de vehículos encontrarían una fuerte competencia los primeros años, donde aquellas empresas con experiencias piloto en vehículos EV (Lexus, Tesla, Nissan, Renault, ...) tendrían una clara ventaja sobre las demás.

Sin embargo, una reducción notable en el coste por kilómetro reducido, junto con una posible reducción en los costos de las baterías gracias a los sistemas DWPT y un menor costo de mantenimiento; hace que los vehículos EV resulten mucho más competitivos a medio plazo. Por ello se espera que los primeros interesados en adquirir estos vehículos sean las empresas dedicadas al transporte, seguidos por los usuarios privados con mayores ingresos y, por último, los usuarios privados con menores ingresos.

Coste de fabricación/instalación de los sistemas DWPT

Los costos de compra e instalación son de 676.415€ y 1.127.360€, según datos del *Feasibility study* para la puesta en obra más barata (método basado en zanjas). Si bien estos costos pueden variar, es evidente que la instalación de estos sistemas exigiría una inversión enorme por parte del estado. A estos costes de compra e instalación habría que añadir los costes de mantenimiento (para el cual no hay cifras definitivas), los cuales pueden ser mucho mayores a los costes de mantenimiento actuales si no se hiciese una correcta puesta en obra. Además, el aumento del tráfico en el carril derecho puede agravar este problema.

Como efecto positivo, la construcción de muchos km supondría la creación de una fabricación estandarizada que disminuiría notablemente el coste por cada km con tecnología DWPT instalada.



Pérdida de ingresos por impuestos al carburante

El *Apartado 4.3.2.* trata íntegramente de determinar la disminución que supondría cada km instalado con tecnología DWPT para las arcas públicas. A raíz de varias suposiciones se concluyó que, para un periodo de 20 años, esas pérdidas ascenderían 4.319.338,35€ por km construido, sin contar con el “Tramo autonómico del impuesto de Hidrocarburos” presente en algunas CC.AA. Esto supone casi 2,5 veces el coste de construcción e instalación por km.

Por otro lado, la intención inicial de la administración es reducir la emisión de gases de efecto invernadero emitidas por los ICE. Por lo que otras políticas para reducir el uso de estos vehículos también supondrían pérdidas en los impuestos al carburante. Explicado de otra manera: estas pérdidas ya se dan por supuestas cuando lo que se busca es reducir el consumo de combustibles.

Otras desventajas

En este punto mencionaremos brevemente lo que una política pro sistemas DWPT supondría en sectores que dependen íntegramente de los motores convencionales. Sectores que incluyen a las propias marcas de vehículos, las empresas petroleras, los talleres de reparación de vehículos o, en menor medida, los concesionarios (empresas centradas en la venta de vehículos EV como Tesla venden sus vehículos por internet sin necesidad de intermediarios, por lo que este modelo podría ser copiado en un futuro). Esto es debido a que cada sector respondería a esas políticas de forma diferente, por lo que se haría necesario un estudio personalizado para cada uno, lo cual se escapa del alcance de este proyecto.

Si bien una política pro sistemas DWPT reduciría el mercado de los vehículos con motores convencionales, la reducción del porcentaje que estos suponen sería muy gradual y faltarían lustros para que representara un verdadero problema en estos sectores. Es cierto que tendría que renovarse para continuar siendo competitivos, pero tendrían tiempo suficiente para paliar los cambios y adaptarse.



Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Compendio de conclusiones

La elaboración de este proyecto ha demostrado conclusiones dispares:

Conclusión 1)

La determinación del ahorro en emisiones se ha topado con una serie de dificultades que ha obligado a simplificar las variables y tomar varias suposiciones. Esto nos ha dado un resultado grosero que, sin embargo, ha demostrado ser bastante reducido en la emisión de gases tóxicos en las ciudades (NO_x y PM). Para verlo con perspectiva, la emisión ahorrada de NO_x en el periodo 2016-2040 era de 831.656 toneladas, lo que es solo poco más de la mitad (un 0,52%) de las emisiones totales emitidas por España a lo largo de 2015. La cantidad de PM es aún más pequeña, siendo la suma de emisiones de PM ahorradas en el periodo 2016-2040 equivalentes al 12% de las emisiones de PM emitidas por España en 2015. Esto se puede explicar por el pequeño porcentaje que suponen las emisiones vehiculares de estos compuestos con respecto a las emisiones nacionales totales (ver *Figuras 32 y 33*) y a las, cada vez mayores, restricciones de las normativas EURO a este respecto. Las emisiones de CO_2 son más destacables, en torno a 7,5 veces las emisiones de 2015 para el periodo de estudio, sin embargo son susceptibles de disminuir drásticamente si en un futuro se exigieran limitaciones a este compuesto en las próximas normativas EURO. Además, en este estudio no se contempla la Intensidad de Carbono (ver *Apartado 4.3.4.* en la página 67), lo que podría disminuir aún más los ahorros en emisiones.

Conclusión 2)

La consecución de los compromisos internacionales queda muy lejos de cumplirse. La instalación de los sistemas DWPT reduce sustancialmente la emisión (sobre todo cuanto mayor es la penetración), sin embargo, las proyecciones futuras de emisión total de CO_2 en España son tan elevadas que incluso reducciones sustanciales en las



emisiones vehiculares no son suficientes. Esto, sin embargo, es un problema que afecta al conjunto del país y no solo al sector de los transportes. Según las estimaciones de partida, las emisiones vehiculares de CO₂ en el periodo 2005-2015 suponían, de media, el 24,45% (ver *Figura 31*) de las emisiones totales nacionales; por lo que, a mayor tasa de penetración, mayor ahorro en emisiones. Con estas cifras en un escenario ideal con un 100% de penetración, se conseguiría ahorrar casi un cuarto de las emisiones anuales en España.

Conclusión 3)

Los costes de fabricación e instalación de los sistemas DWPT ascienden a unos 1,8 millones de euros (1,6M £) por km según datos del *Feasibility study* para la puesta en obra más barata (tipología por zanjas). Este presupuesto asciende a 6,12 millones de € por km si incluimos los presupuestos al carburante que las arcas públicas dejarán de percibir en el periodo 2018-2038. Resulta una cifra altísima incluso para una obra pública, lo que imposibilita la conexión de gran parte de la red de carreteras (sobre todo teniendo en cuenta las cada vez menores inversiones en Fomento). Sin embargo, es necesario matizar estas cifras. Para empezar, el precio viene dado según diferentes conversaciones mantenidas con contratistas ingleses, y en este país el precio de los materiales de construcción es más elevado (por ejemplo, el precio del m³ de hormigón en masa es de 101€ sin IVA (~90£⁶⁴) en comparación con los ~90€ en España). Además, esta información era de hace 2 años, en ese tiempo ya se han realizado experiencias y ensayos, a la vez que se ha perfeccionado la tecnología para que sea más barata. Por último, este precio era una aproximación de lo que costaría un tramo de prueba, en caso de construir muchos km el precio se reduciría considerablemente al fabricar e instalar los sistemas DWPT en grandes cantidades.

Conclusión 4)

Al contrario que las reducciones en las emisiones, las cuales fueron menores de lo que cabría esperar, la utilización de los sistemas DWPT por parte de los usuarios arrojó datos muy prometedores: Ya se conocía el alto rendimiento de los motores eléctricos (en torno al 75%), sobre todo si se compara con los ineficientes motores

⁶⁴ (MisterConcrete, 2017)



ICE (en torno al 15-25%). Si a esto le añadimos el mayor precio del combustible en comparación con la electricidad (ver *Tabla 6*), obtenemos reducciones en los precios que van desde el 73,75%, en los vehículos ligeros a gasolina, hasta el 35,53%, en los vehículos pesados. El principal problema son las pérdidas de los sistemas DWPT, las cuales reducen la eficiencia del motor eléctrico al 60%, lo cual se traduce en una mayor energía suministrada por km y, por tanto, un mayor coste. Esto, a priori, generaría un mayor interés, por parte de los usuarios, en cargar los vehículos EV en sus casas en lugar de utilizar los sistemas DWPT. Sin embargo, las tarifas industriales aplicadas en estos sistemas hacen que la energía eléctrica suministrada por los sistemas DWPT sea más competitiva que la aportada en los hogares, incluso pese a un mayor consumo: 2,24 céntimos/km recorrido frente a 3,86 céntimos/km recorrido, respectivamente. Además, la instalación de estos sistemas en nuestras carreteras acabaría con los principales problemas de las baterías de los vehículos EV, lo que haría mucho más atractiva su adquisición y, en última instancia, la fomentaría.

Conclusión 5)

La adquisición de vehículos EV sería considerablemente más cara que la adquisición de sus homólogos con motores ICE. Esta diferencia puede llegar hasta del doble del precio original sin contar con las ayudas del Estado (ver *Tabla 2*); además, habría que añadir el precio de los sistemas necesarios para utilizar la tecnología DWPT (los cuales no se han contabilizado por falta de información). Esta diferencia de precios trae consigo un problema comercial añadido: en la *Tabla 2* se puede ver como las marcas con experiencias piloto previas resultan mucho más competentes que las que no las han desarrollado tanto (el incremento de precios entre vehículos EV con respecto a sus homólogos ICE, sin ayudas, ronda el 40-55% en los modelos de Renault y Nissan; mientras que ronda el 90% en modelos de KIA y Peugeot). Pese a estas cifras, se espera que el mercado de los vehículos EV sea cada vez más competitivo, sobre todo con la entrada de las tecnologías DWPT, las cuales podrían reducir las baterías a la mitad.

Conclusión 6)

La gestión y la seguridad de la carretera es mucho más difícil de determinar al depender del tipo de sistema instalado, de los servicios añadidos por el



administrador de la carretera, de la comunicación sistema DWPT-vehículo, etc. pero el factor que más influye es el porcentaje de penetración de vehículos que utilizan esta tecnología. Utilizando un dispositivo MFID de comunicación sistema DWPT-vehículo y un sistema IMS de gestión de la carretera (ver *Apartado 3.5.*), se podría gestionar, teóricamente, la circulación de todos los vehículos en las vías con esta tecnología instalada; con lo que desaparecerían los atascos y se reducirían considerablemente los accidentes. El problema es que este sistema solo puede gestionar aquellos vehículos adaptados para la tecnología DWPT, por lo que en caso de que estos representen solo una pequeña fracción del parque móvil (cosa más que probable los primeros años desde la instalación de estos sistemas) sus ventajas serán muy reducidas. Este problema, sin embargo, tendería a solucionarse por el gradual aumento de los vehículos EV al ser estos más competitivos y atractivos para los usuarios (como vimos previamente). Como puntualización, se prevé que esta tecnología sea adoptada primero por los estratos sociales más pudientes al ser más cara, siendo aquellos estratos sociales menos adinerados los últimos en adoptarla.

Conclusión 7)

Los servicios adicionales aportados por los sistemas DWPT (Wi-Fi, cobertura 5G, asistencia al viaje, etc.) dependerá de los acuerdos entre la administración y las empresas del sector de las telecomunicaciones. Pudiendo abonar el costo de tales servicios la misma administración o los usuarios mediante el pago de tarifas.

Conclusión 8)

Las proyecciones que suponen la implantación de los sistemas DWPT en las carreteras españolas con respecto a la incorporación de otras tecnologías futuras son, cuanto menos, muy positivas. Si bien se requieren estudios mucho más detallados (ya que estas estimaciones escapan del alcance del presente proyecto), la incorporación de sistemas electrificados a lo largo de la carretera junto con programas de gestión del tráfico, facilitaría la evolución y desarrollo de los vehículos EV (haciéndolos mucho más competitivos y eficientes) y de los propios sistemas DWPT (evitando o al menos reduciendo las pérdidas en la transmisión de energía, reduciendo costes de instalación y explotación, etc.); así como ahorraría



años en la intrusión de los vehículos autónomos en nuestras carreteras (lo que eliminaría los peligros del factor humano en la conducción).

Conclusión 9)

En cuanto a las empresas privadas; existirían sectores beneficiados, sectores perjudicados en un inicio pero con capacidad de respuesta para beneficiarse a medio plazo y sectores perjudicados forzados a reinventarse:

Entre los sectores beneficiados destaca el sector del transporte; el cual tendría que hacer frente a inversiones iniciales pero que gracias a los ahorros en combustible, mantenimiento y a las ventajas con las que cuentan los vehículos EV en los núcleos urbanos, podría conseguir cuantiosas ganancias a medio plazo (según el coste de los vehículos EV y los kilómetros que estos recorran). Otros sectores beneficiados serían la manufactura industrial (por la construcción de los sistemas DWPT), la construcción (por la puesta en obra de los sistemas DWPT), el energético y el de las telecomunicaciones; los cuales recibirían contratos millonarios.

Entre los sectores perjudicados en un inicio destaca el sector de la automoción. La instalación de sistemas DWPT junto con campañas de apoyo a los vehículos EV forzaría a las casas comerciales a entrar en una carrera por diseñar vehículos EV más competitivos (sobre todo en el ahorro de los precios). En esta carrera contarían con ventaja las casas comerciales que cuentan con mayores partidas en I+D a este respecto, en especial marcas como Lexus, Tesla, Renault y Nissan, por destacar algunas. Si bien esto crearía una distribución irregular inicial en el sector, se espera que sea cuestión de tiempo que el resto de marcas ofrezcan sus propios modelos competitivos. Además, según el escenario de penetración propuesto en este estudio, la incorporación de vehículos EV se daría de forma gradual, lo que crearía dos mercados paralelos de vehículos EV e ICE durante años, ambos aprovechables como nuevas oportunidades de negocio por el sector.

Por último, están las empresas forzadas a reinventarse. En este grupo destacan las petroleras, las cuales se verían en la necesidad de reinventar su modelo de negocio al perder cada año más cuota de mercado. En una situación similar, si bien en menor medida, están los talleres de reparación de vehículos y los concesionarios, los cuales deberán reinventarse y especializarse en la nueva tecnología.



6.2. Viabilidad de la implantación de los sistemas DWPT

Una vez comentadas las conclusiones, si bien no se ha llegado a determinar la viabilidad de la instalación de estos sistemas, en este apartado final se intentará dar respuesta a esta pregunta repasando los detalles más importantes mostrados a continuación:

La política europea actual en reducción de emisiones de NO_x y PM son suficientes para rebajar los niveles de polución de estos gases sin que la instalación de los sistemas DWPT genere ahorros destacables. El caso del CO_2 es diferente, llegando a generar ahorros importantes en la emisión de este gas. Sin embargo, una política restrictiva en emisión de CO_2 en futuras normativas (como podría ser la teórica EURO 7) podría tener resultados parecidos sin necesidad de instalar estos sistemas, siempre y cuando la industria automovilística pueda desarrollar motores ICE más eficientes y que contaminen menos.

El coste de instalación de los sistemas DWPT por parte de la administración resulta demasiado elevado, a partir de los datos disponibles. Si bien estimaciones más precisas para la instalación de estos sistemas en nuestro territorio darían precios, a priori, más reducidos; queda claro que su hipotética instalación se limitaría a lugares concretos en lugar de a la mayor parte de la red, lo que reduciría sus ventajas finales.

La instalación de los sistemas DWPT pueden aportar nuevos servicios que harían más cómodo, seguro y eficiente el viaje por carretera. Esto repercutiría en beneficios directos para los usuarios, pero también ahorraría millones de euros anuales en atascos y accidentes. Si bien es cierto que estos efectos se notarían más conforme aumente el porcentaje de penetración de esta tecnología, lo que no daría grandes beneficios los primeros años.

Los usuarios que utilicen la tecnología DWPT gastarían solo un cuarto de lo que gastan actualmente por conducir un motor ICE. Esto sumado al ahorro en el mantenimiento del vehículo y al abaratamiento en el costo de adquisición por reducir el tamaño de las baterías, hará que los vehículos EV sean mucho más competitivos en el mercado. Lo que será especialmente atractivo para las empresas de transporte y reparto.



Por los beneficios mencionados en el apartado anterior, se espera que la instalación de los sistemas DWPT fomente claramente la venta de vehículos EV. De ello depende el aprovechamiento de esta tecnología; ya que, como hemos visto, cuanto más penetración haya, mayores serán los beneficios. Sin embargo, se espera que los primeros años sean los más complicados, ya que será cuando más haya que invertir y menos destaquen las ventajas; invirtiéndose esta tendencia con el paso del tiempo.

Por último, la instalación de componentes que permiten una mejor organización y control del vehículo, del tráfico y del entorno puede apoyar estudios y ensayos para crear vehículos más seguros y eficientes. Lo que podría culminar a medio plazo con la utilización de vehículos autónomos que ahorraría entre el 70% y el 90% de los accidentes actuales.

Por todo ello, se puede concluir con que no existe una viabilidad actual para estos sistemas debido a que no soluciona los problemas de contaminación más acuciantes ni responde a una demanda de los usuarios inmediata. Esta falta de demanda actual se puede achacar al segundo mayor problema (por detrás del alto costo de instalación): la falta de información de los usuarios. Por lo que se recomienda una política de ayudas públicas, información y márketing para toda la sociedad; para que el uso de los sistemas DWPT tenga éxito.

Por otra parte, existen sólidos indicios de la necesidad de un sistema como este en un futuro próximo, donde las más importantes son: el aumento en la compra de los vehículos EV, las tendencias en el desarrollo del mercado automovilístico (el cual se ve forzado por normativas anti emisión cada vez más restrictivas), las normativas internacionales y municipales (que favorecen la inclusión de los vehículos EV en las grandes ciudades) y el ahorro económico que un vehículo EV supone para el usuario y las empresas privadas. Recordemos que el sistema DWPT no solo favorece la inclusión de los vehículos EV (con todas las ventajas que esto implica), si no que también aporta nuevas ventajas a la vez que anula desventajas de esta tipología de vehículos.



La tecnología DWPT, debido a las etapas iniciales en las que se encuentra, tiene previsto seguir mejorando la eficiencia en la transmisión de la carga y abaratando costes. Por lo que se espera que, cada año que pase, de mejores resultados. De hecho puede tener un peso más que destacable en la evolución de los vehículos EV y, sobre todo, vehículos autónomos a medio plazo.

Si bien actualmente no parece razonable invertir cuantiosas sumas de dinero para adaptar gran parte de la red con esta tecnología, si resulta conveniente instalar tramos pilotos que permitan obtener datos en aquellos aspectos que no se han podido cuantificar en el presente proyecto por falta de información. Además, proporcionaría una valoración sobre como reaccionarían el público en general y una referencia para el sector automovilístico. La instalación de tramos pilotos nos permitiría estar preparados para una potencial demanda que se puede dar en cuestión de pocos años. Porque, tal como hemos podido ver en las experiencias del sector automovilístico en este tipo de tecnologías, una preparación a tiempo puede ahorrar mucho dinero en la instalación de un sistema que es, a la vez, más útil y eficiente.



Capítulo 7

Referencias bibliográficas

El presente proyecto proviene del interés del autor en profundizar sobre las tecnologías DWPT y su posible aplicación en España. El origen de esta inquietud fue la elaboración de un trabajo el pasado curso 2016-2017 sobre este mismo tema, del cual se ha extraído mucha de la información que aparece a lo largo del proyecto (especialmente en el *Capítulo 2*).

Sin embargo, el principal documento bibliográfico ha sido el *Feasibility study: Powering electric vehicles on England's major roads* (“Estudio de viabilidad: Fomentar los vehículos eléctricos en las carreteras principales de Inglaterra”), publicado en julio de 2015. El cual consiste en un informe solicitado por Highways England para la implantación de políticas que permitan un aumento en el uso de vehículos EV por parte de los usuarios de las vías inglesas. A lo largo del estudio se han citado (debidamente indicadas) traducciones literales de este documento, al igual que se han extraído datos concretos referenciados en las notas al pie.

Si bien dichas notas al pie se deberían referenciar como (**Highways England, 2015**) según la normativa ISO-690, es decisión del autor indicar la página del documento donde aparece el dato en cuestión. Estas “licencias” son debidas a que el *Feasibility study* es el documento más solicitado y, debido a su extensión, conviene marcar el lugar exacto para una posible consulta del dato en cuestión.

Otros documentos bibliográficos utilizados en menor medida fueron:

- EMEP/EEA air pollutant emission inventory. Guidebook 2016. (Redactado por la Agencia Europea de Contaminación Atmosférica)
- Energy Policies of IEA Countries: Spain. 2015 Review. (Redactado por la Agencia Internacional de la energía)



- Spanish energy regulator's. National report to the European Commission 2016 (Redactado por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia)
- Inventario nacional de emisiones a la atmósfera 1990-2012, Capítulo 7: Transporte por carretera. (Redactado por el Sistema Español de Inventario de Emisiones, perteneciente al MAPAMA)
- Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990 - 2015 (Revisión 2017). (Redactado por el Sistema Español de Inventario de Emisiones, perteneciente al MAPAMA)

Por su parte, los principales organismos oficiales consultados fueron:

- Highways England
- UK Government
- Agencia Europea de Contaminación Atmosférica (EEA)
- Agencia Internacional de la energía (IEA)
- Consejo de reguladores de Energía de Europa (ACER)
- Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC)
- Banco Mundial
- Comisión Europea
- Agencia estatal Boletín Oficial del Estado (BOE)
- Ministerio de Fomento
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA)
- Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (MINETAD)
- Dirección General de Tráfico (DGT)
- Instituto Nacional de Estadística (INE)

Por último, también se referenció mucha de la información en base a artículos periodísticos de diferentes periódicos y a blogs, artículos y/o foros de páginas web especializadas. Todo ello aparece referenciado en las correspondientes notas al pie según la Normativa ISO690.