TESIS DOCTORAL

EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COBRO ELECTRÓNICO DE PEAJES EN LA GESTIÓN DE LAS CARRETERAS

JAVIER DE LAS HERAS MOLINA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado

Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

POLITÉCNICA

Universidad Politécnica de Madrid

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos

Directores:

José Manuel Vassallo Magro

Juan Gómez Sánchez

Junio de 2019

*“El mejor homenaje que puede tributarse
a las personas buenas es imitarlas”*

Concepción Arenal (1820 – 1893)

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	12
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	14

PARTE I: INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Motivación de la investigación	18
1.2 Estructura de la tesis doctoral	21
2. ESTADO DEL ARTE	25
2.1 Tecnologías empleadas en los sistemas de cobro electrónico de peajes	27
2.1.1 Tacógrafo	27
2.1.2 Reconocimiento automático de matrícula (ANPR)	28
2.1.5 Comunicaciones por satélite (GNSS)	30
2.1.6 Comunicaciones móviles	31
2.2 Documentos normativos de la Unión Europea relativos al telepeaje.....	33
2.2.1 Política y legislación comunitaria en materia de telepeaje.....	33
2.2.2 Otros documentos técnicos.....	37
2.3 Experiencias nacionales	40
2.3.1 Suiza.....	41
2.3.2 Austria.....	42
2.3.3 Alemania.....	43

2.3.4	República Checa.....	44
2.3.5	Eslovaquia.....	45
2.3.6	Polonia.....	45
2.3.7	Eslovenia.....	46
2.3.8	Hungría.....	46
2.3.9	Portugal.....	47
2.3.10	España.....	48
2.3.11	Francia.....	50
2.3.12	Estados Unidos.....	51
2.3.13	Chile.....	52
2.4	Literatura científica.....	55
2.4.1	Tecnologías de telepeaje.....	55
2.4.2	Influencia del cobro electrónico en los usuarios de las carreteras de peaje	58
2.5	Preguntas de la investigación.....	63

PARTE II: OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	66
4.	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	68

PARTE III: ANÁLISIS

5.	ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DE TELEPEAJE.....	71
5.1	Presentación.....	71
5.2	Técnicas de análisis.....	72
5.3	Resultados.....	75
5.3.1	Evaluación de las tecnologías de telepeaje existentes.....	75

5.3.2	Próximos desarrollos tecnológicos en el ámbito del telepeaje.....	80
5.3.3	Análisis comparativo.....	82
5.4	Análisis D.A.F.O.	90
6.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS	93
6.1	Presentación	93
6.2	Datos	94
6.2.1	Encuesta a usuarios de la red española de carreteras de peaje	94
6.2.2	La red de autopistas de peaje españolas	100
6.3	Técnica de análisis: Modelo de elección discreta.....	104
6.4	Resultados.....	107
6.4.1	Análisis preliminar: Conocimiento de los conductores de los sistemas de telepeaje.....	107
6.4.2	Análisis de la adopción de los dispositivos para el pago electrónico de los peajes	109
6.4.3	Disponibilidad a realizar un mayor uso de las autopistas de peaje si los dispositivos de telepeaje fueran gratuitos.....	114

PARTE IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
7.1	Conclusiones y respuestas a las preguntas de la investigación.....	123
7.2	Recomendaciones para la toma de decisiones en el ámbito del telepeaje ..	128
7.3	Limitaciones y futuras líneas de investigación	131

PARTE V: REFERENCIAS Y DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

8.	REFERENCIAS	135
9.	ANEXO: DIVULGACIÓN DE RESULTADOS	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de la tesis doctoral.....	24
Figura 2. Estructura del Estado del arte	25
Figura 3. Países europeos con sistemas de pago por uso en toda o parte de su red de alta capacidad para determinados vehículos.....	40
Figura 4. Esquema del control fronterizo del sistema de peaje electrónico de Suiza ...	42
Figura 5. Mapa con los Estados que emplean el sistema "EZ-Pass"	51
Figura 6. Mapa del sistema de autopistas de peaje urbanas de Santiago de Chile	52
Figura 7. Esquema de los objetivos de la investigación	67
Figura 8. Esquema planteamiento metodológico	68
Figura 9. Metodología del Análisis sobre los sistemas tecnológicos empleados en el peaje electrónico.....	74
Figura 10. Mapa de las autopistas de peaje en régimen de concesión de España	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las principales características de las experiencias nacionales en el ámbito del telepeaje.....	54
Tabla 2. Resumen del planteamiento metodológico de la tesis doctoral.....	69
Tabla 3. Análisis D.A.F.O. de los sistemas de telepeaje en el ámbito de la Unión Europea	91
Tabla 4. Preguntas y respuestas planteadas por la encuesta	95
Tabla 5. Datos de la red de carreteras de alta capacidad y red de autopistas de peaje en las regiones analizadas	96
Tabla 6. Resumen de las principales características de la encuesta	99
Tabla 7. Datos de la red de autopistas de peaje en España (año 2018)	102
Tabla 8. Conocimiento previo de los sistemas de peaje por parte de los conductores.....	108
Tabla 9. Análisis de las variables en función de si el conductor tiene en propiedad un dispositivo de telepeaje.....	110
Tabla 10. Resultado de modelo "Análisis de la propiedad del dispositivo de telepeaje"	113
Tabla 11. Análisis de las variables si el dispositivo de telepeaje fuera gratuito para el conductor.....	116
Tabla 13. Resultado de modelo "Análisis del uso de las autopistas de peaje si los dispositivos de telepeaje fueran gratuitos"	118

AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente tesis doctoral no habría sido posible sin la ayuda, el apoyo y el cariño de muchas personas. Desde aquí, mi más sincero agradecimiento a todas ellas.

A José Manuel y a Juan, mis directores de tesis, por guiarme, ayudarme, aconsejarme y no dejar que me rindiera. A José Manuel, por confiar en mí desde el primer día y transmitirme su experiencia, saber hacer y conocimiento. A Juan, por su paciencia, su vitalidad, sus consejos y, lo más importante, su amistad.

A todos los profesores y profesoras que me han enseñado a lo largo de mi vida lo que estaba en los libros y, sobre todo, lo que no está escrito en ellos.

A todos mis amigas y amigos que hacen que mi vida sea más edificante, estimulante y plena. A Carlos, por su fuerza, superación y vitalidad. A Silvia y Keko, por vuestro apoyo. A Isabel, Natalia, Sandra, José Luis, Fernando, Ángel y Alberto, por compartir conmigo los años universitarios y los que han venido después. A Laura, Samir, Paola, Guille, Victoria, Ana, Thais y un largo etcétera, compañeros de trabajo y amigos.

A todos los que me acompañaron en TRANSyT, especialmente a Carmen y Patricia, muchas gracias por vuestra ayuda.

A todas mis compañeras y compañeros del Ministerio de Fomento, Antonio, Eva, Ester, Manuel, Aida, Ángeles, y un larguísimo etcétera, os agradezco la paciencia durante tantos días de trabajo y vivencias compartidas.

A Alberto, mi primo que es como un hermano, por todo su ánimo, alegría, apoyo y ejemplo ante la vida.

A mis padres, Ana y Valeriano, por inculcarme el valor del esfuerzo y del trabajo, por ayudarme en todo momento y en todo lugar y por enseñarme a preguntar por todo y ser curioso y crítico. A mi hermana Ana, por ser mucho más que una hermana, por ser una persona fundamental en mi vida y un ejemplo de cariño y compromiso.

A Andrea, por tu amor, fuerza, inteligencia, cariño y confianza en mí. Eres el pez que siempre puede resistir cualquier temporal.

A vosotros, a vosotras, de todo corazón ¡GRACIAS!

RESUMEN

El aumento de la movilidad, la necesidad de desarrollar infraestructuras en un contexto económico de restricciones presupuestarias, así como una mayor apertura a la inversión y tecnologías extranjeras han contribuido al aumento de las infraestructuras de peaje en general, y a las carreteras de peaje en particular. Este hecho, unido al desarrollo y comercialización del vehículo conectado, al avance de sistemas de comunicación vehículo–infraestructura (V2I) y vehículo–vehículo (V2V), los avances en la tecnología móvil y, en general, el desarrollo tecnológico, aumenta las posibilidades de mejora y evolución de los sistemas de telepeaje.

En este contexto, el objetivo de esta tesis doctoral es la obtención de criterios y pautas que permitan una eficaz implantación de sistemas de cobro electrónico de peajes en las carreteras, teniendo en cuenta tanto a los gestores de dichas infraestructuras como a sus usuarios. De esta forma, se pretende mejorar las herramientas disponibles por parte de las Administraciones Públicas para la gestión de las carreteras en el ámbito del cobro electrónico de peajes, teniendo en cuenta la visión y opinión de los usuarios de las carreteras de peaje.

Para alcanzar dicho objetivo, se realiza un estudio del estado del arte centrado en las tecnologías de telepeaje, documentos normativos de la UE, experiencias nacionales y literatura científica. Tras su análisis se deducen cuatro preguntas cuyas respuestas no han sido anteriormente estudiadas en profundidad. Estas preguntas que dan pie al desarrollo una serie de objetivos específicos centrados en la revisión pormenorizada y comparativa de los sistemas de telepeaje que permita la elección de los sistemas de telepeaje idóneos para una determinada red de carreteras; así como la determinación y estudio de los factores que influyen en el uso de los sistemas de cobro electrónico de peaje por parte de sus usuarios.

El planteamiento metodológico propuesto se basa en dos análisis que permiten responder a los objetivos y preguntas formuladas en la investigación. El primer análisis abarca las tecnologías de telepeaje a través de un análisis D.A.F.O. en función de diversos parámetros y variables, tales como el coste, la interoperabilidad, el enforcement, o la obsolescencia, entre otros; mientras que el segundo se centra en la visión de los usuarios de las autopistas de peaje, a través del análisis de la información procedente de una encuesta realizada a los usuarios de las autopistas de peaje en España. Asimismo, en aras de profundizar en el conocimiento de los usuarios, y para explorar una futura generalización del telepeaje en las redes de carreteras, se analizan los cambios de percepción en dichos conductores si estos dispositivos fueran gratuitos.

En cuanto a las principales conclusiones, en el caso de la implantación de un nuevo sistema de cobro electrónico de peajes, diferentes factores deben ser tenidos en cuenta por parte de los gestores de carreteras a la hora de la elección de la tecnología de telepeaje, como el tipo de red, si los tramos a tarificar son puntos específicos de la red o bien suponen la totalidad de la red de alta capacidad o la red viaria al completo. En el primero de los casos, tecnologías como el DSRC o RFID aparecen como las más idóneas, mientras que, en redes más densas, con un mayor número de tramos a tarificar, tecnologías como la localización por satélite o las comunicaciones móviles son más ventajosas. Asimismo, no debe olvidarse la planificación a medio y largo plazo. Los sistemas de cobro electrónico de peajes son tecnologías que se encuentran en plena evolución técnica. Por esta razón, la planificación es fundamental para los decisores técnicos y políticos. Entre los elementos que deben ser tenidos en cuenta está la posible integración de servicios de movilidad al usuario de la carretera, la posible obsolescencia o la preocupación de la ciudadanía por la privacidad.

En cuanto a los sistemas ya en funcionamiento, la primera conclusión es la importancia de la interoperabilidad entre los diferentes sistemas de telepeaje. La interoperabilidad debe ser analizada desde un amplio punto de vista valorando la parte técnica y comercial, así como la transfronteriza. Además, los sistemas de cobro electrónico de peajes son extremadamente sensibles a la legislación de enforcement y la posibilidad de identificar y perseguir a los evasores de peajes. El éxito de un sistema de flujo libre se basa en la correcta planificación de los medios humanos y materiales necesarios para poner la ley en efecto. También se debe mejorar la coordinación entre las administraciones públicas competentes.

En cuanto a la visión de los sistemas de cobro electrónico de peajes centrada en los usuarios de estos sistemas, el aumento en el uso del telepeaje mejorará la asignación de rutas en tiempo real, optimizando el uso de la red de carreteras. Así, la adopción de dispositivos de peaje electrónico por parte de los conductores no parece estar influenciada por las características socioeconómicas de los usuarios, como el ingreso o la edad, únicamente influye en la adopción del telepeaje la región de residencia. Así, no es posible establecer un único perfil de aquellos usuarios a los que deben dirigirse los esfuerzos para aumentar el uso del telepeaje. Además, poseer un dispositivo de peaje electrónico está fuertemente asociado al uso de las autopistas de peaje y a las características del desplazamiento que se realiza. Conocer esta realidad es importante a la hora de identificar las posibilidades y los segmentos de mercado para aumentar el uso de los sistemas de telepeaje a corto y medio plazo.

Asimismo, la entrega gratuita de dispositivos de telepeaje, o la búsqueda de mecanismos para reducir los costes de los dispositivos asumidos por los usuarios, configurarían una política efectiva a ser adoptada por parte de los operadores de peaje y la administración pública, con el objetivo de promover una adopción más amplia del cobro electrónico de peajes. Este “tag” gratuito podría integrar otros servicios de interés para el usuario y las administraciones: control de evasiones, control de ITV, pago de impuestos o la integración del eCall, entre otros.

ABSTRACT

Increased mobility, the need to develop infrastructure in an economic context of budgetary constraints, as well as greater openness to foreign investment and technologies have contributed to a generalized increase in toll infrastructure and, particularly, in toll roads. This fact, together with the development and marketing of the connected vehicle, the advancement of vehicle-infrastructure (V2I) and vehicle-vehicle (V2V) communication systems, advances in mobile technology and technological development in general, increases the possibilities for the improvement and evolution of electronic toll collection (ETC) systems.

In this context, the objective of this doctoral thesis is to obtain criteria and guidelines for the effective implementation of ETC systems on road networks, taking into account the needs of both the managers of these infrastructures as well as their users. Then, the aim of this research is to improve the tools currently available to Public Administrations for the management of ETC systems in the field of road charging. Based on a detailed state-of-the-art review on ETC technologies, the thesis establishes a series of specific objectives focused on a comparative analysis of ETC systems aimed at guiding the choice of appropriate ETC systems for a given road network, as well as the identification of the main factors determining the use of ETC systems by road users.

The proposed methodological approach is based on two analyses. The first analysis covers ETC technologies through a D.A.F.O. analysis, based on a series of parameters and variables, such as cost, interoperability, enforcement or obsolescence, among others. The second analysis, focused on the vision of toll road users, exploits the information collected from a nationwide survey carried out among toll road users in Spain. Additionally, in order to explore a future generalisation of ETC on road networks, drivers' perceptions are analysed if these devices were provided free of charge.

The thesis yields some interesting conclusions. Regarding the implementation of tolling in a certain road network, different factors should be taken into account by road managers when choosing a particular ETC technology, such as the type of length of the network, its density of entrances and exits, etc. In simpler networks, technologies such as DSRC or RFID appear to be the most suitable, while in denser networks, with a greater number of sections to be charged, technologies such as satellite positioning or mobile communications are more advantageous. In addition, medium- and long-term planning should not be forgotten, then the possibility of integrating mobility services to the road user, the possible obsolescence or the public concern

for privacy should be considered when choosing a particular ETC technology. Additionally, public administrators and operators should consider ETC interoperability from a broad point of view, valuing the technical, commercial and cross-border aspects.

With regard to the user-centred vision of ETC systems, the thesis concludes that drivers' adoption of ETC devices in Spain does not seem to be influenced by the socioeconomic characteristics of individuals. Thus, it is not possible to establish a specific profile of those users to whom efforts to increase the use of electronic toll collection should be directed. In addition, adopting ETC devices is strongly associated with the frequency of use of toll motorways and the characteristics of the trips carried out.

Regarding the ETC action explored in this thesis, the free delivery of ETC devices –as well as other mechanisms to reduce the costs of the devices assumed by users– would configure an effective policy to be adopted by toll operators and the public administration, with the aim of promoting a wider adoption of ETC. These tags provided for free could integrate other services of interest to both drivers and administrations: evasion control, VTI control, control of tax payment or eCall integration, among others.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **3G:** Tercera generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (“Universal Mobile Telecommunications System” o servicio universal de telecomunicaciones móviles).
- **4G:** Cuarta generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (“Universal Mobile Telecommunications System” o servicio universal de telecomunicaciones móviles). Sucesora de la anterior.
- **5G:** Quinta generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (“Universal Mobile Telecommunications System” o servicio universal de telecomunicaciones móviles). Sucesora de la anterior.
- **ANPR:** Siglas de “Automatic Number Plate Recognition”. En castellano, reconocimiento automático de matrículas.
- **AP:** Siglas de Autopista de peaje.
- **CALM:** Siglas de “Communications Access for Land Mobiles”. En castellano, arquitectura de comunicaciones para elementos móviles terrestres.
- **CVIS:** Siglas de “Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems”. En castellano, sistemas cooperativos de comunicación vehículo – infraestructura.
- **D.A.F.O.:** Siglas del análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades.
- **EDR:** Siglas de “Event Data Recorder”. En castellano, registrador de datos de eventos.
- **DSRC:** Siglas de “Dedicated short-range communications”. En castellano, comunicaciones de corto alcance específicas.
- **EETS:** Siglas de “European Electronic Toll Service”. En castellano, Servicio Europeo de Telepeaje (SET).

- **ETC:** Siglas de “Electronic Toll Collection”. En castellano, cobro electrónico de peajes.
- **FCA:** Siglas de “Federal Customs Administration”. En castellano, Administración Suiza de Aduanas.
- **GNSS:** Siglas de “Global Navigation Satellite System”. En castellano, sistema global de navegación por satélite.
- **GPS:** Siglas de “Global Positioning System”. En castellano, sistema de posicionamiento global.
- **GSM:** Siglas de “Global System for Mobile communications”. En castellano, Sistema global para las comunicaciones móviles.
- **ITS:** Siglas de “Intelligent Transportation Systems”. En castellano, sistemas inteligentes de transportes.
- **MaaS:** Siglas de “Mobility as a Service”. En castellano, movilidad como servicio.
- **MLFF:** Siglas de “Multi-Line Free-Flow”. En castellano, [carretera] muticarril de flujo libre.
- **NFC:** Siglas de “Near Field Communication”. En castellano, comunicación de campo cercano.
- **OBU:** Siglas de “On-Board Unit”. En castellano, dispositivo a bordo.
- **RFID:** Siglas de “Radio Frequency Identification”. En castellano, identificación por radiofrecuencia.
- **RSE:** Acrónimo de “Roadside Equipment”. En castellano, infraestructura auxiliar de la carretera.
- **SET:** Siglas de Servicio Europeo de Telepeaje.

- **UBI:** Siglas de “Usage-Based Insurance”. En castellano, seguro de basado en el uso.
- **UE:** Siglas de la Unión Europea.
- **CEN (Normas):** Normas de Comité Europeo de Normalización.

PARTE I:

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación de la investigación

Una carretera de peaje es aquella en la que, para poder ser utilizada, es necesario el pago de una tarifa por parte del usuario (María Moliner, 2017, Real Academia Española, 2018). Dicho peaje puede ser cobrado por una administración, organismo o empresa pública, o por una empresa concesionaria de la carretera de carácter privado, que es la encargada del mantenimiento de ésta y, en muchos casos, de su construcción.

El cobro de peajes para el uso de las infraestructuras ya era empleado en la Antigüedad Clásica. Así, en la época de mayor esplendor del Imperio Romano, cuya red de grandes vías abarcaba alrededor de 80.000 km de calzadas, existían en determinados puntos estaciones para el cobro de peajes (*truagium*), lugares donde se percibía el cobro de los derechos de aduana interior, así como el cobro por el uso de obras singulares, básicamente puentes (Ponte, 2010). Ya en la Edad Media, el peaje designaba el tributo que era exigido por el soberano o por el señor feudal a quien se hubiese concedido esa facultad, para que las personas y las mercancías pudiesen transitar por determinados puntos de las vías comunicación, recibiendo un determinado nombre en función del lugar de paso – pontazgo, *portorium*, etc. Del mismo modo que en época romana, se configuraba como un mecanismo apto para obtener recursos generales que no eran destinados necesariamente a construir y/o mantener la infraestructura por la que el pago del peaje autorizaba a discurrir; esto es, el peaje funcionaba a modo de verdadera aduana interior (Enciclopedia jurídica, 2014).

La visión actual de los peajes por la que los usuarios de algunas obras públicas, fundamentalmente carreteras, puentes o túneles, participan en la financiación de su construcción y/o mantenimiento, mediante el abono de una cantidad de dinero, surge en la Inglaterra de la Revolución Industrial. En esta época, y ante la necesidad de ampliar y mejorar la red vial para atender la creciente demanda de transporte focalizada en los centros industriales y mineros del Reino Unido, el parlamento británico legisló en favor de que las carreteras se pudieran entregar en concesión a compañías particulares (*turnpikes trusts*), las cuales quedaron con derecho de instalar portazgos y cobrar peajes. Esta política fue ampliamente desarrollada en el siglo XIX con la introducción de los estados liberales y el desarrollo económico.

De manera similar a otros países occidentales, en España las infraestructuras de peaje en el ámbito de las obras públicas experimentaron un auge en el siglo XIX. Así, las concesiones quedan

reflejadas en la Ley General de Caminos de Hierro de 1855 o en la Ley de Carreteras de 1877, entre otras. No obstante, será en la segunda mitad del siglo XX cuando se produzca la implantación de las carreteras de peaje en nuestro país. En la década de los 60, debido a las limitaciones presupuestarias, el Gobierno decide sacar a concesión los proyectos de autopistas de peaje para que su financiación sea soportada por el sector privado. Así, la fórmula solo se aplica a las carreteras con una intensidad de tráfico suficiente como para ser rentables a la empresa privada concesionaria, que tenía que asumir los costes de la construcción y el mantenimiento a cambio de cobrar el peaje. De todos los tramos que cumplían estos requisitos, sólo uno llegó a realizarse en esta década, el túnel de Guadarrama en la N-VI, cuya concesión se otorga en 1960. Posteriormente, durante la década de 1960 y 1970 se empieza a desarrollar el Programa de Autopistas Nacionales Españolas (P.A.N.E.). Otra gran fase de desarrollo de este tipo de infraestructuras se dio en los primeros años del siglo XXI. Hoy en día, la Red de Carreteras del Estado en régimen de peaje suma 3.039 kilómetros (Ministerio de Fomento, 2019).

Tradicionalmente, el cobro de peajes ha sido manual. Este hecho ocasionaba diversos problemas, como la existencia de colas en las playas de peaje, pérdida en el tiempo de viaje, o problemas de seguridad vial, entre otras. Con el progreso de la tecnología, se desarrollaron distintas soluciones que permitían un cobro electrónico. Poniendo el foco en los sistemas de cobro electrónico de peajes, estos se introdujeron en la década de 1980, en un primer momento en peajes urbanos, como Bergen, Trondheim o Singapur, para posteriormente ser implantados en tramos interurbanos de las redes de carreteras de Europa, América y, más recientemente, Asia.

En la actualidad, diversos factores hacen que los sistemas de cobro electrónico de peajes se encuentren en un período de transformación. Por un lado, en las últimas décadas la importancia de las infraestructuras de peaje ha crecido en todo el mundo, debido fundamentalmente al aumento de la movilidad y a la necesidad de desarrollar infraestructuras en momentos de restricciones presupuestarias. Además, otros condicionantes, como una mayor apertura a la inversión y tecnologías extranjeras y un mayor acceso a los mercados de financiación, también han contribuido al aumento de las infraestructuras de peaje en general, y a las carreteras de peaje en particular.

Por otro lado, con el desarrollo y comercialización del vehículo conectado, cada vez más presente en las carreteras con aplicaciones como el *eCall*, obligatorio en los vehículos nuevos desde 2018, o sistemas de comunicación vehículo–infraestructura (V2I) y vehículo–vehículo

(V2V), las posibilidades de mejora y evolución de los sistemas de telepeaje están aumentando. Asimismo, los avances en la tecnología móvil, con la cobertura 3G y 4G ya implantadas en gran parte del territorio y el próximo desarrollo de 5G, posibilitan que aparezcan nuevas oportunidades para los sistemas de cobro electrónico de peajes.

De esta forma, la incorporación de sistemas inteligentes de transportes –ITS por sus siglas en inglés– al telepeaje, el desarrollo tecnológico que actualmente vive nuestra sociedad y un aumento de las carreteras con peaje al usuario están impulsando la evolución del cobro de los peajes hacia el pago electrónico. Todos estos elementos justifican el desarrollo de la investigación que condujo a la presente tesis doctoral.

En este contexto, el principal objetivo de esta tesis doctoral es la obtención de criterios y pautas que permitan una eficaz implantación de sistemas de cobro electrónico de peajes en las carreteras, teniendo en cuenta tanto a los gestores de dichas infraestructuras como a sus usuarios. De esta forma, con la presente investigación se pretende mejorar las herramientas disponibles por parte de las Administraciones Públicas para la gestión de las carreteras en el ámbito del cobro electrónico de peajes, teniendo en cuenta la visión y opinión de los usuarios de las carreteras de peaje.

1.2 Estructura de la tesis doctoral

La presente tesis doctoral se divide en cinco partes. La estructura de la tesis doctoral se explica a continuación:

Parte I – Introducción y Estado del arte

La primera parte comienza con la presente introducción (capítulo 1) y continúa con una revisión en profundidad del estado del arte (capítulo 2).

- El **capítulo 1** comienza con la motivación de la investigación, basada en el análisis de los sistemas de cobro electrónico de peajes debido a las grandes transformaciones que está experimentando el telepeaje. Continúa con el desarrollo de la estructura de la tesis doctoral.
- El **capítulo 2** está dedicado a la revisión del estado del arte sobre la materia. Este estudio del estado del arte se centra en una presentación de las tecnologías de telepeaje existentes, además de las normas que lo regulan a nivel europeo. Esto permite estudiar las experiencias nacionales de los principales países que tienen estas tecnologías en su red de carreteras. Finalmente, el estado del arte recoge las principales investigaciones de ámbito académico, poniendo el foco en los gestores de infraestructuras y en los usuarios. Esta revisión del estado del arte de los sistemas electrónicos de peaje implica el análisis de numerosos aspectos que influyen en estos sistemas: técnicos, económicos, legales y administrativos, de control y orden públicos, entre otros. Un vez concluido el estudio del arte se detecta que en la literatura existente todavía hay cuestiones que no han sido suficientemente analizadas y que configuran las preguntas de la presente investigación.

Parte II – Objetivos y Planteamiento metodológico

La segunda parte de la tesis doctoral establece los objetivos de la investigación (capítulo 3) en base a las preguntas de la investigación formuladas tras el estudio del estado del arte. Esta parte finaliza con el desarrollo del planteamiento metodológico (capítulo 4).

- El **capítulo 3** comienza con el establecimiento del objetivo principal de la tesis doctoral. De este objetivo, ya plasmado en la motivación de la investigación, y de las preguntas de la investigación procedentes de la revisión del estado del arte, se deducen una serie de objetivos específicos que configuran la segunda parte de este capítulo.

- Una vez desarrollado los objetivos, el **capítulo 4** expone el planteamiento metodológico de la investigación basado en un doble análisis, el primero centrado en los aspectos tecnológicos de telepeaje, y un segundo con el foco en el comportamiento y punto de vista del telepeaje por parte de los usuarios de las carreteras de peaje.

Parte III - Análisis

La tercera parte es el núcleo de la tesis doctoral. En ella se desarrollan dos análisis que permiten responder a los objetivos y preguntas formuladas en la investigación. El primer análisis abarca las tecnologías de telepeaje (capítulo 5), mientras que el segundo se centra en la visión del telepeaje por parte de los usuarios de las autopistas de peaje en España (capítulo 6).

- El **capítulo 5** realiza un análisis comparativo en profundidad de las tecnologías existentes a través de un análisis D.A.F.O. (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades) que permite establecer una serie de conclusiones y recomendaciones para los gestores de carreteras sobre la idoneidad del empleo de una u otra tecnología en función de diversos parámetros y variables, tales como el coste, la interoperabilidad, el *enforcement*, o la obsolescencia, entre otros.
- Por otro lado, el **capítulo 6** desarrolla un análisis de las percepciones de los usuarios en materia de adopción de sistemas de cobro electrónico para realizar el pago de los peajes. Para ello, se ha analizado la información procedente de una encuesta realizada a los usuarios de las autopistas de peaje en España. Con el mismo, se pretende obtener qué parámetros influyen más en la adopción del telepeaje por parte de los conductores. Asimismo, en aras de profundizar en el conocimiento de los usuarios, y para explorar una futura generalización del telepeaje en las redes de carreteras, se analizan los cambios de percepción en dichos conductores ante una medida específica: facilitar estos dispositivos sin coste directo para el usuario. De esta forma, se obtienen resultados que permiten al decisor técnico contar con el punto de vista de los conductores a la hora de llevar a cabo mejoras en la toma de decisiones en el ámbito del cobro electrónico de peajes.

Haciendo una analogía en términos económicos, se puede decir que el análisis de las tecnologías de telepeaje sería el análisis de la oferta, mientras que el análisis de los usuarios se centraría en el lado de la demanda de los sistemas de cobro electrónico de peajes.

Parte IV – Conclusiones y recomendaciones

La **cuarta parte** de la tesis expone las principales conclusiones de la investigación (capítulo 7), así como una valoración de los criterios y pautas que, deducidas de la tesis, pueden ser de utilidad para los gestores de infraestructuras de peaje.

- En el **capítulo 7** se obtienen una serie conclusiones y recomendaciones para los gestores de las infraestructuras viales que pueden contribuir a aumentar el uso de los sistemas electrónicos de peaje, proporcionando así beneficios relevantes para la sociedad en línea con las políticas marcadas por la Unión Europea. Además, se puede considerar que haciendo más atractivo el uso de la red de carreteras de alta capacidad, en detrimento de las alternativas convencionales, se obtienen beneficios potenciales para los usuarios en términos de mejora de la seguridad vial y de reducción de la congestión, los cuales también redundan en la sociedad en su conjunto en aspectos como la mejora del medio ambiente o el mejor uso de los recursos.

Parte V – Referencias y divulgación de resultados

Finalmente, la quinta parte del documento recoge las referencias bibliográficas utilizadas (**capítulo 8**), así como, en forma de anexo, la divulgación (**capítulo 9**) en forma de artículos, congresos y publicaciones de la investigación realizada.

A modo de resumen, el esquema de la estructura de la tesis doctoral se resume en la Figura 1:

Figura 1. Estructura general de la tesis doctoral

Elaboración propia

2. ESTADO DEL ARTE

Para la realización de la investigación que ha dado como resultado la presente tesis doctoral se ha llevado a cabo un profundo análisis de la bibliografía y documentación existente en el ámbito de los sistemas electrónicos de peaje y su relación con la gestión y explotación de las carreteras de peaje. Esto ha permitido identificar aquellos temas que no han sido tratados con suficiente profundidad hasta ahora por parte de la literatura científica.

Figura 2. Estructura del Estado del arte

Elaboración propia

Este análisis del estado del arte y de la práctica comienza con la presentación de las principales tecnologías de telepeaje existentes (capítulo 2.1). A continuación, se da paso al estudio de los documentos normativos que regulan los sistemas de cobro electrónico de peajes en Europa (capítulo 2.2), para posteriormente analizar las principales experiencias nacionales en los países europeos que emplean dichos sistemas (capítulo 2.3). Finalmente, para obtener una visión más completa se realiza una revisión detallada de los estudios científicos y académicos realizados hasta la fecha, tanto desde una visión tecnológica, centrada en el gestor de la infraestructura, como desde una perspectiva centrada en el usuario de la carretera (capítulo 2.4).

Al tratarse de una materia eminentemente práctica, tienen más protagonismo los aspectos del estado del arte referentes a la práctica y a la regulación frente a la literatura académica, que es relativamente escasa hasta el momento.

La razón por la que se ha escogido el marco europeo como referencia en este estudio del estado del arte radica en que Europa presenta problemas de heterogeneidad particularmente relevantes en la implantación del telepeaje. Debido que cada país ha implantado un sistema de cobro electrónico de peaje sin coordinación con sus estados vecinos, se han desarrollado problemas de falta de interoperabilidad, problemas transfronterizos, congestión, sobrecostos para los usuarios, etc. Sin embargo, para completar este análisis también se hace referencia a otros países que son punteros en el desarrollo y uso de sistemas de cobro electrónico de peajes fuera de Europa, como Estados Unidos y Chile.

2.1 Tecnologías empleadas en los sistemas de cobro electrónico de peajes

Las principales tecnologías empleadas en el ámbito de los sistemas de cobro electrónico de peajes a nivel europeo, por orden cronológico de aparición, son:

- Tacógrafo: Recoge la distancia recorrida por el conductor a través de un dispositivo a bordo conectado con un odómetro.
- Reconocimiento automático de matrícula ("*Automatic number plate recognition*" o ANPR en inglés): Una tecnología ampliamente utilizada en todo el mundo que usa videocámaras para la identificación del vehículo.
- "*Dedicated short-range communications*" (DSRC por sus siglas en inglés): Tecnología basada en la comunicación bidireccional entre el equipamiento de la carretera (generalmente pórticos) y dispositivos a bordo de los vehículos.
- Identificación por radiofrecuencia ("*Radio Frequency Identification*" o RFID en inglés): Sistema más utilizado en Estados Unidos, se basa en un sistema de radio que detecta los dispositivos a bordo de los vehículos.
- Comunicaciones por satélite ("*Global Navigation Satellite System*" o GNSS en inglés): La tecnología satelital utiliza la posición del vehículo para determinar el peaje a pagar por el usuario.
- Comunicaciones móviles: Basados en aplicaciones móviles y las frecuencias de telefonía.

A continuación, se desarrollan de forma detallada las principales características de cada tecnología.

2.1.1 Tacógrafo

El tacógrafo es una tecnología que registra la distancia recorrida por el usuario a través de un OBU conectado electrónicamente al odómetro del vehículo. Suiza, el primer país en introducir un sistema de peaje totalmente electrónico a nivel nacional, eligió esta tecnología para implantar un sistema de tarificación a vehículos pesados a partir de 2001. También se han desarrollado proyectos piloto para introducir un sistema similar en otros países fuera de Europa, como el caso de Oregón en Estados Unidos.

Dentro de esta tecnología de cobro electrónico de peajes, los vehículos están equipados con un OBU que está acoplado al tacógrafo y que registra permanentemente la distancia recorrida. El transpondedor también incorpora las tecnologías GPS y DSRC a efectos de control, así como una tarjeta chip para almacenar los datos de kilometraje. El sistema de peaje se complementa con

pórticos instalados en los pasos fronterizos, que activan y desactivan el dispositivo embarcado en el vehículo (*On-board unit* o OBU en inglés) al cruzar la frontera de la zona de peaje, con el objetivo de cobrar solo por la distancia recorrida dentro del territorio determinado. La tecnología se basa en la autodeclaración, ya que las grabaciones de datos deben ser enviadas periódicamente al sistema central de información de los administradores del peaje. Por ello, se han introducido varias funciones de seguridad y control para garantizar que las declaraciones de los usuarios sean exactas, mediante el uso de tecnologías ANPR, DSRC y GPS. Por lo tanto, el potencial para la evasión con esta tecnología es limitada (Felix et al., 2000), aunque son posibles declaraciones de vehículos erróneas o manipulaciones del tacógrafo. Sin embargo, las tasas de evasión están por debajo del 1% (Balmer, 2006), aspecto también debido probablemente a la cultura suiza.

2.1.2 Reconocimiento automático de matrícula (ANPR)

El uso de cámaras de video para la identificación del vehículo en infraestructuras de peaje es hoy en día una tecnología madura y altamente automatizada. El ANPR se ha empleado principalmente en el ámbito de los peajes urbanos, como en Londres, Estocolmo o Milán, entre otros. Sin embargo, existen otros ejemplos en carreteras interurbanas, tales como la autopista de peaje ETR407 en Toronto. A partir de 2013, algunos países como Australia o Chile están considerándolo como una alternativa al DSRC (Kapsch, 2013).

Este sistema funciona a través de cámaras (montadas en postes o pórticos en el borde de la carretera), que toman una foto de las placas de la matrícula del vehículo. El software de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) lee la matrícula del vehículo y el sistema verifica dicha matrícula en una lista oficial de la administración de tráfico, con el fin de identificar el vehículo y aplicar un cargo al propietario o el conductor. Al usuario se le cobra sin la necesidad de instalar ningún OBU, ya sea a través de una cuenta de pre-registro o mediante pagos individuales por uso. A este respecto, cabe señalar que la tecnología ANPR requiere generalmente que los usuarios se registren en el sistema antes de usar la carretera de peaje para crear una cuenta, o para pagar por cada viaje. Así, los peajes suelen ser de pre-pago o de post-pago.

2.1.3 Dedicated short-range communication (DSRC)

La tecnología DSRC consiste en la transmisión de microondas de datos entre un OBU y la infraestructura de peaje en carretera –*Road-Side Equipment* (RSE)–, que está formada principalmente por pórticos instalados a lo largo de la carretera de peaje (Sorensen & Taylor,

2005). Ha sido el enfoque más común en todo el mundo para la implantación del cobro electrónico en autopistas de peaje desde finales de 1980, y por lo tanto puede considerarse como una tecnología probada y madura en la actualidad. Sus aplicaciones se han extendido a zonas urbanas como Singapur o Melbourne y, más recientemente, a los sistemas de peaje de camiones a nivel nacional en países como Austria y Polonia (Nowacki et al., 2011).

La tecnología DSRC permite la comunicación inalámbrica de microondas (DSRC 5.8 GHz) entre el OBU y los pódicos situados en la carretera con el fin de cobrar los peajes electrónicamente. El OBU está asociado a la cuenta de un usuario registrado y puede ser utilizado para cobrar al usuario, antes o después del uso. Además, el dispositivo también puede almacenar algunos datos específicos del vehículo, como detalles de la matrícula o la categoría del vehículo, que se pueden utilizar para calcular el importe del peaje a pagar. La infraestructura requerida incluye pódicos de peaje colocados sobre las calzadas con antenas DSRC para permitir la comunicación inalámbrica con el OBU (Jordán et al., 2003). Cuando el vehículo pasa bajo el pódico, el OBU es detectado por la antena y su código de identificación es leído y verificado. Una vez que se identifica el vehículo, se aplica el cobro y se envía al sistema central de datos para que procese la transacción. Los pódicos a menudo se complementan con sensores de clasificación de vehículos y cámaras que comprueban si las características del vehículo son consistentes con la información almacenada en el OBU. También registran potenciales evasores del peaje.

La tecnología DSRC se puede utilizar bien en playas de peaje (Pickford & Blythe, 2006), el sistema tradicional, bien en los esquemas de varios carriles de flujo libre –*Multi-Line Free-Flow* (MLFF)– (Lee et al., 2008). En cuanto a las playas de peaje con barreras, un lector electrónico se comunica con el vehículo que se aproxima al puesto de peaje; a continuación, la barrera del peaje (si existe) se eleva automáticamente. Esta configuración no constituye un enfoque de peaje de flujo libre, ya que los vehículos están a menudo obligados a reducir su velocidad y, en consecuencia, el flujo de tráfico por carretera se puede ver afectado. Por esta razón, se utilizan poco en sistemas de peaje urbano y son principalmente empleados en sistemas de peaje interurbanos a nivel nacional en países como Francia, Italia o España. Como los vehículos no siempre están obligados a parar en el puesto de peaje, para evitar la evasión del peaje se instalan equipos de control complementarios, como la tecnología ANPR.

En contraste con el DSRC en las playas de peaje, el DSRC multicarril de flujo libre supera las restricciones de detención o reducción de la velocidad para pagar el peaje. Por lo tanto, la tecnología de flujo libre puede mejorar en gran medida la capacidad efectiva vial y reducir la

congestión en las carreteras de peaje con altos volúmenes de tráfico, ya que el vehículo se mueve libremente cuando se paga el peaje (Sheehan, 2008). Las antenas DSRC se instalan en los pórticos y transmiten la información al Sistema Central, donde se produce el cobro. El sistema es capaz de identificar qué pórticos han sido atravesados por cada vehículo y, en consecuencia, cobrar por cada tramo de carretera. La decisión sobre la ubicación del pórtico puede estar relacionado con diversos criterios, tales como la maximización de los beneficios para el operador, los impactos sobre la movilidad y la economía local, y las características de las rutas alternativas (Amorim et al., 2014).

2.1.4 Identificación por radiofrecuencia (RFID)

La identificación por radiofrecuencia hace referencia a aquellas tecnologías que utilizan ondas de radio para identificar dispositivos OBU de forma automática. En las últimas décadas, la tecnología RFID ha sido también usada para telepeaje sobre todo en los Estados Unidos y China, con ejemplos limitados fuera de estas naciones. El rendimiento y las características de los sistemas basados en la RFID son, al menos en la práctica, muy similares a los de la tecnología DSRC, ya que ambos son enfoques basados en las microondas. Cuando un vehículo se aproxima a una estación o un pórtico de peaje, el campo de radiofrecuencia emitida desde la antena activa el transpondedor. Posteriormente se transmite una señal a la antena con información sobre el vehículo que pasa (Feng et al., 2010; Ren & Gao, 2009). Esta información se envía a la base de datos central, donde se comprueba la información del usuario, se calcula el peaje y se efectúa el cargo.

Los transpondedores utilizados en los sistemas basados en viñetas RFID pueden ser activos o pasivos, teniendo diferentes rangos de lectura. Las viñetas activas requieren una fuente de alimentación interna, una batería que permite un rango de lectura más largo (unos 100 m) en comparación con las viñetas pasivas (Kamarulazizi, 2010). Las viñetas pasivas o pegatinas se colocan en el parabrisas del vehículo y no requieren una fuente de alimentación interna. Esto hace que sean menos costosas y complejas que las etiquetas activas, pero ofrecen un rango de lectura más corta, de unos 10 m (CETMO, 2012). Si el vehículo no está equipado con una etiqueta, el sistema de control basado en la tecnología ANPR identifica a los infractores.

2.1.5 Comunicaciones por satélite (GNSS)

La tecnología basada en la comunicación vía satélite, o sistema de peaje electrónico GNSS, emplea los datos de posición del vehículo para medir el uso de la carretera y calcular en

consecuencia el peaje. Actualmente se emplea, entre otros, en los sistemas nacionales de peaje de camiones en Alemania y Eslovaquia mediante el uso de GPS.

La tecnología satelital está formada por tres componentes diferentes: un OBU tipo GNSS, un equipo de comunicaciones de datos móviles y una oficina central. Así, se establece una comunicación bidireccional entre el OBU y una red fija de telecomunicaciones, por lo general mediante el uso de los servicios móviles comerciales, tales como la red de telefonía móvil GSM (Händel et al., 2014). Esto permite que el OBU pueda conectarse a una central, donde se recibe y procesa la información del vehículo. Para limitar la posible evasión del peaje, el sistema se complementa con un equipo de control usando tecnologías ANPR y DSRC (Jordán et al., 2003).

El OBU tipo GNSS es un complejo dispositivo que registra los movimientos del vehículo mediante la descarga de las coordenadas de ubicación, por lo general cada segundo, asociándolo a determinados tramos de carretera. Además, la oficina central maneja los datos de los clientes, tales como información de pago, datos personales del usuario, etc.

La tecnología basada en GNSS requiere la creación, el mantenimiento y la actualización continua de un mapa digital de las secciones o zonas de carreteras tarifadas, incluyendo los llamados “puntos de recarga virtuales”. Este mapa permite al sistema determinar con precisión la posición de un vehículo sin la necesidad de pórticos de peaje.

El cobro se genera cuando el vehículo pasa a través de los puntos de recarga “virtuales” y se registra automáticamente en el OBU. Posteriormente, mediante comunicación móvil se transfieren los datos del peaje a la central, donde se genera la factura. Esta tecnología de peaje electrónico también puede proporcionar otras funciones basadas en el seguimiento y servicios de valor añadido tales como funciones de navegación, servicios de respuesta de emergencia o sistemas de gestión del motor del vehículo.

2.1.6 Comunicaciones móviles

El desarrollo de las comunicaciones móviles es uno de los principales elementos de la revolución tecnológica que se está produciendo en nuestra sociedad desde el inicio del siglo XXI. Esta capacidad de transmitir datos sin necesidad de cables ni otro enlace físico también está presente en los sistemas de cobro electrónico de peajes.

A este respecto, el teléfono se puede utilizar para diferentes propósitos como el propio pago del peaje durante el viaje, la actualización de la cuenta personal del usuario, el cambio en el método de pago o la selección de una modalidad tarifaria, entre otros. Asimismo, otorga al gestor de la

infraestructura una mayor flexibilidad a la hora de instalar los puntos de peaje, ya que la infraestructura física de cobro se reduce sustancialmente en comparación con otras tecnologías.

Actualmente, el pago a través de la telefonía móvil se realiza en los puestos de peaje tradicionales, sustituyendo la tarjeta de crédito por los servicios de pago por móvil gracias a la tecnología NFC (*Near Field Communication*). Asimismo, como se aborda en el epígrafe 2.3.3, también sirve de soporte a otras tecnologías para la comunicación y traslado de los datos de pago.

2.2 Documentos normativos de la Unión Europea relativos al telepeaje

Uno de los principales objetivos de la Unión Europea es la creación de un mercado común europeo, por el que pueden circular libremente los bienes, servicios y capitales y las personas. Dicho mercado común europeo se sustenta en cuatro libertades fundamentales: la unión aduanera, es decir, la libre circulación de mercancías dentro del mercado común; la libre circulación de personas, por la que se establecen los derechos de desplazamiento, residencia, trabajo y permanencia de los ciudadanos comunitarios; la libre circulación de servicios; y la libre circulación de capitales.

A continuación, se repasa la legislación y la actuación comunitaria en relación a los sistemas de cobro electrónico de peajes.

2.2.1 Política y legislación comunitaria en materia de telepeaje

Tal y como se establece en el artículo 26.1 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (2010), la Unión adoptará las medidas destinadas a establecer el mercado interior o a garantizar su funcionamiento. Asimismo, la política de transportes forma parte de los ámbitos políticos comunes desde los Tratados de Roma de 1957. Esta política está basada en el objetivo de la apertura de los mercados del transporte y la creación de unas condiciones de competencia equitativa, eliminando los obstáculos existentes, especialmente a nivel transfronterizo. En este sentido, se puede observar que la necesidad de garantizar en un corto tiempo la interoperabilidad de los sistemas de cobro electrónico de peajes a escala comunitaria se justifica en los principios básicos de la propia Unión Europea.

El Libro Blanco ‘Hoja de ruta hacia un espacio europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible’ (Unión Europea, 2011) contiene un conjunto argumentado de propuestas de acción comunitaria en el ámbito del transporte. Dicho documento, establecido por la Comisión Europea con la participación de representantes de grupos de interés y administraciones nacionales, describe la transición de los transportes desde los antiguos a los nuevos desafíos y presenta las medidas para conseguir superarlos.

Centrando el foco en los sistemas de telepeaje, el Libro Blanco señala que deben implantarse de forma extensa herramientas de tecnología de la información para simplificar los procedimientos administrativos y optimizar la programación y flujos de tráfico. De esta forma, la política de investigación e innovación deberá apoyar cada vez más y de forma coherente el desarrollo e implantación de las tecnologías claves necesarias para hacer evolucionar el sistema de

transporte de la UE hacia un modelo más moderno, eficiente y fácil de utilizar. Lo que queda patente en todo caso es la importancia de promover la supresión de los obstáculos técnicos, administrativos y jurídicos existentes.

La “Directiva 2004/52/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras de la Comunidad”, tiene como objetivo fundamental alcanzar la interoperabilidad de los sistemas de peaje en el mercado interior y la instauración de un servicio europeo de telepeaje en el conjunto de la red comunitaria de carreteras sujetas a peaje. Además, señala en su exposición de motivos que, “la mayoría de los estados miembros que han implantado sistemas de peaje electrónico para la financiación de las infraestructuras de carreteras o para la percepción de cánones de uso de la red de carreteras [...] no son actualmente totalmente compatibles entre sí”.

Asimismo, indica que se deben suprimir las barreras artificiales que dificultan el funcionamiento del mercado interior, respetando al mismo tiempo la posibilidad de que los Estados miembros de la Unión apliquen diferentes políticas de tarificación a los diversos tipos de vehículos a nivel local, nacional o internacional. De esta forma, los diferentes equipos instalados a bordo de los vehículos deben permitir la aplicación de estas políticas de tarificación viaria. En todo caso, se deberán respetar los principios de no discriminación entre los ciudadanos de los distintos Estados miembros. Esta Directiva es aplicable a todo tipo de cánones de carretera en toda la red de carreteras comunitarias, sin importar su naturaleza.

Asimismo, dichos sistemas de telepeaje que se instalen en el territorio de los Estados miembros deben cumplir los siguientes requisitos fundamentales:

- Deben poder incorporar rápidamente las mejoras y adelantos tecnológicos de los sistemas futuros.
- Los costes de su adopción por parte de los usuarios de la carretera deben ser despreciables en comparación con los beneficios resultantes.

En línea con la definición dada por la Comisión Europea, la interoperabilidad es la habilidad de organizaciones y sistemas dispares y diversos para interactuar con objetivos consensuados y comunes y con la finalidad de obtener beneficios mutuos. Dicha interacción implica, por tanto, que las organizaciones involucradas compartan información y conocimiento a través de sus procesos de negocio, mediante el intercambio de datos entre sus respectivos sistemas de tecnología de la información y las comunicaciones. Para alcanzar el objetivo fundamental de la

interoperabilidad, se crea el Servicio Europeo de Telepeaje (SET), como complemento a los servicios nacionales de telepeaje de los diferentes Estados miembros.

En lo referente a las soluciones tecnológicas, todos los nuevos sistemas de telepeaje se basarán, a efectos de realizar las transacciones de telepeaje, en la utilización de al menos una de las tres tecnologías siguientes: localización por satélite, comunicaciones móviles según la norma GSM-GPRS y microondas a 5,8 GHz, tal y como establece artículo 2.1 Directiva 2004/52/EC. Estos sistemas de telepeaje serán aptos para funcionar con los equipos de instalación a bordo (OBU). Dichos equipos de instalación a bordo serán interoperables y capaces de comunicar con todos los sistemas que funcionan en la Unión Europea y que se basan en las tecnologías señaladas anteriormente. De este modo, se puede observar cómo se trata de alcanzar la interoperabilidad a través de limitar las posibles tecnologías de los dispositivos a bordo.

La Directiva 2004/52/EC finaliza su articulado desarrollando la creación del Servicio Europeo de Telepeaje mencionado en párrafos anteriores. Así, este servicio quedará definido mediante un conjunto de normas contractuales que permitirán a todos los operadores ofrecer el servicio, un conjunto de normas y requisitos técnicos, y un contrato de abono único entre los clientes y operadores. Es importante remarcar que este Servicio Europeo de Telepeaje será independiente de las decisiones fundamentales adoptadas por los Estados miembros en relación con la aplicación de cánones a categorías concretas de vehículos y del nivel de tarificación aplicado, o de la finalidad de la misma.

Recogido por la Directiva 2004/52/EC, el Servicio Europeo de Telepeaje y sus elementos técnicos se definen plenamente en la Decisión de la Comisión 2007/750/CE. Esta Decisión trata fundamentalmente de regular el intercambio de información entre los Estados miembros, los perceptores de peaje, los proveedores del servicio y los usuarios de la carretera con la finalidad de garantizar que las notificaciones de peajes pagaderas sean correctas.

Es necesario remarcar que, en todo caso, el Servicio Europeo de Telepeaje es un servicio complementario a los servicios de peaje electrónico nacionales o locales implantados para el cobro de un peaje. Esta Decisión también recoge que cuando los diferentes Estados miembros dispongan de sistemas de peaje, tomarán las medidas necesarias para incrementar el uso de sistemas electrónicos de peaje, procurando que al menos un 50% del tráfico que pasa por las estaciones de peaje pueda usar sistemas electrónicos. Esto es debido a que la tecnología de peaje electrónico permite la recaudación de este sin barreras físicas, lo que redundará en beneficio de la seguridad y de la disminución de la congestión.

Asimismo, la Comisión desarrolló posteriormente otros elementos del Servicio Europeo de Telepeaje. Así, la Decisión de la Comisión 2009/750/CE trata a lo largo de su articulado aspectos como los requisitos que han de cumplir los proveedores del Servicio Europeo de Telepeaje; derechos y obligaciones, tanto de los usuarios como de los proveedores; fijación de los peajes; etc. Sin embargo, el capítulo IV, de Disposiciones Técnicas, es el que presenta un mayor interés para esta investigación. En este sentido, se establece que son los Estados miembros los que se asegurarán que la prestación del Servicio Electrónico de Telepeaje a los usuarios constituya un servicio único y continuo.

La importancia que le otorga la Comisión Europea a la interoperabilidad está reflejada en el anexo IV de la Decisión. Así, se revisan la conformidad de los componentes de interoperabilidad con los requisitos establecidos por la Unión Europea, tanto en los dispositivos fijos, como los situados en cada vehículo.

El Memorando 12/649 recoge de forma concisa y completa las principales definiciones relativas al Servicio Europeo de Telepeaje, por lo que constituye un documento básico para comprender muchos conceptos de la Decisión de la Comisión anteriormente explicada.

Dado que el análisis y conocimiento por parte de la población de la legislación europea en lo referente al Sistema Europeo de Telepeaje pueden resultar complicados, la Unión Europea ha realizado esfuerzos para acercarlo al público a través de diferentes documentos como “Pricing systems for road freight transport in EU Member States and Switzerland” (Parlamento Europeo, 2008), elaborado dentro de la comisión parlamentaria de Políticas estructurales y de cohesión. Este estudio se centra en el análisis en profundidad del pago por uso y de la Directiva Euroviñeta. No obstante, también ofrece una imagen general de los diferentes sistemas de telepeaje y sus ventajas e inconvenientes.

2.2.1.1 Directiva 2019/520 relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de carretera y al intercambio transfronterizo de información

El 31 de mayo de 2017 la Comisión Europea publicó el primer paquete de movilidad denominado “Europa en Movimiento”, dentro del cual se incluyó una propuesta de Directiva relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras y por la que se facilita el intercambio transfronterizo de información sobre el impago de cánones de carretera en la Unión (Directiva de Telepeajes o EETS –*European Electronic Tolling System*). Así en 2019 se publicó la “Directiva 2019/520 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de marzo de 2019, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de carretera y por la que se facilita el

intercambio transfronterizo de información sobre el impago de cánones de carretera en la Unión”.

Esta Directiva tiene un doble objetivo. Por un lado, facilitar el uso de sistemas electrónicos de cobro de peajes que sean interoperables en la Unión, ya que la mayoría de los sistemas de los países que cuentan con sistemas de telepeaje no ofrecen interoperabilidad transfronteriza. Por otro lado, establecer un sistema de intercambio transfronterizo de información sobre los datos de los vehículos y sus titulares registrales al objeto de identificar a los “no-residentes” que incumplen la obligación de pagar los peajes de todo tipo (ya sean electrónicos o no).

Para el cumplimiento del primer objetivo la Directiva prevé una serie de medidas para garantizar la competencia leal, el libre acceso al mercado y la calidad de las empresas que proveen servicios SET europeos, tales como la creación de un registro de proveedores del Servicio Europeo de Telepeaje, certificados de conformidad, de calidad, competencia financiera, competencia técnica y buena reputación; regula los derechos y obligaciones de estos proveedores, así como de los perceptores de peajes y los usuarios de los servicios SET; y recoge la lista exhaustiva de tecnologías a través de las cuales pueden proporcionarse los servicios SET (con el objetivo de detraer su modificación futura a un eventual acto delegado), regulando, además, las pruebas dirigidas a explorar el uso de nuevas tecnologías aplicadas al cobro electrónico de peajes.

Para promover el cumplimiento del segundo punto, se incorpora la plataforma de intercambio telemático de información sobre datos de matriculación de vehículos “Eucaris”, utilizada actualmente para el intercambio de información sobre infracciones de tráfico. La infracción consiste en el impago de peajes, de manera que dicha plataforma legitima el intercambio de información sobre un vehículo matriculado en otro Estado Miembro y su titular registral cuando se ha producido dicha infracción y al objeto de investigar la responsabilidad sobre la misma y reclamar el pago. El sistema se limita al intercambio de información y no prevé ningún procedimiento de reconocimiento recíproco de las sanciones que, en su caso, se pudieran imponer. En el último mandato se ha incorporado la posibilidad de que los Estados miembro puedan facilitar los datos de titularidad de un vehículo a los perceptores de peaje para que estos reclamen el pago de los peajes impagados.

2.2.2 Otros documentos técnicos

Con una importancia menor que los anteriores, se encuentran otros documentos, como el titulado “Guide for the application of the directive on the interoperability of Electronic Road Toll System” (Consejo Europeo & Parlamento Europeo, 2011). Éste explica y clarifica alguno de los

aspectos más importantes para alcanzar la interoperabilidad de los diferentes sistemas de telepeaje, así como del desarrollo del Servicio Europeo de Telepeaje. Las principales ventajas que presentan estos documentos es que constituyen la mejor forma para introducirse en la materia y poder realizar posteriores investigaciones. Asimismo, profundiza en los conceptos más relevantes, desarrollándolos y completando lo recogido en la legislación europea.

Para continuar con la parte del estado del arte relativa a la documentación proveniente de la Unión Europea, se deben mencionar los 12 trabajos realizados por otros tantos grupos de expertos para el análisis de la Directiva 2004/52/EC. Estos documentos desarrollados por expertos en la materia, seleccionados por la Comisión Europea, constituyen una pieza fundamental para la realización de esta tesis doctoral, ya que tratan aspectos tecnológicos, técnicos y de gestión, económicos y contractuales.

En lo relativo a las diferentes tecnologías de los sistemas de telepeaje, se analizan los dispositivos mediante microondas tanto desde un punto de vista de interoperabilidad entre los sistemas de los diferentes países en el Grupo 1 (Engdahl & Hamet, 2005), como desde la interoperabilidad entre el sistema y el vehículo como hace el Grupo 11 (Tren, 2006). Es decir, se tratan los aspectos “macro” y “micro” de los dispositivos de microondas como el DSRC; mediante tecnología satelital, analizada ésta de una manera funcional en el Grupo 5 (Beier & Rodriguez, 2005) y desde un punto de vista tecnológico, especificando los principios básicos la normativa de calidad, tal y como realiza el Grupo 9 (Catling & Hamet, 2006). Por último, el sistema DSRC es abordado por el Grupo 8 (Engdahl, Trans, & Hamet, 2005).

Estos grupos de expertos tratan, asimismo, diferentes aspectos técnicos y de gestión de los sistemas de telepeaje como son: los parámetros que deben recoger necesariamente los dispositivos a bordo de los vehículos, realizado por el Grupo 2 (Perrett, 2005); las labores y procedimientos de vigilancia y control de peajes desde el punto de vista de la legislación comunitaria y de los Estados miembros, analizado por el Grupo 3 (Mesqui & Hamet, 2005) y desde el ámbito tecnológico y funcional, tal y como estudió el Grupo 10 (Pecegueiro, 2006); la certificación de calidad que deben tener los equipos a emplear, según el Grupo 4 (Expert Group 4, 2005); estudios relativos a la integración de los dispositivos a bordo en los vehículos, realizado por el Grupo 6 (Hollingsworth, 2005); y aspectos de seguridad, analizado por el Grupo 12 (Eisses & Hamet, 2007).

En cuanto a los aspectos financieros y contractuales, básicos para la realización y consecución de un sistema europeo de telepeaje eficaz y operativo, son analizados por el Grupo 7 (Philipp, 2006).

Para finalizar este epígrafe dedicado a la documentación europea, es preciso mencionar otros estudios y actos legislativos que pueden afectar, siempre desde un punto de vista tangencial, al Servicio Europeo de Telepeaje. Entre ellos, destacan:

- Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007, por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (Inspire).
- Plan de acción para el despliegue de sistemas de transporte inteligentes (ITS por sus siglas en inglés) de 2008.
- Directiva 2010/40/UE del Parlamento europeo y del Consejo, de 7 de julio de 2010, por la que se establece el marco para la implantación de los sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte.
- Estrategia europea sobre los sistemas de transporte inteligente cooperativos, un hito hacia la movilidad cooperativa, conectada y automatizada de 2016. Se trata de una comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones.
- Propuesta de Acto Delegado C-ITS en el seno de la Directiva 2010/40/UE para asegurar las comunicaciones entre vehículo e infraestructura.

2.3 Experiencias nacionales

En los últimos años, diferentes países, especialmente europeos, han introducido en su red de carreteras distintos sistemas de tarificación basados en el principio de pago por uso. Las tecnologías de telepeaje empleadas difieren según los diferentes países, aunque los principales son: DSRC (Austria, República Checa, Polonia, Eslovenia, Hungría, Portugal, Francia, España o Chile), RFID (Estados Unidos de América), GNSS (Alemania y Eslovaquia) y tacógrafo (Suiza). Asimismo, se emplean otros sistemas auxiliares para las labores de vigilancia, como puede ser la lectura automática de matrículas a través de videocámaras (ANPR).

Cada uno de estos países se caracteriza por tener un sistema de telepeaje propio con características diferentes y algunas comunes a varios de ellos. Por esta razón, es preciso analizar los casos más relevantes por separado para mostrar en detalle el estado de la práctica sobre la materia.

Figura 3. Países europeos con sistemas de pago por uso en toda o parte de su red de alta capacidad para determinados vehículos

Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 3, la gran mayoría de los estados europeos que aplican la tarificación en su red de alta capacidad a determinados vehículos, generalmente los de mercancías, se sitúan en el centro de Europa. Esto es debido a que son los que sufren los mayores niveles de congestión y de uso de sus carreteras por parte de vehículos de terceros países. De esta forma, se busca aumentar los recursos para el mantenimiento y conservación de

las redes de carreteras. En cambio, los países periféricos, salvo Portugal, no lo han introducido debido a que el tráfico de vehículos extranjeros es menor y para no dañar la competitividad de sus exportaciones (Vassallo et al., 2017). Tal y como se comenta en el apartado 4.3.11, Francia constituye un caso singular ya que, debido a un gran rechazo social por parte de diversos colectivos, la implantación de la Euroviñeta fue suspendida.

2.3.1 Suiza

El sistema de pago por uso de infraestructura se introdujo en Suiza en 1985 con la finalidad de la protección del medio ambiente, la transferencia del tráfico de mercancías hacia el ferrocarril y obtener nuevas fuentes de ingresos para infraestructuras. El modelo suizo consiste en una tarificación modulable que varía según la distancia recorrida, la carga del vehículo y la categoría de emisiones del vehículo. Respecto a la red tarificada, en el caso de Suiza, ésta se compone de **toda la red de carreteras del país, con un total de 71.000 km** (Rapp & Balmer, 2004).

En cuanto a la tecnología de cobro empleada, ésta se basa en la utilización de un transpondedor denominado OBU ("On-Board Unit"), instalado en el interior del vehículo y conectado de manera permanente a un **tacógrafo**. El OBU dispone de un chip de almacenamiento de datos en el cual se registran las principales características del vehículo, que posteriormente determinan el valor de la tarifa. Asimismo, el transpondedor cuenta con sendas antenas GPS y DSRC de comunicación para labores de vigilancia.

De esta forma, el usuario debe darse de alta en el sistema, para lo cual se le facilita gratuitamente un OBU que debe asociarse a una cuenta bancaria. Mensualmente, cada usuario debe enviar los datos de la lectura de su OBU al Sistema Central de Información de la Federal Custom Administration (FCA) (FCA & Switzerland, 2013), bien a través de internet o mediante correo ordinario en una tarjeta, lo que supone una tarea extra para el usuario. La administración pública suiza realiza, a partir de las lecturas enviadas por los conductores, los cálculos y comprobaciones necesarias para cobrar a los usuarios.

Gracias al sistema GPS instalado en cada OBU y una serie de pórticos de vigilancia (*enforcement*) con tecnología DSRC, la administración pública suiza puede verificar la autenticidad de los datos que le han sido remitidos, así como comprobar si el transpondedor ha sido manipulado indebidamente. El sistema cuenta, además, con una serie de pórticos fronterizos (ver Figura 4) que, mediante tecnología DSRC, permiten activar y desactivar el OBU cuando el vehículo accede o abandona el país. De esta forma, se consigue que el OBU contabilice únicamente los kilómetros recorridos en el territorio suizo, y sea éste el valor sobre el que se aplique la tarificación.

De este modo, el sistema suizo permite comparar entre sí los datos enviados por el usuario, los recibidos mediante DSRC por los pódicos y los captados a través de GPS. Por ello, se trata de un modelo muy eficaz, con evasiones en el pago inferiores al 1% (Balmer, 2006), cifras alcanzadas también gracias a la idiosincrasia suiza. La importancia de la vigilancia en el sistema suizo se puede explicar por dos razones fundamentales: la primera es el alto grado de circulación de vehículos extranjeros, más propensos al fraude que los nacionales, por el desconocimiento de la norma o por ahorro del peaje; y la segunda es por el papel activo que debe tener el conductor a la hora de repetir los datos del tacógrafo a las administraciones.

Figura 4. Esquema del control fronterizo del sistema de peaje electrónico de Suiza

Fuente: “The Distance-related Heavy Vehicle Fee (HVF) in Switzerland” (Matthias H. Rapp, 2004).

2.3.2 Austria

En Austria existe un modelo de tarificación modulable para los vehículos pesados, cuyo objetivo básico es la obtención de financiación para la construcción, mantenimiento y operación de la red de carreteras. El modelo de pago por uso de Austria diferencia entre vehículos ligeros y pesados. A los primeros se les aplica un sistema de viñeta en función del período de validez y del tipo de vehículo. A los segundos, un sistema Euroviñeta cuya tarificación depende del número de ejes del vehículo, la distancia recorrida y los niveles de emisión. La red tarificada

corresponde al conjunto de **autopistas y vías rápidas, aproximadamente 2.200 km** (Engdahl & Sieber, 2004).

La tecnología de cobro en el sistema austríaco se basa en el sistema **DSRC**, de comunicación de corto alcance. De esta forma, el usuario lleva instalado en su vehículo un dispositivo, OBU, denominado GO-Box, asociado a una cuenta bancaria, y en el que se encuentran los principales datos del vehículo. Este aparato puede comunicarse, mediante tecnología DSRC, con los más de 800 pódicos que hay instalados en las carreteras austríacas (Schwarz-Herda, 2013). El sistema de pódicos está dotado de unas antenas que reconocen el vehículo y, automáticamente, descuentan el importe correspondiente al tramo en cuestión (Toll Collection, 2012).

Las labores de vigilancia se realizan a través de medios humanos (policía) y automáticos. De mayor interés para esta tesis doctoral, el *enforcement* automático se compone de varios instrumentos. En primer lugar, un importante número de pódicos DSRC (más de 100) están dotados de cámaras digitales de vigilancia. Con ellos pueden comprobarse los pagos realizados y realizar sucesivas verificaciones de la autenticidad de los datos declarados del vehículo. Complementariamente, el sistema austríaco cuenta con más de 30 estaciones portátiles de control y puestos de barreras en tramos especiales que permiten comprobar a distancia el estado del OBU.

2.3.3 Alemania

Alemania es la principal potencia económica, industrial y demográfica de la Unión Europea. Esta realidad hace que el transporte de mercancías por carretera sea un elemento fundamental para encauzar las exportaciones e importaciones alemanas. Éste es el principal motivo por el que el gobierno alemán decidió implantar en 2005 el modelo de pago por uso para los vehículos pesados. Alemania emplea un sistema de tarificación modulable por el que las tarifas quedan determinadas por el número de ejes del vehículo, la distancia recorrida y la categoría de emisiones del vehículo. La red tarifada, de aproximadamente **12.500 km, está formada por las autopistas federales**.

La tecnología de cobro empleada fue la primera en **combinar la técnica de localización mediante satélites (GNSS) y la tecnología de telefonía móvil**. Al igual que sucede en otras tecnologías, el cobro se realiza automáticamente a través de un equipo instalado en el vehículo (OBU), en el cual se guardan los datos básicos del vehículo para fijar el valor del peaje. Una vez registrado en el sistema, cualquier usuario puede solicitar su instalación en el vehículo. A través de las señales de satélite GPS y de otros sensores de localización, el OBU reconoce los tramos

con peaje obligatorio recorridos y calcula el importe que debe realizarse. Las informaciones relativas al peaje se envían al centro de cálculos de Toll Collect, el consorcio encargado del sistema de telepeaje alemán, de forma codificada por telefonía móvil (GSM), y posteriormente se formaliza la factura. Así, la transparencia queda garantizada, puesto que todo usuario inscrito puede verificar los peajes que se le han cobrado al conductor.

El cumplimiento de la obligación de pago del peaje se controla de tres formas distintas: controles automáticos, controles fijos y controles móviles. Los controles automáticos se realizan mediante cerca de 300 pórticos de *enforcement* instalados a lo largo de la red de pago. Estos pórticos verifican si los vehículos sujetos al pago del peaje han sido registrados correctamente en el sistema, además de comprobar si el OBU está instalado y encendido. Mediante los controles fijos y móviles, los vehículos sospechosos se desvían y detienen por parte de los empleados de la Oficina Federal de Transporte de Mercancías.

2.3.4 República Checa

Tras su entrada en la UE en 2004, la República Checa decidió introducir un modelo de pago por uso para revertir el pésimo estado de conservación de sus carreteras tras el período soviético. En primer lugar, fue un sistema de viñeta, para pasar en 2008 a un sistema de tarifa modulable. En la actualidad persisten ambos modelos; el primero para los vehículos ligeros y el segundo para los vehículos pesados. La tarificación distingue entre vehículos de mercancías y autobuses, estableciendo una tarifa en función de cuatro criterios: número de ejes, distancia recorrida, categoría EURO de emisiones y tipo de vía. La red tarificada actualmente en la República Checa comprende un total de **1.500 km, pertenecientes a autopistas, vías rápidas y carreteras de primera clase** (Rdw, 2012).

La operación del sistema de telepeaje en la República Checa se basa en la tecnología **DSRC** y en dispositivos OBU, que incorporan los datos básicos del vehículo y del usuario. Con la elección de la tecnología de cobro en la República Checa se pretendía aprovechar el sistema de tarificación existente, basado en pórticos DSRC, y combinarlo con un nuevo modelo basado en la tecnología vía satélite, cuyo alcance posibilita una mayor flexibilidad y la tarificación de las carreteras secundarias y locales (Kapsch, 2013).

Las labores para controlar el cobro son ejercidas en primer lugar por diversos pórticos fijos, que se comunican con el vehículo a través del OBU. Adicionalmente existen estaciones de *enforcement* portátiles, que comprueban si los vehículos tienen el OBU instalado y verifican, asimismo, el correcto pago de los peajes.

2.3.5 Eslovaquia

La red de carreteras de Eslovaquia, al igual que otros países como Alemania o la República Checa, se caracteriza por servir de paso para el tráfico internacional europeo. Por esta razón, y para mantener en un correcto estado de conservación las carreteras, el gobierno eslovaco decidió introducir en 2010 el modelo de pago por uso. Así, se aplica el sistema de viñeta para vehículos ligeros, en función del período de validez, y un sistema de tarificación modulable para los vehículos pesados. Dicha tarificación modulable depende de los siguientes factores: tipo de vehículo, peso máximo autorizado y número de ejes, distancia recorrida, categoría EURO de emisiones y tipo de vía. La red tarificada en Eslovaquia comprende un total de **634 km de autopistas y autovías, y 1.390 km de carreteras de primera categoría** (Zabic, 2011).

La tecnología de cobro se basa en el posicionamiento satelital de los vehículos **vía GPS-GSM**. Su funcionamiento es muy similar a la tecnología empleada en Alemania. Los vehículos deben registrarse previamente en el sistema e instalar un dispositivo OBU, con todos los datos necesarios para fijar la tarifa aplicable. El sistema GPS determina la posición del vehículo y registra los tramos recorridos. La tecnología GSM/GPRS permite la comunicación por redes móviles y facilita la transmisión de datos entre el OBU y otros subsistemas de información del sistema de peaje. Finalmente, la tecnología microondas DSRC se emplea en tareas de control del cobro o *enforcement*, junto con la acción de la policía, lográndose cifras en la eficacia de la recaudación del 98,9% (CETMO, 2012).

2.3.6 Polonia

El sistema polaco de tarificación modulable entró en vigor en 2011 con el objetivo de financiar la red de carreteras. El modelo de pago por uso en Polonia se aplica a todos los vehículos de mercancías y autobuses. Esta tarificación modulable se establece en base a cuatro criterios: peso máximo admisible, distancia recorrida, categoría EURO de emisiones y tipo de vía. La longitud de la red tarificada en Polonia ha sufrido diversas modificaciones desde la implantación del sistema, pasando de 1.565 km en 2011 a **más de 7.112 km en 2018**, de los cuales 3.422 son autopistas (Główny Urząd Statystyczny Statistics, 2017).

La tecnología de cobro se basa en un **sistema free flow de tipo DSRC**, similar a los ya mencionados en países como Austria o República Checa (Nowacki et al., 2011). El dispositivo a bordo admite diferentes modalidades de pago y presenta unos grandes niveles de precisión, superiores al 99,9%. Es importante señalar que estos dispositivos no son interoperables con otros sistemas de peaje similares, como los de República Checa o Austria.

Las labores para controlar el cobro son ejercidas en primer lugar por los pórticos fijos, que activan lectores y cámaras de vigilancia al detectar el paso del vehículo, con el fin de reconocer de forma automática la matrícula. Existen, además, diversas unidades móviles equipadas para chequear el correcto funcionamiento del OBU.

2.3.7 Eslovenia

La modalidad de sistema de pago por uso en Eslovenia proviene de los años 70, momento en el que se abrieron a la circulación las dos primeras autopistas del país. Actualmente, tras el ingreso del país en la UE en 2004, Eslovenia ha adoptado la Directiva Euroviñeta, pasando a cobrar por circular por sus **465 km de autopistas** (Prah, 2012). El modelo de peaje se aplica a todos los vehículos, tanto ligeros como pesados, y tiene por finalidad la financiación de las carreteras del país, así como limitar el tránsito de transporte de mercancías por sus vías, dada su situación central dentro de la UE. La tarificación modulable se establece en función del tipo de vehículo y de la distancia recorrida.

La tecnología de cobro se basa en el sistema **DSRC**, controlado a partir de 26 pórticos repartidos por la red de peaje. El pago se puede realizar antes o después del viaje mediante un sistema de OBU con domiciliación bancaria, similar al de los países de su entorno. Esta tecnología presenta en Eslovenia una fiabilidad del 99%.

En cuanto a los sistemas de vigilancia y lucha contra el fraude, *Dars*, la compañía pública encargada de la gestión de las autopistas, cuenta con pórticos equipados con cámaras de vigilancia que comprueban el pago del vehículo a partir de la lectura de su matrícula. Asimismo, existen varios puntos de control con barreras físicas. De esta forma se ha conseguido que la evasión del pago se reduzca a menos del 1%.

2.3.8 Hungría

En Hungría existe un modelo de gestión y explotación de carreteras que presenta la modalidad de pago por uso en sus **más de 6.500 km de autopistas, carreteras y rutas principales**. Estos peajes se aplican a todos los vehículos, pesados y ligeros, y su cuantía depende de la distancia recorrida, el tipo de vía y la categoría EURO del vehículo. Al igual que en otros países centroeuropeos de su entorno, la política de pago por uso implantada en Hungría busca la financiación de su red de infraestructuras, desarrollada, fundamentalmente, en la última década.

La tecnología empleada por la Empresa Pública de Carreteras de Hungría para el cobro de los peajes es el **sistema DSRC**, a través de centenares de pórticos repartidos por el país. En lo referente a la vigilancia en el control del cobro, la red húngara cuenta con 74 pórticos fijos en las principales autopistas, así como con 100 vehículos de control móvil y la labor policial.

2.3.9 Portugal

Portugal presenta una serie de particularidades que hacen que su caso sea singular. En primer lugar, se trata de un país periférico y no centroeuropeo, al contrario que los anteriormente expuestos, por lo que no se ve perjudicado por la excesiva circulación de vehículos extranjeros que pudiesen producir congestión o deterioro de la infraestructura en determinados tramos de la red. En segundo lugar, la introducción de sistemas de telepeaje se produce para aumentar la recaudación del Estado ante los problemas económicos que sufre el país y no para aumentar o mejorar la red de carreteras. En tercer lugar, el sistema de telepeaje convive, en una parte sustancial de la red de autopistas, con el sistema tradicional de peaje con barreras y pago manual (Sistema de Identificação Electrónica de Veículos, 2010).

De este modo, Portugal cuenta con una red de carreteras de peaje de, aproximadamente, **2.500 km (autopistas de la Red Nacional Fundamental)**, siendo más de la mitad exclusivamente de telepeaje (Amorim et al., 2014). El sistema de cobro electrónico elegido es el **DSRC**, controlado a través de pórticos colocados a lo largo de la red de carreteras. Como medio complementario, el sistema portugués emplea el sistema ANPR para controlar la matrícula del vehículo. El precio del peaje se obtiene a partir de la clase de vehículo y la distancia recorrida, aunque existen modalidades de pago en forma de tarifa plana para usuarios frecuentes.

Según Infraestructuras de Portugal (2019), la empresa pública encargada de la gestión de la red ferroviaria y vial de Portugal, existen diferentes formas de abonar el peaje a través de medios electrónicos:

- *Easytoll*: solución de pago automático de peajes electrónicos con la asociación de una tarjeta bancaria (Mastercard, Visa y Maestro) a la matrícula del coche. El conductor, sin tener que salir del coche, introduce la tarjeta bancaria en el terminal de pago y el sistema asocia automáticamente la matrícula del vehículo a la tarjeta bancaria. Los peajes debidos son debitados en la cuenta asociada a la tarjeta.
- *Tollservice*: Título de precarga válido para efectuar un número ilimitado de viajes durante tres días o un determinado viaje de ida y vuelta.

- *Tollcard*: Se trata de un producto prepago, activado por un SMS y con un valor fijo a consumir en función de la circulación. Esta solución permite el pago en metálico o con tarjeta bancaria, es válido durante 1 año y su saldo puede ser consultado en internet. Tras la adquisición de la tarjeta, el conductor debe proceder a la activación de la misma a través del envío de un SMS por teléfono móvil o con el código impreso en la tarjeta y la matrícula del coche, para que la misma sea asociada a la matrícula del vehículo.
- *Vía-T*: Los dispositivos VIA-T son válidos para pagar los peajes portugueses tradicionales, a diferencia de los anteriores, y también los peajes electrónicos implantados en las autopistas con cobro exclusivamente electrónico. Este sistema es igualmente válido para la red española de autopistas de peaje (para más información ver epígrafe 2.3.10).
- Dispositivo temporal *Vía Verde*: Los peajes se cargan automáticamente a la cuenta bancaria del usuario en función de la distancia recorrida. Al igual que en el caso anterior, los dispositivos son válidos en toda la red nacional de autopistas, tanto en las autopistas con cobro exclusivamente electrónico como en los carriles *Vía Verde* en los peajes tradicionales.

El cumplimiento de la obligación de pago del peaje se controla a través de dos formas: mediante video vigilancia y mediante patrullas de la Guardia Nacional Republicana, el equivalente en ese país a la Guardia Civil española.

2.3.10 España

Actualmente, España tiene una de las redes viales de alta capacidad más extensas de Europa, con un total de 17.163 km (Ministerio de Fomento, 2018). La introducción de concesiones de autopistas de peaje comenzó en España a finales de los años 60 con el objetivo de desarrollar proyectos viales en un período en el que los recursos presupuestarios públicos eran escasos (Matas et al., 2012). Actualmente, **la red de alta capacidad de peaje directo abarca 3.039 km**, 17,7% del total de la red de alta capacidad.

Una de las principales características de la red de peaje española es que ha sido pionero en el establecimiento de un acuerdo nacional entre las empresas concesionarias de las autopistas de peaje para permitir un sistema de peaje electrónico nacional y totalmente interoperable. Este sistema se denomina “Vía-T”. De esta forma, se obtienen economías de escala y una mejor operación de las redes de autopistas. Además, es importante señalar que el sistema “Vía-T”, basado en la **tecnología DSRC**, permite la interoperabilidad total con el sistema de cobro

electrónico de peajes de Portugal y en determinadas vías de conexión fronteriza con Francia, a través del País Vasco.

La red de peaje española actual comprende dos tipos diferentes de carreteras: túneles y tramos de carreteras interurbanas. Los primeros aplican un peaje fijo para cruzarlos, como los túneles de Artxanda. Los segundos, que representan el 99,6% de los kilómetros totales, tienen precios unitarios más bajos. Las tarifas de peaje son bastante homogéneas en todo el país, aunque cada autopista tiene su propia estructura de tarifas (el Gobierno limita los peajes máximos) y los peajes son más caros en general en los meses de verano. Además, el valor de la tarifa varía según el tipo de vehículo: la tarifa de peaje media para vehículos ligeros es de 0,11 €/km, y las tarifas para vehículos pesados oscilan entre 0,16 y 0,21 €/km según el Informe 2017 sobre el sector de autopistas de peaje en España del Ministerio de Fomento (2019). Además, los peajes apenas varían durante el día, ya que los esquemas con tarifas más altas en las horas punta solo se aplican en algunas carreteras del área metropolitana de Madrid. En particular, estas carreteras de peaje tienen volúmenes moderados de tráfico y compiten con carreteras de alta capacidad sin peaje dentro de los mismos corredores, por lo que este esquema apunta a aumentar el peaje cuando la alternativa no tarifada se congestiona y, por consiguiente, la carretera de peaje se convierte en una opción más atractiva.

Para intentar paliar esta situación, y tras la resolución del contrato de concesión por declaración de concurso de diferentes autopistas de peaje españolas, el Consejo de Ministros ha aprobado las tarifas para 2019 a las autopistas de peaje que gestiona la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre. Estas tarifas son de aplicación, desde el 15 de enero de 2019, a las autopistas R-3/R-5; R-2; R-4, M-12, tramos de la AP-7, AP-36 y AP-41. En estas nuevas tarifas se ha fijado una rebaja generalizada que, de media, es del entorno al 30%. Asimismo, se han aprobado rebajas específicas a los usuarios frecuentes que empleen sistemas de pago electrónico, a la vez que dichas autopistas serán gratuitas en los periodos nocturnos de 00:00 a 06:00 horas (Ministerio de Fomento, 2019).

Según la legislación española, los peajes se definen como un pago por el paso por una carretera, un túnel o por un puente. Este pago se puede hacer en efectivo, con tarjeta de crédito o electrónicamente utilizando dispositivos de telepeaje. En las últimas décadas, España se ha convertido en una de las naciones más activas en la introducción de sistemas de peaje electrónico, a través del llamado sistema “Vía-T”, que se basa en la tecnología DSRC. Su introducción en 2003 supuso un hito importante, ya que permitió la interoperabilidad entre

todos los concesionarios de peaje existentes, cuyos sistemas anteriores no eran compatibles entre sí. Posteriormente, España también logró la interoperabilidad técnica con sus dos países vecinos, Francia y Portugal, utilizando también la tecnología DSRC. La adopción de estándares comunes permite que los OBU españoles se utilicen en diferentes autopistas francesas. Recíprocamente, los OBU franceses también pueden emplearse en el País Vasco. Otros acuerdos han extendido el alcance de los OBU españoles a toda la red de autopistas portuguesas.

Actualmente, España no ha aplicado la Directiva Euroviñeta a su red de alta capacidad no tarifada, siendo sufragada su construcción y conservación a través de los Presupuestos Generales del Estado. Sin embargo, sí hay tramos bajo el sistema de peaje en sombra. En este caso, no hay pago directo del usuario, por lo que no es necesario que los usuarios lleven un dispositivo de pago a bordo, aunque sí hay infraestructura instalada en la carretera para el cálculo de las intensidades medias diarias. Así, el pago del peaje se realiza generalmente mediante un pago, anual o fraccionado, a nivel estatal desde el erario público, tras un cálculo previo de la intensidad media diaria de tráfico (IMD), directamente a la empresa concesionaria.

2.3.11 Francia

En Francia el desarrollo de la red de autopistas, *autoroutes* en francés, comenzó en 1970 con el tramo Lille-París-Lyon-Marsella. Actualmente, la red francesa de alta capacidad cuenta con 1550 km, donde **9.158 km son de peaje directo** (Union Rutière de France, 2018).

Como se puede observar, más del 60% de la red francesa de alta capacidad está sujeta al pago de peaje directo por parte del usuario. El sistema de pago electrónico de peajes francés se denomina “Liber-T” y está gestionado por la sociedad de empresas concesionarias de autopistas de peaje francesas. De esta forma, se observa que Francia ha alcanzado la interoperabilidad técnica y comercial a escala nacional en sus autopistas de peaje. El modelo francés es similar al español visto en el epígrafe anterior, ya que emplea la tecnología **DSRC** en puestos de peaje con barrera, conviviendo con el sistema manual de pago en efectivo. Como se mencionaba anteriormente, existe interoperabilidad transfronteriza con España en las autopistas que enlazan con España en la zona del País Vasco.

Como se puede observar en la Figura 3, Francia es uno de los pocos países centroeuropeos que no ha implantado la Euroviñeta en su red de carreteras. Sin embargo, en diferentes ocasiones el gobierno francés ha intentado establecer la imposición de la “ecotasa”, nombre que recibe el Francia el pago por uso, a los camiones tanto nacionales como extranjeros que transiten por sus vías. Finalmente, después de los sucesivos aplazamientos llevados a cabo en 2013 y 2014, en

2015 se produjo su suspensión definitiva tras las movilizaciones llevadas a cabo por los transportistas y agricultores franceses.

2.3.12 Estados Unidos

Actualmente, los sistemas de telepeaje se utilizan en la mayoría de las redes de autopistas de todo el mundo. En los Estados Unidos, muchos operadores de autopistas de peaje han utilizado con éxito los Sistemas Inteligentes de Transporte para administrar la planificación, el diseño, la operación, la gestión y el financiamiento de las instalaciones viales (Chin-ping et al., 2016), donde los sistemas de ETC desempeñan un papel clave. Cerca del 80% de los vehículos en los Estados Unidos tienen estos dispositivos, y algunos estados planean hacerlos obligatorios (Abari et al., 2015).

Figura 5. Mapa con los Estados que emplean el sistema "EZ-Pass"

Fuente: EZ-Pass (2018)

Así, se han alcanzado diferentes acuerdos interestatales para aumentar el uso de los sistemas de peaje electrónico, como el “EZ-Pass”, “SunPass”, “Peach Pass” y “NC Quick Pass”, que permiten a los conductores moverse por las carreteras de peaje en numerosos estados de la costa este mediante el uso de un solo transpondedor electrónico. Por ejemplo, EZ-Pass es una tecnología de cobro de peaje utilizada en 14 estados del este de los Estados Unidos, que permite gestionar la demanda de tráfico y reducir la congestión a través de diferentes acciones, como los planes de descuento.

2.3.13 Chile

Chile es, desde la década de los 1990, un referente a escala mundial en sistemas de peaje. Así, con el Programa de Concesiones Viales Urbanas se desarrolló, entre otras actuaciones, una red de vías de alta capacidad en la zona metropolitana de Santiago con una inversión cercana a los US\$ 1.300 millones, mediante la construcción y explotación de cuatro vías exprés urbanas: Sistema Oriente-Poniente (coloquialmente conocido como Costanera Norte); Sistema Norte-Sur; Américo Vespucio Sur; y Américo Vespucio Norte.

Figura 6. Mapa del sistema de autopistas de peaje urbanas de Santiago de Chile

Fuente: Instituto Geográfico Militar de Chile (2019).

Entre 1994 y 1997 se procedió al diseño del sistema troncal de autopistas urbanas de la ciudad de Santiago, aprovechando mayormente los terrenos que en su momento habían sido reservados en el Plan Regulador de 1960 con idea de que las autopistas de mayor importancia entraran en servicio al comienzo del nuevo milenio (Ministerios de Obras Públicas Transportes y Telecomunicaciones, 2003).

Se decidió desde el principio que el sistema de pago fuera un DSRC *free-flow*, y en consecuencia no hubiera barreras para acceder a las autopistas. Los vehículos que las usasen deberían disponer de un “tag” habilitado, o bien adquirir con anticipación un pase diario. Desde un principio se impuso como requisito que todas las autopistas tuvieran interoperabilidad técnica en el sistema de telepeaje. Así, la interoperabilidad ha sido uno de los principales hitos del sistema de autopistas urbanas en Santiago. Este sistema lleva en funcionamiento aproximadamente quince años, lo que constituye un período de tiempo razonable para detectar los principales retos en el ámbito del *enforcement* y de la interoperabilidad.

A modo de recapitulación, la Tabla 1 incluye las principales características de las experiencias nacionales analizadas en la presente tesis doctoral.

Tabla 1. Resumen de las principales características de las experiencias nacionales en el ámbito del telepeaje

País - (Año de implantación)	Vehículo tarificado	Parámetros de la tarifa	Red tarifada	Tecnología de cobro
Suiza (2001)	Todos	Distancia recorrida Peso máximo Categoría EURO	71.000 km (toda la red del país)	Tacógrafo
Austria (2004)	Todos	Distancia recorrida Tipo vehículo Categoría EURO	2.180 km (autopistas)	DSRC
Alemania (2005)	> 12 t	Distancia recorrida Tipo vehículo Categoría EURO	12.500 km (principalmente autopistas)	GNSS + Móvil
República Checa (2007)	Todos	Distancia recorrida Nº de ejes Categoría EURO Tipo de vía	1.442 km (autopistas, vías rápidas y carreteras principales)	DSRC
Eslovenia (2008)	Todos	Tipo de vehículo Distancia recorrida	465 km (autopistas)	DSRC
Eslovaquia (2010)	Todos	Distancia recorrida Peso y nº de ejes Categoría EURO Tipo de vía	2.024 km (autopistas y carreteras principales)	GNSS + Móvil
Polonia (2010)	> 3,5 t	Distancia recorrida Peso máximo Categoría EURO Tipo de vía	2.653 km (autopistas, vías rápidas y carreteras principales)	DSRC
Portugal (2012)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo (Existencia de tarifas planas)	2.512 km (autopistas)	DSRC y ANPR
Hungría (2013)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo Categoría EURO	6.500 km (autopistas, carreteras y rutas principales)	DSRC
España*	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo	3.039 km (autopistas)	DSRC
Francia*	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo	9.137 km (autopistas)	DSRC
Chile (2001)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo	182 km (AP urbanas) 3.197 km (autopistas)	DSRC y ANPR

Elaboración propia

* No han introducido la Directiva Euroviñeta.

**Estados Unidos no ha sido incluida en la tabla debido a que cada Estado presenta características diferentes a la hora de tarificar sus carreteras.

2.4 Literatura científica

2.4.1 Tecnologías de telepeaje

Tras el análisis de la normativa y de las experiencias nacionales más significativas en el ámbito de los sistemas de telepeaje, la revisión de la literatura científica permite ampliar enormemente el espectro de la investigación, ya que introduce en el estudio nuevos aspectos como la obsolescencia, privacidad, tecnologías emergentes, etc. Sin embargo, es importante remarcar que en la literatura científica no existen artículos o trabajos que reúnan y analicen cada uno de los sistemas de cobro electrónico de peajes y ofrezcan soluciones para mejorar su interoperabilidad a escala europea.

De forma general, se puede señalar que la aproximación a los sistemas electrónicos de peaje que realiza la literatura es bien desde los Sistemas Inteligentes de Transporte, bien desde el punto de vista de la física y la electrónica analizando el funcionamiento de los dispositivos. Además, desde hace poco tiempo, también se aborda desde una visión más amplia a través de la *Mobility as a Service* (MaaS). Todas estas aproximaciones son igualmente válidas para la finalidad que se pretende con la presente investigación, por lo que se pasan a desarrollar a continuación.

Prud'homme & Bocarejo (2005) centraron sus estudios en el reconocimiento automático de matrícula (ANPR), una tecnología ampliamente empleada en numerosos peajes urbanos, como Londres, Estocolmo y Milán, así como en carreteras periurbanas en América, como en la ETR407 en Toronto. Sin embargo, su principal uso, especialmente en Europa, es la de complementar a otras tecnologías en lo referente a las labores de vigilancia y control de los pagos en determinados puntos de la red. Su funcionamiento se basa en la grabación de las matrículas y su posterior reconocimiento para así efectuar el cobro a los usuarios.

Lee et al. (2008) señalaron que el sistema DSRC se basa en la transmisión de datos, a través de microondas, entre un dispositivo a bordo del vehículo y el equipamiento de la carretera, generalmente en pódicos. Se trata de la tecnología más empleada en Europa y gran parte del mundo para el cobro electrónico de peajes. La tecnología DSRC puede ser empleada en exclusiva, *multi-lane free flow* (MLFF), o de forma conjunta con playas de peaje tradicionales con barreras. El sistema DSRC es especialmente indicado en aquellas redes con altas intensidades de tráfico y pocos enlaces (Yang et al., 2012).

Diversos autores, como Du & Chen, (2011), Feng et al., (2010) o Ren & Gao, (2009), han sentenciado que la identificación por radiofrecuencia (RFID) hace referencia a todas aquellas tecnologías que usan ondas de radio para la identificación de los vehículos. Su uso se circunscribe prácticamente a EEUU y China. Una de las principales diferencias con el DSRC, además de su fundamento teórico, es que los dispositivos a bordo de los vehículos pueden ser activos o pasivos, y que, en general, su precisión es menor.

Lu et al. (2010) señalan que las tecnologías vía satélite se basan en el conocimiento en todo momento de la posición del vehículo para, de esta forma, medir el uso de la carretera y calcular el peaje a pagar. Este sistema se utiliza en numerosos países europeos y desde hace más de una década ha venido recibiendo el respaldo de las autoridades comunitarias, ligando su desarrollo al del sistema Galileo (Jordán et al., 2003). A pesar de que actualmente la precisión de este sistema es menor que la de otros, como el DSRC (Numrich, Ruja, & Voß, 2013), el desarrollo completo del sistema de satélites europeo Galileo permitirá aumentar su calidad. A este respecto es importante señalar que el programa europeo de radionavegación y posicionamiento por satélite desarrollado por la Unión Europea –Sistema Galileo– debía haber entrado en fase de explotación comercial en 2010, pero debido a problemas técnicos y económicos se estima que no lo hará hasta 2020 (European GNSS Agency, 2018).

Balmer (2006), que estudió el tacógrafo como tecnología de cobro electrónico de peajes, señaló que éste se emplea únicamente en Suiza, país en el que toda su red de carreteras está sujeta a tarificación y, por tanto, con medir la distancia recorrida se puede calcular la tarifa.

Desde el éxito comercial de las comunicaciones vía telefonía móvil, éstas están jugando un papel cada vez más destacado en diferentes ámbitos del transporte, incluido el telepeaje (Händel et al., 2014). A pesar de que se trata de una tecnología todavía con capacidad de un mayor desarrollo, las aplicaciones móviles pueden conseguir la interoperabilidad entre diferentes operadores y mayor flexibilidad a la hora de pagar el peaje, reduciendo los costes de operación (Burden & Nijhuis, 2012). Sin embargo, presenta importantes problemas que deben ser superados como la duración de las baterías, la responsabilidad del usuario de mantener el teléfono operativo en todo momento o la privacidad de los datos.

En el ámbito de la comunicación móvil, la tecnología 5G jugará un papel fundamental a corto y medio plazo. En este sentido, la reducción de las latencias y la mayor calidad y velocidad en la transmisión de la información permitirá la introducción de un mayor número de servicios en los vehículos, entre ellos el telepeaje. En este sentido, diferentes grupos de trabajo internacionales

están analizando las implicaciones de los desarrollos de la telefonía móvil en la carretera. El *5G Infrastructure Public Private Partnership* (5G PPP) es un grupo liderado por la Comisión Europea que, reuniendo a operadoras de telefonía, fabricantes y empresas de servicios, busca hacer una red más segura, proporcionar una capacidad mil veces superior a la que había en 2010, y proporcionar mayor densidad de celdas de telefonía. Otro grupo de interés es el 5GAA (5G Automotive Association) que aúna a fabricantes de vehículos y operadoras. Su labor se enfoca en analizar las relaciones coste-beneficio de estas tecnologías, las propuestas y pruebas de los diferentes estándares relacionados. Esto permitirá aumentar la capacidad de transmisión de datos de los vehículos, por lo que es de esperar que aumente significativamente la precisión y calidad del telepeaje a través de las comunicaciones móviles.

Asimismo, para potenciar las comunicaciones 5G, entre otras, la Comisión Europea está impulsando el proyecto C-Roads. Éste es el principal proyecto de desarrollo de sistemas inteligentes de transporte cooperativos (C-ITS) de la UE. Estos sistemas son el resultado de la evolución de los ITS tradicionales hacia un nuevo entorno de interacción cooperativa entre infraestructura y vehículo (I2V/V2I) o entre vehículos (V2V), propiciado por la tecnología, que permitirá a usuarios y gestores compartir información hasta ahora no disponible y usarla para mejorar sus acciones en beneficio de la seguridad vial, la eficiencia del tráfico, la reducción de emisiones y el confort al volante. Con estos sistemas, que transformarán la carretera desde una plataforma inanimada en una infraestructura inteligente prestadora de servicios, el conductor podrá adoptar la mejor decisión para adaptarse a la circulación, y el gestor implementará la estrategia más adecuada para la gestión del tráfico.

Öörni & Korhonen (2014) han destacado la importancia de los dispositivos que integran diferentes sistemas inteligentes de transporte, como sucedió con la introducción del “eCall”. Por lo tanto, estas tecnologías deben ser tenidas en cuenta para tratar de introducir en ellas los posibles dispositivos de telepeaje y aprovechar las economías de escala de los nuevos desarrollos (Papadimitratos et al., 2009). Asimismo, se han producido desarrollos importantes en los procedimientos de transmisión de datos, como es el caso de la comunicación a 5,9 GHz (Lamy, 2012). Estas tecnologías basadas en la instalación de balizas en la infraestructura viaria basadas en la comunicación a 5,9 GHz también están recogidas en el proyecto C-Roads, explicado en párrafos anteriores.

Tras la revisión anterior, se puede observar fácilmente cómo unas tecnologías tienen un mayor protagonismo dentro de la literatura científica que otras, como es el caso de los sistemas DSRC

(Ansari et al., 2013), el mayoritario en Europa, y los sistemas basados en la radiofrecuencia, los más empleados en Estados Unidos (General Assembly of the State of Virginia, 2008).

Hayward (2015) analizó los sistemas de peaje electrónico y concluyó que estos se han puesto en servicio para satisfacer dos grandes necesidades: en primer lugar, mejorar la eficiencia de las carreteras de peaje operadas por empresas privadas mediante la reducción de los puestos de peaje tradicionales; y, en segundo lugar, como un medio para cumplir con el objetivo de la política pública de vincular los costes asociados a la carretera con el uso de la carretera según la categoría de distancia recorrida y las emisiones de los vehículos. Además, las autoridades europeas han reconocido la contribución del telepeaje para mejorar la seguridad vial, los problemas de congestión y los impactos ambientales derivados del tráfico vial. Los sistemas de telepeaje también se utilizan en carreteras asiáticas, especialmente en Taiwán y Japón, así como en todo el continente americano (Mizutani & Uranishi, 2008).

Otros trabajos se centran en la importancia de las labores de vigilancia y control del pago del peaje. Por ejemplo, Hsu & Shih (2015) señalaron que el impago del peaje por parte de un grupo de usuarios puede llegar a provocar una reducción significativa en los ingresos del operador. Sin embargo, en el marco de sistemas de telepeaje este problema no puede solventarse con el uso de barreras físicas, sino que debe afrontarse desde otra perspectiva. En general, la vigilancia se realiza a través de cámaras de video vigilancia colocadas en pórticos o a través de los cuerpos y fuerzas de seguridad encargadas de la vigilancia del tráfico, tránsito y transporte en las vías públicas interurbanas.

2.4.2 Influencia del cobro electrónico en los usuarios de las carreteras de peaje

En las últimas décadas, la infraestructura vial y sus tecnologías asociadas han avanzado progresivamente. Como apuntaron Hsu et al. (2013), los gobiernos, los operadores privados y los usuarios han adoptado nuevas soluciones para mejorar las condiciones del tráfico y la seguridad vial en las carreteras, tanto urbanas como interurbanas. Los componentes de los sistemas ITS dentro de los automóviles, como los OBUs, ofrecen servicios de ayuda a la conducción y permiten la comunicación con el entorno del vehículo. Entre estos servicios, el uso de la OBU como transpondedor, comúnmente llamado “tag”, ha ido ganando importancia en las carreteras de peaje como un medio para pagar los peajes electrónicamente sin la necesidad de detenerse en los puestos de peaje.

Según Jou et al. (2013), el uso de los “tags” para pagar peajes ofrece varias ventajas, tanto para los usuarios como para los operadores, como una reducción del tiempo de viaje en los puestos

de peaje, una disminución de las emisiones de contaminantes al aire, una reducción de los costes operativos, etc. Debido a la reducción general de los costes de transporte, entre otros beneficios, en comparación con los sistemas de cobro de peajes manuales, los países están introduciendo e impulsando cada vez más sistemas de cobro electrónico de peaje en sus redes de carreteras a lo largo del mundo. Sin embargo, diferentes problemas –poca comprensión de los servicios de telepeaje, el coste de adquirir un “tag” o la falta de interoperabilidad transnacional de los servicios de cobro electrónico de peajes– han obstaculizado el crecimiento potencial de estas tecnologías.

Una de las barreras más importantes relacionadas con una introducción a gran escala del pago electrónico de peajes es la falta de interoperabilidad transnacional observada entre los sistemas de telepeaje, como es el caso de, por ejemplo, diferentes países de Europa Central. Por este motivo, uno de los principales desafíos radica en la adopción de tecnologías comunes e interoperables entre los sistemas de peaje electrónico en diferentes países, ya que esta falta de interoperabilidad hace que los usuarios se vean disuadidos en el uso de sistemas de telepeaje.

Asimismo, es fundamental resaltar determinados aspectos que influyen de manera importante sobre los sistemas de cobro electrónico de peaje. Entre ellos destaca lo relativo a la privacidad de los usuarios. Muchos autores, como Balasch et al. (2010); Riley (2008); Ogden (2001) o Hensher (1991), entre otros, abordan la incidencia de las tecnologías de telepeaje en el ámbito de la protección de datos personales y la privacidad de algunos de los desarrollos tecnológicos actuales con mayor impacto en la privacidad, con el fin de armonizar los criterios de las autoridades y usuarios. Además, la privacidad del usuario de la carretera es un factor crítico que puede disuadir a los conductores de adoptar este tipo de pago, independientemente de sus ventajas asociadas. La privacidad también puede suponer costes adicionales para los proveedores de servicios si no se adoptan estándares comunes en los diferentes países.

A pesar de la creciente literatura sobre la valoración y opinión de la ciudadanía hacia las carreteras de peaje (ver, por ejemplo, Odeck & Kjerkreit, 2010), quedan muchas brechas de investigación por estudiar, especialmente las relacionadas con los factores que influyen en la adopción del telepeaje por parte de los conductores. En primer lugar, no hay muchas contribuciones previas que exploren el uso de los sistemas de telepeaje, en contraste con la amplia literatura sobre las percepciones de los usuarios y su disposición a pagar en las carreteras de peaje. En segundo lugar, las contribuciones actuales se centran en carreteras de peaje específicas (véase, por ejemplo, Huang & Burris, 2015), pero es necesario analizar la adopción

de tecnologías de peaje electrónico en áreas más amplias, como las redes de peaje a nivel nacional, ya que las diferencias locales/regionales podrían ser importantes.

Los trabajos de investigación anteriores sobre sistemas de pago electrónico se han centrado generalmente en medir el rendimiento de tecnologías específicas en aspectos parciales, como la arquitectura de los sistemas de peaje electrónico (Caneschi, 2007) o las evaluaciones de seguridad (Abuzwidah & Abdel-Aty, 2015). Por lo tanto, existe la necesidad de una evaluación general sobre la adopción y opinión de los usuarios hacia el telepeaje. El análisis del comportamiento de los usuarios a la hora de utilizar sistemas de telepeaje tiene sentido, ya que, como señalaron Jou et al., (2011), si los concesionarios y las administraciones encargadas de la operación de las autopistas de peaje pueden conocer las valoraciones y las necesidades de los usuarios, pueden establecer medidas de innovación para la mejora del servicio. De esta forma, el análisis de la adopción y las opiniones hacia el telepeaje tiene implicaciones políticas importantes para los operadores de carreteras de peaje, las administraciones públicas y los usuarios de las carreteras.

En otro sentido, diferentes estudios, véase por ejemplo el de Jou et al. (2013), han observado que el pago electrónico sigue siendo bajo en aquellas carreteras con peaje en las que también está disponible el pago en efectivo. Para superar este problema, durante las últimas décadas se han promovido varios acuerdos en el contexto internacional, como la promoción de un Servicio Europeo de Peaje Electrónico (SET) dentro de la UE (Heras-Molina et al., 2016), con un progreso limitado a día de hoy. Sin embargo, numerosas autopistas de peaje en todo el mundo ya han introducido tecnologías totalmente automatizadas y que no aceptan pagos en efectivo, como es el caso de, por ejemplo, el Puente Golden Gate en California (Highway and Transportation District, 2016), las carreteras Ex-SCUP en Portugal (Infraestructuras de Portugal, 2016), o las autopistas urbanas de peaje en Santiago de Chile (de Grange et al., 2015).

Bajo los sistemas actuales de peaje electrónico en autopistas, Memarian et al., (2012) señalaron que el uso generalizado de “tags” puede suponer una fuente de información de calidad con respecto a las características del viaje, del cliente, el comportamiento del viaje y la actitud de los clientes hacia los servicios. Sin embargo, la penetración de estas tecnologías se ha visto limitada por diferentes aspectos, como los problemas de privacidad de los usuarios (Jardí-Cedó et al., 2015) o el hecho de que los conductores suelen asumir el coste de poseer un “tag” (Jou et al., 2013), por lo que el sistema solo reviste interés para los usuarios frecuentes.

Jou & Huang (2014) señalaron que la investigación sobre los sistemas de cobro de peaje electrónico apenas ha explorado la disposición de los conductores a usar el telepeaje para pagar peajes. Algunos estudios se centran en desarrollos tecnológicos o análisis de corredores específicos. Otras investigaciones han explorado diferentes aspectos, tales como: las percepciones de los usuarios y la disposición a pagar los peajes, sin hacer una distinción entre los pagos de los peajes convencionales frente a los electrónicos (Fowler et al., 2006; Button, 1996); la aceptabilidad de los usuarios como una barrera contra la introducción de esquemas de precios (Odeck & Kjekreit, 2010; Schade & Baum, 2007); o las percepciones de los usuarios hacia la introducción de esquemas de cobro para la reducción de la congestión en entornos urbanos y metropolitanos (Kottenhoff & Brundell Freij, 2009).

Por otra parte, Yim (1991) abordó cinco aspectos para determinar el nivel de interés en suscribirse a un servicio de cobro de peaje electrónico para puentes de peaje en California (EE. UU.). Estos cinco aspectos fueron: 1) interés en el servicio de telepeaje, 2) tipos preferidos de tecnologías de pago, 3) ubicación preferida del tag dentro del vehículo, 4) método de pago deseado para el servicio y 5) beneficios percibidos del uso del peaje electrónico. Las reticencias de los usuarios por la privacidad de sus datos también son un factor frecuentemente señalado en la literatura al analizar el uso del telepeaje. Las carreteras sujetas a pago generalmente requieren que los sistemas de peaje estén equipados con dispositivos electrónicos, como cámaras o transpondedores GPS, que rastreen la posición de los usuarios en cualquier momento o controlen todos los vehículos que pasan por los puntos de control. Este aspecto puede representar una amenaza seria a la privacidad que influye en la aceptabilidad de los conductores (Jardí-Cedó et al., 2015). Además, las leyes actuales apenas abordan la privacidad electrónica, y dada la naturaleza rápidamente cambiante de la tecnología, interpretar la ley con respecto a la privacidad resulta cada vez más complejo (Persad et al., 2007). Otro trabajo de investigación ha realizado encuestas para evaluar cómo ha cambiado la experiencia de los usuarios en el pago de peajes a lo largo de los años (Limelight, 2012). A este respecto, se analizaron trece preguntas desagregando los datos recopilados contra una variable independiente, p. ej. región, grupo de usuarios o género. Más recientemente, Huang & Burris, (2015) analizaron la evolución del tráfico en el área de Miami-Dade (EEUU) encontrando que los conductores que pagan en efectivo eran más sensibles a un cambio en la tarifa de peaje que los conductores que pagan electrónicamente.

Una vez analizada en detalle la bibliografía existente, se puede extraer información valiosa para la presente tesis doctoral. Desde una perspectiva de planificación pública, Silva (2011) señaló

que los gobiernos chilenos propiciaron la creación y posterior mantenimiento de un entorno que fomentó la inversión privada en grandes proyectos de obras públicas en un marco tan complejo como el de Santiago. Centrándose en los datos de tráfico, de Grange et al. (2015) encontraron que la demanda vial en las autopistas urbanas de Santiago era bastante inelástica para los precios del combustible y los peajes. Sagaris (2014a; 2014b), a su vez, examinó los movimientos de ciudadanos que surgieron en contra de los proyectos de carreteras urbanas en Santiago. Más recientemente, Sagaris et al. (2017) advirtieron sobre cierta segmentación urbana proveniente de la red de autopistas urbanas y la necesidad de permitir una mayor participación pública en proyectos de infraestructura urbana. Otros autores como Graftieaux et al. (2003) se enfocaron más en temas ambientales y de sostenibilidad

2.5 Preguntas de la investigación

Tras el análisis pormenorizado del estado del arte en el ámbito de los sistemas de cobro electrónico de peajes, queda patente la existencia de ciertas limitaciones en el alcance de la literatura, especialmente en temas fundamentales para el telepeaje como el estudio comparativo de las diferentes tecnologías o la influencia que estos sistemas pueden tener en los usuarios de las infraestructuras de peaje. Ante estas limitaciones detectadas, la investigación plantea las siguientes cuestiones:

- En la literatura existente no se han desarrollado estudios que realicen un análisis comparativo en profundidad de las diferentes tecnologías de cobro electrónico de peajes, lo que permitiría una mejor elección de estos sistemas por parte de las administraciones públicas y concesionarios. De esta forma, es necesario concretar los criterios que permitan una comparación de las tecnologías presentes y potenciales.

PREGUNTA 1: *¿Qué criterios deben valorar los gestores de carreteras a la hora de planificar e introducir en su red de carreteras una determinada tecnología de cobro electrónico de peajes?*

- Continuando con lo expuesto en la Pregunta 1, en el estado del arte analizado no se han determinado qué factores determinan la elección de un sistema de cobro electrónico de peajes. Así una vez evaluados los criterios de comparación, es preciso definir los parámetros que puedan emplear los gestores de las carreteras para elegir una determinada tecnología de telepeaje.

PREGUNTA 2: *¿Qué parámetros permiten cuantificar los criterios para determinar la elección de una u otra tecnología de telepeaje en una sección de carretera?*

- La importancia de la opinión y características de los usuarios tampoco ha sido abordada con la profundidad requerida en el estado del arte existente en la actualidad. Como se ha señalado anteriormente, los estudios han puesto el foco en la maximización de los conductores que eligen las carreteras de peaje o en la maximización de los beneficios para las empresas concesionarias. Sin embargo, la aceptabilidad y el punto de vista de los usuarios ante las tecnologías de telepeaje ha sido tratada de forma tangencial. Por

ello, resulta fundamental analizar esta temática para permitir el desarrollo de pautas y criterios para la toma de decisiones en el ámbito de los sistemas de telepeaje.

PREGUNTA 3: *¿Qué factores condicionan la propensión al uso de sistemas de pago electrónico de peajes por parte de los conductores?*

- En línea con la pregunta anterior, una de las principales motivaciones de las administraciones públicas debe ser la mejora de la calidad de vida de la ciudadanía. En este sentido, el estudio y valoración de medidas de gestión que impliquen el incremento de la aceptabilidad de las infraestructuras por parte de sus usuarios deben ser analizadas. Así, una medida es la reducción de costes que soportan dichos usuarios.

PREGUNTA 4: *¿Qué implicaciones tiene en la aceptación del telepeaje por parte de los usuarios la gratuidad de los dispositivos de telepeaje?*

Dado que la presente tesis doctoral tiene como objetivo principal la obtención de criterios y pautas que permitan una eficaz implantación del telepeaje en las carreteras, teniendo en cuenta tanto a los gestores de dichas infraestructuras como a sus usuarios, el conocimiento en mayor profundidad de los aspectos señalados anteriormente se considera clave y punto fundamental en la continuación de la investigación.

PARTE II:

OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3. OBJETIVOS DE LA TESIS

Como se señala en la introducción, el **principal objetivo** de esta investigación es la **obtención de criterios y pautas que permitan una eficaz implantación y gestión de sistemas de cobro electrónico de peajes en las carreteras**, teniendo en cuenta tanto a los gestores de dichas infraestructuras como a sus usuarios. De esta forma, se pretende mejorar el conocimiento disponible para la toma de decisiones en este ámbito por parte de las administraciones públicas y empresas concesionarias de infraestructuras. Este objetivo se materializa abordando las preguntas de investigación formuladas en el capítulo anterior. En este sentido, se han establecido una serie de cinco objetivos específicos, que son:

- **Objetivo específico 1.** En relación con la pregunta de investigación 1, es:

Revisión pormenorizada de la aplicación de los sistemas de cobro electrónico de peaje, así como el análisis de los aspectos críticos, tanto positivos como negativos, de estas tecnologías.

- **Objetivo específico 2.** Este objetivo surge en desarrollo de las preguntas de investigación 1 y 2:

Identificación de los atributos definitorios de las tecnologías de telepeaje maduras y plenamente operativas hoy en día, así como las que se encuentran en desarrollo. Este estudio comparativo de elementos críticos en la toma de decisiones, como costes, “enforcement”, interoperabilidad u obsolescencia, entre otros, permitirá la obtención de una serie de criterios para la selección de la tecnología más adecuada por parte de los administradores de carreteras de peaje, aspecto no analizado en la actualidad.

- **Objetivo específico 3.** De la pregunta de la investigación 3 surge el siguiente objetivo específico:

Determinación de los factores que influyen en el uso de los sistemas electrónicos de peaje por parte de los usuarios de las autopistas de peaje, identificando los segmentos de población a los que deben dirigirse las acciones de los titulares de las vías. Así, los resultados pueden dar lugar a la toma de medidas que hagan que la conducción por estas autopistas sea más atractiva, atrayendo el tráfico de alternativas no tarifadas de menor calidad, con beneficios potenciales en términos de seguridad vial, congestión del tráfico y explotación de la red de carreteras.

- **Objetivo específico 4.** Este objetivo surge en desarrollo de la pregunta de investigación 4:

***Desarrollo de las implicaciones de una medida de gestión destinada al aumento del uso y de la aceptabilidad de los sistemas de cobro electrónico de peajes entre los conductores.** La medida elegida en la presente investigación es la entrega gratuita de dispositivos de telepeaje a los usuarios. Este objetivo específico, que amplía el foco establecido en el objetivo anterior, está orientado a la obtención de conclusiones y recomendaciones de valor para las administraciones públicas y empresas encargadas de la gestión y explotación de las carreteras de peaje.*

- **Objetivo específico 5.** Finalmente, como consecuencia de la totalidad de las preguntas planteadas, la presente tesis doctoral persigue el, siguiente objetivo específico:

***Establecimiento de recomendaciones de actuación enfocadas a una mejor gestión de las carreteras de peaje,** poniendo el foco en un uso más eficiente de los recursos públicos, así como en la mejora de la satisfacción de los usuarios de las infraestructuras de peaje. Estas recomendaciones estarán destinadas tanto a las administraciones públicas como a las empresas concesionarias de carreteras de peaje.*

Figura 7. Esquema de los objetivos de la investigación

Elaboración propia

4. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Para la consecución de los objetivos planteados, y en base a la práctica y literatura existente en el ámbito de los sistemas de cobro electrónico de peajes, se plantea la siguiente metodología (Ver Figura 8).

Un correcto análisis de los sistemas electrónicos de cobro de peajes conlleva desarrollar una investigación que integre los diferentes elementos que determinan el correcto rendimiento de los sistemas de telepeaje. Por ello, esta investigación estudia una primera visión centrada en las tecnologías de cobro y su funcionamiento como sistema, y otra segunda visión que pone el foco en la experiencia de los usuarios de las autopistas de peaje. Para poder evaluar cada una de estas visiones se proponen dos análisis que permiten abarcar de forma completa y detallada la realidad de los sistemas de telepeaje, empleando diferentes metodologías (ver Tabla 2).

Figura 8. Esquema planteamiento metodológico

Elaboración propia

Para la visión centrada en la parte tecnológica de los sistemas de telepeaje se ha elegido un **análisis enfocado en el rendimiento de los sistemas tecnológicos empleados en el cobro electrónico de peajes**. La metodología empleada se basa en el análisis pormenorizado de los sistemas de telepeaje existentes actualmente en el ámbito internacional, mediante un **análisis D.A.F.O.** – Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades. Entre los elementos que se analizan se encuentran los costes, interoperabilidad, privacidad y protección de datos, *enforcement*, obsolescencia tecnológica e integración de servicios.

Con este análisis se busca estudiar tanto las características internas (debilidades y fortalezas) como las externas (amenazas y oportunidades) de las diferentes tecnologías, lo que permite **planificar** a las administraciones públicas y empresas concesionarias de infraestructuras una estrategia de futuro.

En cuanto a la visión que pone el foco en los conductores que circulan por autopistas de peaje, se realiza un análisis sobre la **percepción de los usuarios** de los sistemas de cobro electrónico de peajes en España. La metodología de este análisis se fundamenta en la realización de una **encuesta** a los usuarios reales y potenciales de la red de **autopistas de peaje de España**. Posteriormente, a través de un análisis estadístico de los datos recogidos, se realizan dos **modelos de elección discreta tipo logit**. El análisis se centra en el caso de España, país que cuenta con una red extensa de autopistas de peaje, con importantes diferencias territoriales de distribución de la población. Nuestro país también constituye un caso de interés en el ámbito del telepeaje debido a que existe un coste directo para el usuario que emplea el telepeaje – sistema Vía-T–. Con este análisis se persigue obtener pautas de comportamiento de los usuarios, así como determinar qué iniciativas pueden mejorarse para aumentar el uso del telepeaje.

Tabla 2. Resumen del planteamiento metodológico de la tesis doctoral

VISIÓN	ANÁLISIS	METODOLOGÍA
Ámbito de las tecnologías de telepeaje	Sistemas tecnológicos empleados en el peaje electrónico	Análisis D.A.F.O.
Ámbito del comportamiento de los usuarios	Percepción de los usuarios de los sistemas de cobro electrónico de peajes	Modelo econométrico (Logit)

Elaboración propia

PARTE III: ANÁLISIS

5. ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DE TELEPEAJE

5.1 Presentación

A continuación, se desarrolla el análisis desde el punto de vista de las tecnologías de cobro electrónico de peaje, uno de los dos pilares de la presente tesis doctoral. Este capítulo analiza las seis principales tecnologías empleadas en el cobro electrónico de peajes hoy en día, así como las tecnologías actualmente en desarrollo que se espera tendrán protagonismo en un futuro. De este modo, el análisis se centra en estudiar las diferentes propiedades y características que presenta cada sistema, permitiendo detectar las principales fortalezas y debilidades de cada tecnología. Así, es posible realizar a modo de síntesis un análisis D.A.F.O. y un análisis comparativo y estratégico de las principales características de cada tecnología, lo que permite obtener una serie de recomendaciones para su mejora.

La estructura seguida a la hora de presentar y realizar dicho análisis es la siguiente. En primer lugar, se desarrolla una breve presentación de la cuestión, con los principales elementos de la misma, así como la justificación de su elección. En segundo lugar, se presentan los principales datos y la forma en la que se han obtenido, que permitirán el posterior análisis. En tercer lugar, se desarrolla la técnica de análisis de los datos recogidos para, finalmente, explicar e interpretar los resultados obtenidos en la investigación.

5.2 Técnicas de análisis

La metodología seguida en el presente análisis sobre las tecnologías empleadas en el telepeaje persigue determinar la relevancia e importancia de la interoperabilidad en el ámbito de los diferentes sistemas europeos de telepeaje, así como asegurar la originalidad de la investigación. Es importante remarcar que esta revisión de las características de los diferentes sistemas de telepeaje no existe en la literatura actual, por lo que es necesario sentar sus bases.

La metodología seguida es la propuesta por Gómez-Luna et al., (2014). Ésta se caracteriza por, en primer lugar, empezar con la definición del problema, que en este caso es la necesidad de un estudio pormenorizado de las diferentes tecnologías de peaje electrónico, así como la falta de interoperabilidad entre los diferentes sistemas de telepeaje. El segundo paso es la búsqueda de la información desde una perspectiva estructurada y profesional. En tercer lugar, se organiza la información de manera sistemática teniendo en mente en todo momento el objetivo a alcanzar en la investigación. Por último, se realiza el análisis de la información que permite obtener una serie de conclusiones y recomendaciones para el futuro. A continuación, se establece un análisis pormenorizado de cada uno de los pasos de la metodología.

La definición del problema se realiza a partir de las premisas recogidas en la Directiva (UE) 2019/520, donde se define el Servicio Europeo de Telepeaje (SET) como solución a los problemas de interoperabilidad que sufren los diferentes sistemas nacionales de peaje en Europa. La falta de interoperabilidad, tal y como se mencionó anteriormente, dificulta el transporte de personas y mercancías creando barreras artificiales dentro del mercado único europeo.

La Unión Europea define el SET a partir del principio “un vehículo, un contrato, un dispositivo”. Así, este caso de estudio se centra en la parte relativa a las tecnologías de telepeaje. Como se ha comentado anteriormente, las autoridades europeas han propuesto tres tecnologías principales para el cobro electrónico de peajes dentro de la UE: DSRC (microondas a 5,8 GHz), localización por satélite (GNSS) y comunicaciones móviles (GSM-GPRS). Sin embargo, a pesar de que el SET tan sólo contempla tres sistemas, a la hora de hacer la revisión bibliográfica y, por tanto, la búsqueda de información, la investigación ha ampliado el espectro de sistemas de telepeaje a otros, tanto actuales como emergentes. Esto permite tener una visión más amplia del problema, plantear posibles escenarios futuros y, asimismo, encontrar mejores soluciones para la interoperabilidad y para labores de ayuda al telepeaje como los sistemas de *enforcement*.

De este modo, la búsqueda de información se hace sobre los seis sistemas de peaje electrónico más usados en el mundo y no sólo los propuestos por la Unión Europea. Los sistemas analizados son los siguientes:

- Tacógrafo: Recoge la distancia recorrida por el conductor a través de un dispositivo a bordo conectado con un odómetro.
- Reconocimiento automático de matrícula (ANPR): Una tecnología ampliamente utilizada en todo el mundo que usa videocámaras para la identificación del vehículo.
- DSRC: Tecnología basada en la comunicación bidireccional entre el equipamiento de la carretera (generalmente pórticos) y dispositivos a bordo de los vehículos.
- Identificación por radiofrecuencia (RFID): Sistema más utilizado en Estados Unidos, se basa en un sistema de radio que detecta a los dispositivos a bordo de los vehículos.
- Comunicaciones por satélite (GNSS): La tecnología satelital utiliza la posición del vehículo para determinar el peaje a pagar por el usuario.
- Comunicaciones móviles (GSM y Smartphone): Basados en aplicaciones móviles y las frecuencias de telefonía.

Tras haber efectuado la descripción de cada tecnología en el epígrafe dedicado al Estado del arte (ver capítulo 2.1), a continuación, se analiza el desempeño de diferentes aspectos que permiten diferenciar y comparar las diferentes tecnologías. Entre estos factores destacan la precisión a la hora de determinar el valor del peaje, los costes asociados (tanto para el operador como para los usuarios), posibilidad de interoperabilidad, obsolescencia o métodos de *enforcement*, entre otros.

La parte más importante de la investigación es, sin duda, el análisis sintético de la información obtenida en los pasos anteriores. Este estudio continúa con un análisis D.A.F.O., en el que se comparan las diferentes tecnologías. El análisis D.A.F.O. empleado en esta tesis doctoral sigue la metodología general que se suele emplear en este tipo de análisis. En primer lugar, se establecen los objetivos y metas. Seguidamente, se realiza el análisis externo por el que se determinan las oportunidades que ofrece en entorno y cómo se puede aprovechar, así como las amenazas que existen en el entorno y cómo se pueden evitar o eliminar. El tercer paso es el análisis interno. En él se determinan las fortalezas de cada una de las tecnologías de telepeaje y cómo se pueden potenciar, así como las debilidades que presentan y cómo se pueden eliminar o limitar. Finalmente se confecciona la matriz D.A.F.O. y se determina la estrategia a desarrollar.

De este modo, se establece un análisis comparativo de las diferentes tecnologías en función de diferentes categorías como la evaluación de los costes, interoperabilidad y su adaptabilidad al SET, precisión y privacidad, vigilancia del pago del peaje, posibles signos de obsolescencia y desarrollos futuros. Con estos análisis sectoriales se pretende la comparación de los diferentes sistemas en aquellos aspectos más importantes para los usuarios, las diferentes autoridades comunitarias y nacionales y la industria, sin perder de vista el objetivo de la interoperabilidad.

Este análisis es muy adecuado para la presente investigación, puesto que permite analizar las características internas (debilidades y fortalezas) y su situación externa (amenazas y oportunidades) en aras de conseguir una mejor interoperabilidad entre los sistemas de telepeaje. Este análisis permite identificar qué tecnologías presentan mejores prestaciones y su idoneidad para su puesta en servicio.

Por último, y también con una importancia destacada, los análisis de los sistemas permiten establecer una serie de recomendaciones principales destinadas a la mejora de la interoperabilidad, así como a las directrices que deberían guiar la toma de decisiones de las autoridades comunitarias y nacionales en los próximos años.

El hecho de seguir esta metodología permitirá que en un futuro otros investigadores consulten las fuentes bibliográficas citadas, pudiendo entender y continuar el trabajo realizado.

El resumen de la metodología empleada se puede observar en la Figura 9:

Figura 9. Metodología del Análisis sobre los sistemas tecnológicos empleados en el peaje electrónico

Elaboración propia

5.3 Resultados

De acuerdo con lo expuesto en capítulos anteriores, el desarrollo de la investigación, una vez realizada la amplia revisión bibliográfica y desarrollada la metodología, continúa con la revisión de las seis tecnologías de telepeaje más empleadas en la actualidad. Posteriormente, se continúa con una evaluación de las tecnologías de telepeaje que puedan tener un mayor protagonismo en el futuro de los sistemas de telepeaje. Finalmente se procede a la realización de un análisis comparativo de las diferentes tecnologías, basado en los siguientes aspectos: el estudio de los costes, adaptación al Servicio Europeo de Telepeaje, protección de datos, control del fraude u obsolescencia, entre otros; así como la realización de un análisis D.A.F.O. de las tecnologías seleccionadas por la Unión Europea para su uso en el ámbito del Servicio Europeo de Telepeaje.

5.3.1 Evaluación de las tecnologías de telepeaje existentes

5.3.1.1 *Tacógrafo*

El tacógrafo es una tecnología que registra la distancia recorrida por el usuario a través de un OBU conectado electrónicamente al odómetro del vehículo. Así, las cuestiones de protección de datos y privacidad de los usuarios se evitan deliberadamente en este sistema, ya que los datos de kilometraje son el único parámetro registrado por el OBU (la posición exacta del usuario nunca es conocida por las autoridades de peaje). Por el contrario, el tacógrafo tiene un menor nivel de precisión que otros sistemas, con errores de $\pm 4\%$ en los registros de datos (Engdahl, 2013). La rentabilidad de esta tecnología depende en gran medida de los equipos de vía instalados, dado que el precio del OBU es significativamente mayor que otros transpondedores utilizados por los sistemas DSRC y GNSS (FCA & Switzerland, 2013; Oehry, 2010).

Como puede verse, los sistemas basados en el tacógrafo no son de uso común, y todavía no se han adaptado a las normas técnicas de interoperabilidad. Además, la interoperabilidad con otras tecnologías de peaje, como los sistemas DSRC, todavía no se ha alcanzado. Por ello, no ha sido una tecnología seleccionada por la Directiva UE 520/2019 para el SET.

5.3.1.2 *Reconocimiento automático de matrícula (ANPR)*

El uso de cámaras de video para la identificación del vehículo en el peaje es hoy en día una tecnología ampliamente utilizada. Como se vio anteriormente, este sistema funciona a través de cámaras (montadas en postes o pórticos en el borde de la carretera), que toman una foto de las placas de la matrícula del vehículo.

En cuanto a la precisión de esta tecnología, las cámaras más avanzadas actualmente alcanzan una tasa de lectura automática de hasta el 99% cuando se montan en pódicos de calzadas unidireccionales. Sin embargo, las tasas de detección y precisión de lectura pueden ser más bajas en ciertos casos, sobre todo en presencia de matrículas reflectantes, condiciones meteorológicas adversas, falta de estandarización de la matrícula, etc. Esto hace necesario la comprobación manual de matrículas para corregir posibles errores. Además, existen ciertas reservas con la protección de datos, ya que los conductores y pasajeros podrían ser identificados a través de este sistema, que presenta una falta de armonización legal en todos los países en este aspecto.

Las tecnologías ANPR ya implantadas, por lo general, se han mostrado como altamente rentables. Hay varias razones que pueden señalarse a este respecto. En primer lugar, el uso del *videotolling* como el principal sistema de cobro electrónico de peajes no precisa ni de dispositivos instalados en el vehículo ni pódicos adicionales a efectos de *enforcement*. En segundo lugar, el sistema en general implica menores costes operativos que las tecnologías de telepeaje, y menos infraestructura, es decir, requiere menos costes de inversión. Además, la tecnología de *videotolling* está muy automatizada, con un esfuerzo de trabajo que depende principalmente de la posterior comprobación manual por parte de los técnicos. Su efectividad se ha evidenciado en casos tales como el sistema de tarificación de la congestión en Londres (Prud'homme & Bocarejo, 2005) o la carretera ETR407 canadiense, con unos ingresos netos anuales generalmente similares o incluso superiores a los costes de inversión iniciales. Sin embargo, la necesidad de mantener una base de datos nacional actualizada de registro de vehículos y de conductores puede aumentar los costes de operación, dependiendo de la calidad del registro de datos central. Además, la falta de armonización de los diseños de placas de matrícula y de las normas ANPR a nivel internacional puede producir pérdidas de ingresos, especialmente lo que respecta a los evasores de peaje extranjeros, lo que hace necesaria la verificación manual, resultando en mayores costes de operación.

El *videotolling* ha demostrado ser una tecnología útil para fines de vigilancia y control del fraude, ya que las imágenes de los vehículos representan la estrategia más común para la identificación de personas que no pagan los peajes. Debido a la necesidad de pruebas para acudir contra los evasores, el procedimiento habitual es obtener imágenes de los vehículos. También puede ser utilizado para hacer cumplir otras infracciones de tráfico, como, por ejemplo, el estacionamiento incorrecto o excesos de velocidad. Sin embargo, como se ha podido ver, esta tecnología presenta

importantes limitaciones que hicieron que no fuera propuesta por la Directiva (UE) 2019/520 relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje.

5.3.1.3 DSRC

La tecnología DSRC, basada en la transmisión de microondas de datos entre un dispositivo instalado en el vehículo (OBU) y la infraestructura de peaje en carretera, ha sido el enfoque más empleado para la introducción del cobro electrónico en autopistas de peaje a nivel mundial.

El proceso de cobro del peaje mediante la tecnología DSRC está totalmente automatizado, ya que la precisión del sistema en transacciones exitosas tiende hacia el 100%. Los únicos fallos se producen si se coloca mal el OBU o si su batería expira. Además, los sistemas DSRC no se ven afectados de manera significativa por cuestiones de protección de la privacidad de los datos, ya que la ubicación del vehículo sólo se conoce al cruzar un puesto de peaje. Dada su gama de ventajas, el DSRC es una de las tecnologías de telepeaje propuestas por la Directiva (UE) 2019/520 para el SET.

La rentabilidad del sistema de peaje DSRC puede variar sustancialmente, dependiendo de la longitud del tramo de peaje y el nivel de tráfico. Por un lado, esta tecnología utiliza generalmente un OBU barato (de 5 a 10 €), con una vida media de 5 a 10 años. Por otro lado, la tecnología DSRC requiere la instalación de una RSE costosa tanto para fines de peaje, como de control. Esto es especialmente crítico en los casos de flujo libre y en los tramos con gran concentración de entradas y salidas, ya que es necesario instalar un número significativo de puntos de peaje. Como resultado, la tecnología DSRC es especialmente rentable cuando el peaje es utilizado por muchos vehículos en tramos de carretera con pocas ramificaciones (Q-FREE, 2013). Por el contrario, resulta difícil modificar la red de peaje sin grandes gastos de capital.

A excepción de algunos casos específicos (“Telepass” en Italia y “Vía Verde” en Portugal), la interoperabilidad dentro de las fronteras nacionales no era hasta hace poco una cuestión resuelta. A pesar de las mejoras limitadas hasta la fecha en este campo, ya es posible la interoperabilidad entre los distintos Estados miembros mediante normas técnicas comunes para los sistemas basados en el DSRC.

5.3.1.4 Identificación por radio frecuencia (RFID)

La identificación por radiofrecuencia hace referencia a aquellas tecnologías que utilizan ondas de radio para identificar dispositivos OBU de forma automática, por lo que el rendimiento y las

características de los sistemas basados en la RFID son, al menos en la práctica, muy similares a los de la tecnología DSRC.

La tecnología RFID puede ser menos precisa que la DSRC; sin embargo, las nuevas tecnologías (*6C-tags*) proporcionan un comportamiento similar. Con respecto a la interoperabilidad, la interoperabilidad tecnológica parcial se ha logrado en los Estados Unidos con los sistemas ANPR, al menos hasta un cierto grado. Por el contrario, la interoperabilidad geográfica se ha logrado sólo a nivel regional, pero aún no se ha abordado a nivel nacional. La actual falta de normas en materia de requisitos de prueba o impactos sobre la privacidad explica por qué esta tecnología no ha sido propuesta por la Directiva (UE) 2019/520 para el SET.

5.3.1.5 Comunicación por satélite – GNSS

La tecnología basada en satélites, o sistema de peaje electrónico GNSS, emplea los datos de posición del vehículo para medir el uso de la carretera y calcular en consecuencia el peaje. Con esta tecnología, la vigilancia y control es similar al enfoque presentado en la tecnología DSRC. Se compone de estaciones fijas, estaciones portátiles y móviles que combinan la aplicación de la inspección manual con las tecnologías DSRC y ANPR. La tasa de fraude experimentado por esta tecnología es inferior al 2%, de acuerdo con Fuente et al. (2011) en relación con el sistema de tarificación alemán de vehículo pesados.

El nivel de visibilidad de los satélites es el parámetro principal que determina la precisión del sistema de peaje electrónico GNSS. Las señales de satélite están influenciadas por factores como la hora del día, las perturbaciones atmosféricas y el entorno. Por otra parte, las redes móviles no siempre tienen una cobertura del 100% o exactitud total, lo que podría afectar a los peajes si carreteras cercanas tiene sistemas de peajes diferentes. A pesar de estas deficiencias, la tecnología es cada vez más fiable, puesto que la calidad de la cobertura por satélite mejora y, con el transcurso de los años, se pueden instalar repetidores GPS adicionales. La privacidad de los datos también es un tema crítico para los sistemas basados en el GNSS. Debido a la cantidad de información personal recogida, es fuertemente necesario un marco legal para proteger la privacidad de los usuarios. Para mitigar las preocupaciones del público, sólo debe ser almacenada y procesada la información posicional esencial.

Estos sistemas satelitales combinan unos altos costes en relación a la oficina central y de los OBUs con una escasa infraestructura vial, ya que sólo se utilizan para propósitos de vigilancia. De esta manera, los sistemas de peaje basados en GNSS son los más adecuados para el peaje de áreas amplias y densas. Asimismo, los costes relacionados con el OBU están disminuyendo,

debido principalmente a una mayor asimilación y desarrollo de otras aplicaciones ITS. En cuanto a la interoperabilidad, el sistema GNSS ha tenido éxito en el logro de la interoperabilidad con otros sistemas de peaje existentes, tales como la tecnología DSRC dentro del servicio Toll2Go, que opera en Austria y Alemania. A pesar de que el GNSS fue una de las tecnologías propuestas por la Directiva (UE) 2019/520, las cuestiones de normalización deben ser abordadas antes de que pueda ser implementado por el SET. Sin embargo, se han logrado importantes avances en este campo y se espera que la normalización del GNSS se resuelva en un futuro próximo.

5.3.1.6 Comunicaciones móviles

Se espera que en un futuro cercano los teléfonos móviles y los teléfonos inteligentes jueguen un papel importante en el Sistema Europeo de Telepeaje, pero actualmente se encuentran en una etapa embrionaria. La combinación de los avances tecnológicos en el campo de la comunicación NFC (*Near-Field Communication*) y la creciente cobertura de la red han dado lugar a una serie de ensayos para integrar los teléfonos móviles con los sistemas de telepeaje. A este respecto, el teléfono se puede utilizar para diferentes propósitos, como el propio pago del peaje durante el viaje, actualizar una cuenta personal y los datos de usuario, o seleccionar el método de pago.

Estas aplicaciones podrían lograr la interoperabilidad con los diferentes operadores, una mayor flexibilidad para pagar el peaje, y la transparencia de revisar los pagos en tiempo real. Otras ventajas se podrían mencionar en términos de proveer servicios de valor añadido y una interfaz de mejor calidad que ofrezcan al usuario la posibilidad de pagos más rápidos, la creación de informes a petición, o asociar más de un vehículo a una cuenta de pago. Esta tecnología de peaje también tiene ventajas para el operador, en particular, evitar la adquisición de equipos o de los gastos de distribución (Burden & Nijhuis, 2012). Además, permite el contacto continuo con sus clientes.

Desde una perspectiva de evaluación de costes, el teléfono móvil reduce significativamente la inversión inicial y los costes de operación, ya que no se necesita OBU y los pórticos sólo serán necesarios para la vigilancia y control del fraude, de manera similar a los sistemas basados en GNSS. También aparece como una tecnología precisa, con tasas de precisión para determinar la ubicación de un smartphone de alrededor del 100%.

Sin embargo, dada la limitada adopción de esta tecnología hasta la fecha, algunas cuestiones aún deben ser mejoradas como la clasificación de vehículos, la duración de la batería y, sobre todo, la protección de datos. En cuanto a la vida de la batería, una batería de teléfono móvil se

puede agotar en tan sólo unas horas, por lo que existe una mayor responsabilidad del usuario para mantener el funcionamiento del teléfono (Burden & Nijhuis, 2012), en comparación con otras tecnologías. La protección de datos es otro elemento crítico, ya que la información posicional debe ser almacenada y procesada con el fin de mitigar las reticencias de los usuarios a ser rastreados. Mientras que los teléfonos inteligentes son cada vez más populares, la penetración completa no se ha alcanzado y, por tanto, la tecnología de cobro de peaje a través del teléfono móvil debe estar respaldada por un sistema alternativo.

La interoperabilidad es un punto a favor de esta tecnología, ya que la comunicación móvil ya es interoperable en toda Europa. Dado su gran potencial, esta tecnología ha sido incluida en la Directiva (UE) 2019/520 y por lo tanto es compatible con los requisitos del SET.

5.3.2 Próximos desarrollos tecnológicos en el ámbito del telepeaje

Con el fin de evaluar mejor las tecnologías que podrían desempeñar un papel en el desarrollo futuro del SET, junto con la revisión de los sistemas de telepeaje actuales, es necesario proporcionar alguna información sobre las tecnologías emergentes potencialmente útiles para los propósitos de cobro de peaje. Como se ha señalado anteriormente, el uso actual de las diferentes tecnologías complica la armonización entre los distintos países y aumenta los costes de la interoperabilidad. Por esta razón, existe el riesgo de que los transportistas europeos tengan que adaptar sus operaciones cada vez más a un mosaico de diferentes regímenes de peaje (McKinnon, 2006).

Las oportunidades para lograr un sistema de interoperabilidad transnacional pueden venir de tecnologías emergentes, como los Sistemas CVIS (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) y de la arquitectura de comunicaciones para elementos móviles terrestres (CALM); aplicaciones tales como la telemática para vehículos y gestión de conductor (eCall) o un seguro del automóvil basado en el uso (UBI); y la tecnología de la comunicación en 5,9 GHz, entre otros.

El **Sistema CVIS** es la plataforma de intercambio de información para la organización del sistema de transporte inteligente, que permite interactuar con la información de la carretera. En la transmisión de información, basado en la conexión a Internet del vehículo, se consigue una alta fiabilidad (Ding, 2014) por lo que puede ser utilizado para el cobro de peajes.

Por otra parte, el **sistema CALM** proporciona protocolos y parámetros para comunicaciones inalámbricas de alcance medio, media y alta velocidad en el sector ITS utilizando sistemas de infrarrojos. Estos vínculos se establecen para permitir simultáneamente la transmisión de datos

entre los vehículos y equipo de vía, entre vehículos y entre equipos móviles y puntos de cobro de peajes. El sistema CALM debe apoyarse en un sistema de comunicación adecuado, como el GPS, la radiodifusión de audio digital (DAB), la radiodifusión de vídeo digital (DVB), la radiodifusión de datos digitales (DDB), protocolos de Internet o DSRC.

Por otro lado, el sistema europeo de urgencia en el vehículo (**eCall**) está dirigido a mitigar las consecuencias de los accidentes de tráfico (Pascale et al., 2015). Las principales funcionalidades de eCall son la transmisión de un conjunto mínimo de datos del vehículo accidentado a un centro de respuesta de emergencias (Öörni y Korhonen, 2014). De esta manera, los vehículos están provistos de un registrador de datos (EDR), un dispositivo de grabación de la información relacionada con los accidentes de vehículos o accidentes. Este sistema proporciona una mejor comprensión de cómo se producen ciertos accidentes, ya que los EDR pueden grabar una gran cantidad de información con respecto a las aceleraciones, velocidad, luces, roturas, etc. En los últimos años, algunos de ellos pueden tener acceso a Internet para enviar los datos a un servidor remoto. También se espera que la telemática pueda ser utilizada por las aseguradoras de automóviles para ofrecer programas basados en el uso de seguros (UBI), de modo que las tasas de estos seguros podrían determinarse basándose en el comportamiento del conductor, es decir, “dónde, cuándo y cómo se conduce” (Händel et al., 2014).

Una nueva tecnología de **comunicación en 5,9 GHz** está siendo desarrollada y estandarizada en todo el mundo. Se trata de una tecnología inalámbrica para la comunicación punto a punto entre los vehículos y su infraestructura, así como la comunicación de vehículo a vehículo (Mcnew, 2010). La característica más innovadora de esta tecnología es el OBU, que permite la comunicación de vehículo a vehículo sin la necesidad de una red de infraestructura externa. El sistema de 5,9 GHz puede garantizar la gestión de transacciones con al menos el mismo nivel de precisión que el sistema común de 5,8 GHz. En caso de que un OBU incorpore ambas tecnologías, la frecuencia de operación de 5,8 GHz en la tecnología DSRC se destinaría al cobro de peaje, mientras que 5.9 GHz proporcionaría servicios adicionales a los usuarios (Ansari et al., 2013). Sin embargo, la migración completa a los sistemas basados exclusivamente en 5.9 GHz parece poco probable a corto y medio plazo debido a sus costes.

También se espera que se produzcan avances sustanciales en los medios de pago, ya que estos **canales digitales de pago**, que utilizan Internet móvil, podrían ser adoptados como un medio de pago en Europa. Los pagos sin contacto a través de un teléfono móvil, utilizando tecnología NFC, permiten mejores transacciones sin dinero en efectivo. Las viñetas RFID, una tecnología NFC,

también se corresponden con las prestaciones de DSRC en la red de carreteras interurbanas. Éstas son significativamente más baratas que otros dispositivos OBU y mantienen también la privacidad. Al eliminar el manejo de efectivo y reducir los costes de transacción de estos pagos, esta tecnología podría permitir a los usuarios pagar por el uso de las carreteras sin necesidad de una cuenta de peaje. Muchos expertos afirman que, mediante el uso de la tecnología NFC, los teléfonos inteligentes facilitarán el paso a un cobro de peaje totalmente electrónico. De la misma manera, una opción adicional incluiría la instalación de un dispositivo similar a un chip de teléfono móvil dentro del vehículo, con el fin de determinar la distancia recorrida por el vehículo y calcular la cantidad a ser pagada.

Entre las tecnologías mencionadas anteriormente, el sistema eCall es obligatorio en todos los vehículos nuevos desde 2018. Los **sistemas UBI y EDR** son cada vez más populares y se instalan en un número cada vez mayor de vehículos nuevos. La unión de estas tecnologías en un dispositivo tendría un impacto significativo en los costes para todos los sistemas. A este respecto, diferentes informes, como Ingenico (2013), sugieren que alrededor de 50 millones de vehículos en Europa habrán adoptado el sistema UBI a finales de década.

Todos estos acontecimientos conllevan un impacto directo en cómo los vehículos interactúan con su entorno. Es poco probable que estos dispositivos entren en conflicto entre sí, ya que se basan en normas comunes, pero la forma en que interactúan y trabajan juntos es un aspecto importante a determinar. Como resultado, antes de considerar otros desarrollos tecnológicos en los campos del telepeaje, será necesario entender cómo las tecnologías disponibles pueden ser explotadas para garantizar un OBU común, interoperable y barato.

5.3.3 Análisis comparativo

En esta sección **se analizan comparativamente las diferentes tecnologías** de telepeaje descritas anteriormente. Con el fin de desarrollar un examen amplio y generalizado de las opciones de telepeaje, se evalúa el rendimiento de las tecnologías de cobro de peaje disponibles de acuerdo a diferentes cuestiones estrechamente relacionadas con la implantación y operación de un sistema de peaje. Los costes, la interoperabilidad, la precisión, la protección de datos, la aplicación y la obsolescencia son los aspectos que se tienen en cuenta para el análisis.

Finalmente, se desarrolla un **análisis D.A.F.O.**, de acuerdo con el procedimiento tradicional propuesto por la Universidad de Stanford. Como ha señalado Fertel et al. (2013), el análisis D.A.F.O. sirve de apoyo a las actividades de investigación como herramienta para fines de planificación y revisión. A través de esta herramienta, se presentan las principales fortalezas,

debilidades, oportunidades y amenazas relacionadas con cada una de las tecnologías aceptadas por la Directiva (UE) 2019/520 (véase la Tabla 3). También ayuda a establecer un vínculo entre la consecuente revisión descriptiva de las tecnologías actuales y el análisis comparativo de las opciones de sistemas de telepeaje.

5.3.3.1 Costes

El coste de la instalación y, posteriormente, el funcionamiento de un sistema de peaje es una de las cuestiones más importantes que afectan el desarrollo del SET. Este aspecto puede variar significativamente entre las opciones de telepeaje, debido principalmente a la tecnología instalada en la carretera, los OBU y la gestión requerida por cada tecnología.

En cuanto a la infraestructura auxiliar, los sistemas DSRC y RFID habituales requieren la instalación de costosas infraestructuras fijas en la carretera (pórticos). Esto limita en gran medida su flexibilidad para modificar la red de peaje y hace que el sistema sea rentable sólo en aquellas carreteras con altos niveles de tráfico. Además, se necesita una inversión importante de capital para cubrir la red vial correctamente, sobre todo cuando se tienen muchas entradas y salidas. Por el contrario, las opciones de localización por satélite y de comunicaciones móviles son menos costosas desde el punto de vista de la infraestructura, aunque requieren un mayor nivel de inversión durante la fase de puesta en marcha debido al coste de puesta en marcha del sistema central. En cuanto a otras tecnologías, la ANPR necesita equipos de vía menos costosos, mientras que la inversión en infraestructuras de la tecnología basada en el tacógrafo se limita a las estaciones fronterizas y pórticos de aplicación, por lo que está altamente correlacionada con la forma de la zona de peaje.

A la hora de analizar los costes, uno de los principales problemas detectados en la investigación fue la falta de información pública y oficial sobre los costes de instalación y mantenimiento de los sistemas de cobro electrónico de peaje. Sin embargo, es posible establecer una comparativa entre los sistemas basados en la necesidad de infraestructura auxiliar en la carretera, DSRC y RFID, y los sistemas, como los basados en la comunicación vía satélite y móvil, que no precisan de dicha infraestructura.

Así, los primeros sistemas tienen unos costes aproximados de instalación de entre 100.000 y 200.000 euros por km (Department of Transportation of Texas, 2018). La variación del precio depende del número de enlaces de la carretera en cuestión ya que, a mayor densidad de enlaces, es necesario un mayor número de pórticos para una correcta tarificación. En lo referente a los

costes de mantenimiento, estos oscilan entre los 25.000 y 70.000 euros por km al año (Pietrzyk, 2010).

En cuanto a los sistemas basados en la comunicación vía satélite y móvil, los datos provienen del Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital de Alemania (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2019). Así, para un sistema de estas características, los costes de instalación son de 30.000 euros por km y los de mantenimiento de 17.000 euros por km y año. Es importante señalar que estos costes son los relacionados directamente con los sistemas de cobro electrónico de peajes y no incluyen los costes de amortización de la constelación de satélites e infraestructura de comunicación móvil.

Con respecto al OBU utilizado dentro del sistema, tecnologías como el ANPR y teléfono móvil no requieren dispositivos en los vehículos, lo que permite menores costes de inversión iniciales para los usuarios. Otras tecnologías como las DSRC y GNSS requieren dispositivos OBU que pueden representar un coste importante para los conductores, y especialmente en el sistema basado en el tacógrafo. Por otra parte, el coste de estos sistemas podría reducirse mediante la aplicación de un intercambio paneuropeo de los datos del vehículo y del conductor, así como el establecimiento de normas comunes para los datos requeridos como prueba en caso de fraude.

Hoy en día la flexibilidad económica es esencial para la creación de una red de tarificación vial. De esta manera, la tecnología DSRC permite una mayor liberalización en relación con los proveedores de OBU y una primera generación de ingresos, ya que el sistema (pórticos de peaje) se puede instalar de forma gradual. Por otra parte, las tecnologías GNSS y GSM permiten la definición y modificación de las características de la red de peaje sin efectuar las inversiones adicionales.

El OBU y la infraestructura auxiliar situada en la carretera probablemente mantengan sus costes a un nivel bastante similar en el futuro próximo. Sin embargo, es esperable que la futura migración a 5G ofrezca menores costes por paquete de datos transmitidos y una mayor calidad.

5.3.3.2 Interoperabilidad

Uno de los problemas más importantes relacionados con el sistema de cobro de peaje electrónico es la falta de interoperabilidad transnacional observado en Europa. Como se ha señalado anteriormente, este hecho conduce a costes significativos para el mercado de la UE y aumenta el riesgo de no captar los evasores del peaje. Por lo tanto, los principales desafíos y

oportunidades en la UE se refieren a la adopción de las tecnologías comunes e interoperables entre los Estados miembros.

La tecnología DSRC presenta varias amenazas relativas a la aplicación del SET. La interoperabilidad de doble dirección con otras tecnologías de telepeaje todavía no se ha logrado debido a las limitaciones del OBU. Sin embargo, una mayor integración de los sistemas DSRC europeos es factible a través de la existencia de normas CEN comunes. También es importante tener en cuenta que más de 10 millones de OBUs ya están en funcionamiento en Europa, por lo que cambiar todas estas unidades implicaría un coste significativo. Por el contrario, la tecnología GNSS está bien situada para garantizar la interoperabilidad, aunque en la actualidad no está muy extendida. Así, se necesitan más actuaciones para asegurar la interoperabilidad con los sistemas DSRC existentes.

Los sistemas basados en el tacógrafo, tal como se aplica actualmente, tienen difícil adaptación a una estrategia europea sobre los sistemas de cobro electrónico de peajes y no parecen una opción adecuada para el SET. Por otra parte, la principal debilidad del GNSS radica en los altos costes de puesta en marcha, las cuestiones relativas a la protección de datos, la cobertura y pérdida de señal, y la falta de normas técnicas para hacer que la interoperabilidad transnacional sea posible con los dispositivos GNSS.

Las oportunidades para mejorar la interoperabilidad pueden provenir de tecnologías emergentes como CVIS y CALM, o aplicaciones como eCall. La unión de estas tecnologías en un único dispositivo tendría un impacto significativo sobre la interoperabilidad de todos los sistemas.

Como se ha observado en el estudio de diferentes experiencias nacionales, la interoperabilidad, además de ser técnica, también debe ser comercial. El desarrollo de sistemas de carreteras de peaje de flujo libre (*free-flow*) es una de las grandes ventajas del telepeaje. Sin embargo, la existencia de diferentes empresas concesionarias, competidoras entre sí en el mercado, hace difícil la colaboración entre ellas. En este contexto, establecer un sistema común implica compartir información con los competidores, lo que se considera un elemento estratégico de cada empresa y que, consecuentemente, hace que un acuerdo común sea más difícil. Además, la integración del sistema requiere que diferentes concesionarios acepten la creación de una plataforma integrada, coordinada por la Administración Pública o por los propios concesionarios, para liquidar sus cuentas y realizar la acción comercial.

5.3.3.3 *Precisión y protección de datos*

Conseguir un alto índice de precisión en el cobro de peajes es una de las principales preocupaciones de los operadores de carreteras, con el fin de asegurar la rentabilidad económica de los proyectos de carreteras. Sin embargo, alcanzar el 100% de exactitud todavía no es factible con los sistemas actuales. El DSRC muestra el mejor rendimiento a este respecto, ya que su tasa de error es generalmente inferior a 0,1 ‰. Sin embargo, tiene un bajo nivel de adaptabilidad a pesar de las normas CEN disponibles. En cuanto a la tecnología basada en satélites, se espera que futuras mejoras en la cobertura de los satélites mejoren su rendimiento de manera significativa. Con el fin de trabajar de manera efectiva, el OBU tiene que tener un mínimo de cuatro satélites visibles. Aunque esto no siempre es posible hoy en día, la completa puesta en servicio del sistema Galileo mejorará la precisión global.

Por otra parte, el ANPR es una tecnología madura y altamente automatizada, y no limita a circular a ciertas velocidades debido al desarrollo tecnológico de la cámara. Las mejoras tecnológicas han permitido también que un mayor volumen de tráfico pueda ser controlado simultáneamente, logrando ratios de lectura de hasta el 99,5%. Otras opciones disponibles, como el tacógrafo y RFID pueden garantizar un nivel de precisión superior al 99%.

Por el contrario, el telepeaje a través de las comunicaciones móviles no es todavía una tecnología madura, quedando por abordar aspectos como la duración de la batería, la penetración de este tipo de teléfonos entre la población, la falta de normas y la incapacidad del sistema para identificar el tipo y la categoría de los vehículos. Un obstáculo potencial para el desarrollo de los servicios de teléfonos móviles es la gestión de datos relacionada con la capacidad de las redes móviles para seguir la posición del usuario.

El desarrollo del peaje electrónico proporcionará cantidades masivas de datos detallados, tanto de carácter personal como en tiempo real sobre los desplazamientos. Para los usuarios de la vía, la privacidad es un factor crítico que puede disuadir a los conductores de adoptar un OBU, independientemente de sus ventajas (Ogden, 2001). A este respecto, el proveedor de servicios debe utilizar la cantidad mínima de datos de localización, o emplear un protocolo criptográfico (Balasch et al., 2010). Las tecnologías ANPR y satelital pueden permitir el reconocimiento o el seguimiento continuo de los conductores. Por el contrario, no parece que el DSRC, RFID y tecnologías basadas en el tacógrafo puedan afectar a la privacidad del usuario.

5.3.3.4 *Enforcement*

Uno de los principales problemas relacionados con un sistema de peaje de flujo libre es el control efectivo del pago de los peajes por parte de los usuarios de la autopista, lo que en la literatura especializada se denomina *enforcement*. En aquellas carreteras de peaje que operan con tecnologías de telepeaje de flujo libre, el problema no puede resolverse mediante el uso de barreras, por lo que requiere la implementación de mecanismos de *enforcement* fiables para identificar a los evasores del peaje y garantizar el pago de peajes. Una solución podría ser la promoción del intercambio de datos sobre el registro y la evasión a través de una base de datos paneuropea, a través de medidas establecidas en el Marco de Seguridad EFC (Tren, 2006).

Entre las tecnologías más adecuadas para estos fines, se encuentra la ANPR, un sistema flexible que se ha combinado con frecuencia con otras opciones de telepeaje. Sin embargo, la falta de estandarización de la matrícula y los desafíos para la cooperación transnacional en la creación de una base de datos internacional de la matrícula, llevan a considerar que el este sistema todavía no es una opción flexible y adaptable. Otro problema detectado es que algunos conductores están utilizando técnicas para evitar la lectura de las matrículas por parte del sistema de reconocimiento, por lo que estos vehículos son muy difíciles de detectar y sancionar. Asimismo, la revisión humana es, y seguirá siendo, necesaria para mejorar el índice de precisión de esta tecnología, lo que se traducirá en costes adicionales de operación manual (Hsu et al., 2013).

El uso de las tecnologías de telepeaje para la identificación de evasores se debe complementar con recursos humanos, como el despliegue de controles de policía junto a las carreteras de peaje. La necesidad de estos controles policiales también queda patente por el hecho de que en numerosos países únicamente los cuerpos policiales tienen la competencia para imponer multas y detener el vehículo en caso de que sea necesario. A este respecto, es muy aconsejable que las autoridades de la UE normalicen las diferentes leyes nacionales de aplicación y creen una legislación europea específica en esta materia.

En el ámbito del *enforcement* es esencial diseñar e introducir un marco técnico, legal y administrativo para identificar la evasión de peajes y proceder en consecuencia. Esto requiere la implicación y la coordinación de todos los actores públicos involucrados en la gestión vial: las administraciones públicas, los tribunales de justicia, los cuerpos de seguridad y la legislación vigente. En este sentido, la Unión Europea ha avanzado hacia una mayor colaboración internacional para facilitar el intercambio transfronterizo de datos procedentes de los registros

de matriculación de vehículos sobre los vehículos y los propietarios o titulares de vehículos relacionados con el impago de cánones de carretera de cualquier tipo en la Unión.

5.3.3.5 Obsolescencia

Para evaluar qué tecnologías de telepeaje podrían desempeñar un papel más relevante en el futuro, es importante comprender el grado de obsolescencia de las tecnologías actuales. Así, el DSRC es la tecnología más ampliamente adoptada y empieza a mostrar los primeros signos de obsolescencia (Barbaresso & Johnson, 2014; Lu et al., 2010). El telepeaje a través de la localización por satélite aún se está desarrollando a través de un mejor procesamiento de la señal y la mejora de la cobertura del satélite, lo que permitirá reducir costes y, en consecuencia, tarificar amplias áreas a través del uso de la zonificación efectiva y la tecnología de mapeo. Esto significa que el cobro basado en GNSS todavía tiene un gran potencial tanto en peaje interurbano como dentro de las ciudades.

Por otro lado, no se espera que la tecnología ANPR experimente avances sustanciales. Dada la creciente adopción de la tecnología ANPR para usos de vigilancia y control, es poco probable que llegue a ser obsoleta en las siguientes décadas. Sin embargo, las mejoras en la tecnología de las cámaras pueden hacer que determinados componentes específicos de la tecnología ANPR puedan quedar obsoletos.

En contraste con las tecnologías de telepeaje anteriores, el sistema GSM está sujeto a amenazas significativas debido a la volatilidad de la tecnología basada en las telecomunicaciones y su rápido desarrollo tecnológico. Los sistemas actuales basados en GSM pueden llegar a ser obsoletos en un futuro próximo, ya que la mayor parte del tráfico de comunicaciones móviles en Europa ahora está usando 3G y 4G. Además, conviene tener en cuenta el ritmo al que se mueve la industria. Es importante señalar que las soluciones de telepeaje deben ser desarrolladas con el objetivo de permitir mejoras de bajo coste cuando el equipo se vuelva obsoleto. Teniendo en cuenta esta obsolescencia, la Comisión Europea emprendió una reforma de la Directiva SET que ha sido aprobada en marzo de 2019, con el objetivo de examinar, entre otros temas, la referencia a la tecnología de comunicaciones móvil. Así, es altamente recomendable insertar una declaración más general sobre el uso de las comunicaciones disponibles, de tal forma que permita incorporar estas adaptaciones tecnológicas.

5.3.3.6 Integración de servicios

De una manera similar a otros dispositivos tecnológicos, los sistemas tratan de ofrecer una mejor experiencia y servicios complementarios a los usuarios. De ese modo, los servicios de telefonía

móvil pueden ofrecer una mejor experiencia, fácil uso para definir y modificar los métodos y tiempo de los pagos, y una fácil integración con otras tecnologías de peaje y servicios para el conductor. Otras ventajas hacen referencia a la posibilidad de compartir tanto la infraestructura de peaje como el OBU con otras aplicaciones y ofrecer nuevos servicios de valor añadido, como la navegación bordo (Lamy, 2012). Sin embargo, otras tecnologías como el tacógrafo o ANPR no pueden proporcionar nuevos servicios de valor añadido a los usuarios de la carretera, ya que en ellos no se identifica la ubicación del vehículo.

Los desarrollos tecnológicos de la comunicación inalámbrica están empujando los sistemas de transporte inteligente hacia un presente y un futuro cada vez más influyente y decisivo. Los vehículos interconectados no sólo recogen información sobre sí mismos y su entorno, sino que también intercambian esta información en tiempo real con otros vehículos cercanos (Papadimitratos et al., 2009). Estos avances tecnológicos permitirán a las aplicaciones avanzar en tres direcciones principales: la seguridad del transporte, la eficiencia del transporte y los servicios al usuario integrados en el vehículo. Dado que los sistemas de telepeaje son parte de ITS, la calidad de estos servicios adicionales está mejorando constantemente el sector transporte.

5.4 Análisis D.A.F.O.

Para finalizar este epígrafe, se desarrolla un análisis D.A.F.O. –Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades– con las tres tecnologías recogidas en la ‘Directiva 2004/52/CE: interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras de la Unión Europea’: DSRC (tecnología de microondas a 5,8 GHz), localización por satélite y comunicación móvil, de acuerdo con el procedimiento clásico propuesto por la Universidad de Stanford.

Como señalaron Fertel et al. (2013), el análisis D.A.F.O. se emplea habitualmente en el ámbito de la investigación científica como herramienta de planificación y toma de decisiones. A través del análisis D.A.F.O. se presentan las principales fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas relacionadas con esas tecnologías. Tal y como se puede observar en la tabla siguiente (Tabla 3), el análisis D.A.F.O. muestra que a día de hoy es difícil afirmar que una tecnología en concreto sea claramente más ventajosa que otra. De esta forma, se puede decir que todas las tecnologías analizadas presentan ventajas e inconvenientes, y serán más o menos adecuadas para un país o región específica en función de diversos aspectos, como las características de la red, el volumen de tráfico o la interoperabilidad con otros sistemas, entre otros.

El análisis deduce que la tecnología DSRC tiene la **fortaleza** de ser una tecnología ampliamente utilizada, con bajos costes de operación y sencilla desde el punto de vista técnico. Esto conlleva a que sea un sistema probado, que cuenta con estándares CEN, y con gran implantación entre los conductores y operadores de carreteras de peaje. La comunicación por satélite tiene la flexibilidad como su gran fortaleza. Así, su implantación y potencial ampliación es rápida y sencilla, siendo sus costes de mantenimiento escasos. Por su parte, el peaje a través de las comunicaciones móviles no precisa de un OBU específico, como las anteriores, ya que emplea el teléfono móvil del usuario. Al igual que la comunicación por satélite, se trata de una tecnología flexible y que no requiere grandes inversiones en infraestructura física en las inmediaciones de la carretera.

En cuanto a las **debilidades** de que presentan las tecnologías analizadas, el DSRC precisa la instalación de pórticos a lo largo de la carretera en los que instalar las antenas. Esto da lugar a altos costes, tanto de instalación como de mantenimiento, dificultad de modificar la red a tarificar o la falta de espacio para su instalación en el ámbito urbano. La comunicación por satélite presenta importantes costes de instalación y la necesidad de una planificación detallada antes de comenzar a ejecutar el sistema. Además, es una tecnología poco utilizada y madura que puede dar lugar a errores de precisión en ciertas secciones de la carretera, como túneles.

Tabla 3. Análisis D.A.F.O. de los sistemas de telepeaje en el ámbito de la Unión Europea

TECNOLOGÍA	FORTALEZAS	DEBILIDADES	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
DSRC	Tecnología ampliamente empleada, sencilla técnicamente y probada.	Necesidad de instalar infraestructura física (pórticos) a lo largo de la carretera.	Posibilidad de proporcionar otros servicios a través del OBU: información de tráfico, control de velocidad, etc.	La creación de un sistema de peaje centralizado puede ser extremadamente difícil.
	Estándares CEN disponibles.	Altos costes de mantenimiento de la infraestructura.	Interoperabilidad más fácil con las autopistas de peaje existentes.	Baja coordinación internacional del enforcement y transacciones.
	Alta fiabilidad y rendimiento con una baja interferencia de señal (sin pérdida de señal en túneles).	Dificultad de modificar la red de peaje una vez desarrollada.	Mayor control del sistema de peaje y de los ingresos por parte de las AAPP.	Poco rentable en vías de poco tráfico.
	Costes bajos para los usuarios (OBU) y Administraciones (de operación).	Altos costes en carreteras con muchas intersecciones.	-	-
	Gran número de OBUs tipo DSRC actualmente en funcionamiento.	En ámbitos metropolitanos, falta de espacio para la infraestructura.	-	-
Localización por satélite	Flexibilidad para definir y modificar la red sometida a pago por uso.	Importantes costes iniciales (OBU, oficina central, etc.) en comparación con otras tecnologías.	Posibilidad de crear un único sistema de cobro de peaje electrónico centralizado a nivel europeo.	Alcance de interoperabilidad con los sistemas de peaje existentes.
	Facilidad para ampliar a otras carreteras y regiones el peaje.	Tecnología poco utilizada y menos madura que otras.	Posibilidad de proporcionar otros servicios a través del OBU: información de tráfico, control de velocidad, etc.	Posible rechazo de los estados a que se cree un sistema de peaje europeo.
	Inversiones reducidas en infraestructura física de peaje.	Mayores costes de operación debido a las comunicaciones GNSS.	Mejor rendimiento y precisión con la implementación del sistema de navegación GALILEO.	Dificultad en asegurar la protección de datos de los usuarios debido a la cantidad de información recopilada.
	Una vez instalado, es un sistema cuyo mantenimiento es poco costoso.	Necesidad de una planificación detallada antes de comenzar a ejecutar el sistema.	Interoperabilidad alcanzada con otras tecnologías de peaje (DSRC).	-
	-	Errores de precisión en ciertas secciones de la carretera. La señal del satélite puede perderse (necesidad de dispositivos adicionales).	Buenos rendimientos comerciales en carreteras con tráfico bajo.	-
Comunicaciones móviles	Flexibilidad para definir y modificar la red sometida a pago por uso.	Baja duración de la batería del dispositivo.	Posibilidad de crear un único sistema de cobro de peaje electrónico centralizado a nivel europeo.	Dificultad en asegurar la protección de datos de los usuarios debido al uso de la red móvil.
	Inversiones reducidas en infraestructura física de peaje y mantenimiento poco costoso.	No hay datos probados sobre la precisión en ciertas secciones de la red.	Mejoras tecnológicas continuas en el sector (5G).	Posible rechazo de los estados a que se cree un sistema de peaje europeo.
	Sin necesidad de OBU específico (es el teléfono móvil del usuario)	Necesidad de una planificación detallada antes de comenzar a ejecutar el sistema.	Posibilidad de integrar el telepeaje con otros servicios al usuario.	Tecnología poco utilizada y menos madura que otras (no hay estándares disponibles).
	Interoperabilidad con otras tecnologías de cobro electrónico de peajes.	Uso desigual de teléfonos móviles e inteligentes en el conjunto de la sociedad.	Interfaz clara y sencilla.	Posibilidad de volverse obsoleto rápidamente dados los avances tecnológicos en el sector.

Elaboración propia

El cobro electrónico de peajes a través de la comunicación móvil tiene como gran debilidad el uso desigual de los teléfonos móviles e inteligentes en el conjunto de la sociedad. Asimismo, la baja duración de la batería de estos dispositivos también se presenta como una debilidad. Asimismo, no hay datos probados sobre la precisión en ciertas secciones de la red, por lo que existe la necesidad de realizar una planificación detallada antes de comenzar a ejecutar el sistema.

La principal **oportunidad** de la tecnología DSRC es la fácil interoperabilidad con las autopistas de peaje existentes en la actualidad. Además, permite un mayor control del sistema de peaje y de los ingresos por parte de las administraciones públicas. En cuanto a la comunicación por satélite, su gran oportunidad, compartida también por las comunicaciones móviles, es la posibilidad de crear un único sistema de cobro de peaje electrónico centralizado a nivel europeo. Asimismo, es un sistema que presenta buenos rendimientos comerciales en carreteras con tráfico bajo y que ya ha alcanzado la interoperabilidad con la tecnología DSRC. Las comunicaciones móviles presentan grandes oportunidades en un futuro cercano debido a las continuas mejoras tecnológicas, como el caso del 5G. Además, tiene una interfaz clara y sencilla que facilita su uso. Es importante comentar que las tres tecnologías presentan la posibilidad de proporcionar servicios adicionales a través de los dispositivos de pago, como información sobre el tráfico en tiempo real o control de velocidad, entre otros.

Por último, entre las principales **amenazas** que comprometen el futuro del DSRC es que la creación de un sistema centralizado puede ser extremadamente difícil. Además, es poco rentable en vías de poco tráfico. La comunicación por satélite presenta una gran dificultad en asegurar la privacidad y la protección de los datos de los usuarios debido a la cantidad de información recopilada. Asimismo, el sistema de comunicaciones vía satélite se basa actualmente en el sistema GPS, controlado por Estados Unidos. Este hecho puede provocar un posible rechazo de los Estados europeos. Las comunicaciones móviles también muestran problemas a la hora de asegurar la privacidad de los usuarios. Además, esta tecnología presenta la posibilidad de volverse obsoleto rápidamente, dados los avances tecnológicos en el sector.

Las conclusiones y consecuencias de los resultados del análisis D.A.F.O. realizado a las tecnologías de cobro electrónico de peajes se desarrollan en el capítulo 7, dedicado a las conclusiones y recomendaciones.

6. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS

6.1 Presentación

El segundo pilar de la presente tesis doctoral es la visión centrada en los usuarios de los sistemas de cobro electrónico de peajes. Con este análisis se pretende analizar la percepción de los usuarios de las autopistas de peaje con respecto a los sistemas de telepeaje. En este sentido, es conveniente señalar la importancia de conocer la opinión de los usuarios para alcanzar una mayor aceptabilidad de las medidas incorporadas en el ámbito del transporte. Así, este segundo análisis complementa al anterior centrado en las tecnologías, aportando en su conjunto una visión global de los sistemas de cobro electrónico de peajes.

Este análisis pretende proporcionar una visión completa y exhaustiva de los factores explicativos que influyen en la adopción y uso del telepeaje por parte de los usuarios de las autopistas de peaje. Con ese fin, se desarrollan dos modelos econométricos de tipo logit. Este análisis se lleva a cabo a partir de una encuesta nacional realizada a usuarios de autopistas de peaje. Para ello, se ha tomado a España como elemento de estudio. Este país puede considerarse un caso representativo de una red que comprende carreteras de alta capacidad gratuitas y de peaje. Además, España tiene una red de peaje asimétricamente repartida por el país, ya que, entre otras razones, la mayoría de la población se concentra en determinadas regiones, lo que hace que la densidad de infraestructuras en dichas regiones sea mayor. Además, el propio desarrollo histórico de la red de carreteras también influye notablemente en la situación actual de la red de autopistas de peaje y en la percepción de los usuarios hacia dichas infraestructuras.

La estructura seguida a la hora de presentar y analizar el caso es la misma que la seguida en el análisis sobre la visión tecnológica del telepeaje. En primer lugar, se desarrolla una breve presentación del caso, con los principales elementos del mismo, así como la justificación de su elección. En segundo lugar, se analizan los datos de la encuesta realizada a los conductores de la red de autopistas de peaje de España. Posteriormente, se acomete el análisis sobre la percepción de los usuarios hacia los sistemas de cobro electrónico. Para ello, se obtienen algunos hallazgos preliminares sobre el conocimiento previo de los usuarios de los sistemas de telepeaje. A continuación, se muestran los resultados del modelo con respecto a la adopción por parte de los conductores de los dispositivos de telepeaje. Además, se analiza la disposición de los conductores a usar las autopistas con más frecuencia en relación a una medida concreta que podría plantearse, como sería que los dispositivos de pago electrónico se proporcionaran de forma gratuita.

6.2 Datos

La metodología de este segundo análisis se basa en una encuesta a escala nacional realizada en España para identificar las variables clave que determinan la adopción por parte de los usuarios de dispositivos electrónicos de telepeaje. Sobre la base de estos datos, se desarrolla un marco de elección multinivel.

6.2.1 Encuesta a usuarios de la red española de carreteras de peaje

Con el fin de explorar la adopción y la opinión de los usuarios hacia los sistemas de cobro electrónico, se han empleado los datos de una encuesta nacional realizada en diferentes autopistas interurbanas españolas. Esta encuesta comprende una muestra aleatoria de 3.043 usuarios de autopistas (frecuentes, ocasionales y potenciales), entrevistados entre octubre y noviembre de 2012, de lunes a domingo, para obtener una muestra representativa. Los datos se obtuvieron a partir de entrevistas personales en áreas de servicio, áreas de peaje y estaciones de servicio (para usuarios frecuentes y ocasionales); y cuestionarios telefónicos para usuarios potenciales, es decir, personas que no utilizan la red de peaje a pesar de vivir cerca de ella. Así, el reparto de dichas entrevistas es de un 13% presenciales y 87% telefónicas.

La encuesta, realizada por el Instituto Opinometre en el ámbito del proyecto OASIS, tiene un nivel de confianza del 95% y su población son los residentes de las Comunidades Autónomas analizadas (Cataluña, Madrid, Comunidad Valenciana, País Vasco y Galicia) mayores de 18 años y con carnet de conducir.

Entre otras cuestiones, los encuestados informaron si utilizaban dispositivos que permitían el pago electrónico en carreteras de peaje. Más detalles sobre las preguntas que se abordan en la encuesta se pueden encontrar en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4. Preguntas y respuestas planteadas por la encuesta

VARIABLE		PREGUNTA FORMULADA	POSIBLES RESPUESTAS
Características Socioeconómicas	Sexo	-	Hombre
			Mujer
	Edad	¿Su edad se encuentra...?	Menos de 24 años
			Entre 24 y 34 años
			Entre 35 y 49 años
			Entre 50 y 64 años
			Más de 64 años
	Región de residencia	-	Cataluña
			Madrid
			Comunidad Valenciana
			País Vasco
			Galicia
	Salario	¿Su salario anual se encuentra...?	Menos de 20.000 €
			Entre 20.000 y 30.000 €
			Entre 30.000 y 50.000 €
			Más de 50.000 €
			No contesta
Características relacionadas con los viajes	Tipo de vehículo	-	Turismo
			Furgoneta
			Pesado (camión + bus)
	Viaje más frecuente	¿Qué viaje realiza con mayor frecuencia cuando usa autopistas de peaje?	Urbano
			Media distancia
			Larga distancia
	Frecuencia	¿Con qué frecuencia usa autopistas de peaje?	Usuario frecuente (>8 viajes al mes)
			Usuario ocasional (<8 viajes al mes)
			Usuario potencial (no las ha usado)
	Propósito del viaje	¿Con qué propósito de viaje utiliza autopistas de peaje?	Ir a trabajar a diario (commuting)
			Negocios
			Fin de semana
			Vacaciones
Variables de Actitud	Percepción de los peajes	En su opinión, los peajes son...	Baratos
			Caros
	Percepción del ahorro en el tiempo de viaje	En su opinión, ¿el uso de autopistas de peaje le supone un ahorro considerable de tiempo?	Sí
			No
			Indiferente
	Conocimiento del telepeaje	¿Conoce el sistema Vía-T?	Sí
			No

Elaboración propia

La encuesta se centra en aquellas regiones con una mayor densidad de autopistas de peaje. En particular, se seleccionan cinco regiones españolas —Cataluña, Comunidad Valenciana, Galicia, Madrid y País Vasco— para el análisis. Como puede verse en la Tabla 55, comprenden alrededor del 60% de la red de peaje española. La red analizada incluye áreas con carreteras de peaje en operación desde hace décadas y otros territorios con secciones de peaje más recientes. Además, como se mencionó anteriormente, todas las autopistas de peaje en España tienen una vía paralela no tarifada disponible, cuya calidad puede variar mucho según la región observada. En este punto, debe señalarse que mientras que las carreteras con peaje en Madrid suelen competir con vías de gran capacidad, en otras regiones como el País Vasco o Cataluña, la ruta alternativa generalmente tiene características mucho más pobres.

Tabla 5. Datos de la red de carreteras de alta capacidad y red de autopistas de peaje en las regiones analizadas

LUGAR	SUPERFICIE (10 ³ km ²)	RED DE ALTA CAPACIDAD (km)	RED DE PEAJE (km)	% PEAJES
España	504,6	17.163	3.039	17,7
País Vasco	7,2	643	248	38,6
Cataluña	32,1	1.572	631	40,1
Galicia	29,6	1.120	327	29,2
Madrid	8,0	991	161	16,2
Comunidad Valenciana	23,2	1.420	367	25,8

Fuente: Informe 2017 sobre el sector de autopistas de peaje en España del Ministerio de Fomento (2019).

Como se mencionó anteriormente, este análisis tiene como objetivo identificar los factores explicativos que determinan el uso de los sistemas electrónicos de cobro de peajes por parte de los conductores. La adopción de estos dispositivos podría estar relacionada con una serie de factores, que se clasifican en general en tres grupos principales. El primer incluye características socioeconómicas (es decir, edad, sexo, ingresos, región de residencia o situación laboral). El segundo grupo cubre diferentes atributos relacionados con el viaje, como el tipo de vehículo, el propósito del viaje o la frecuencia de viaje. Finalmente, el tercer grupo comprende variables de actitud específicas para individuos, como su conocimiento previo sobre los sistemas electrónicos de cobro de peajes, sus percepciones y creencias respecto a las tasas de peaje y el ahorro de tiempo proporcionado por las infraestructuras de peaje, o sus beneficios personales de la política de peaje (Bueno et al., 2016). El cuestionario recolectó información de los individuos de estos tres grupos de variables.

La Tabla 66 resume las principales características de la muestra. Para una mejor comprensión de la misma, es necesario realizar una serie de aclaraciones. Así, la región de residencia se tiene en cuenta debido a la importancia de la densidad de las carreteras de peaje para explicar las posibles diferencias en la adopción de ETC por parte de los usuarios, ya que las carreteras de peaje están distribuidas asimétricamente entre las diferentes regiones de España debido que la población se asienta asimétricamente en el territorio (Gomez et al., 2015). Se espera que esta heterogeneidad influya en el uso de los dispositivos de telepeaje de los encuestados, dada una estructura tarifaria con posibles descuentos a usuarios habituales o la existencia de problemas de congestión en rutas paralelas libres. Con el fin de analizar adecuadamente las posibles diferencias regionales en la adopción del telepeaje por parte de los usuarios, se adopta una metodología multinivel, tal y como se explica más adelante. La encuesta también incluye atributos relacionados con el viaje, como el tipo de vehículo, la frecuencia de viaje o el propósito del viaje, que definen el objetivo y las características del viaje. Para los usuarios potenciales, el propósito del viaje no se incluyó, ya que este segmento de la muestra no utiliza carreteras de peaje.

El tercer grupo comprende variables de actitud y opiniones de los conductores con respecto a las carreteras de peaje, entre otras: las percepciones de las tarifas de peaje (si se percibieron como baratas o caras), los beneficios personales por la existencia de autopistas de peaje o las percepciones sobre el ahorro de tiempo de viaje que proporcionan las infraestructuras de peaje (si los conductores están satisfechos o no con la reducción del tiempo de viaje proporcionada por la carretera en relación con el peaje pagado). Este tipo de variables se han incluido en el análisis dada su importancia en la determinación de las posiciones individuales hacia los peajes y las reticencias ante el pago. Estos elementos ya han sido contemplados en muchas investigaciones anteriores, por ejemplo, Jain et al. (2016). Como se mencionó anteriormente, cada concesión de peaje en España tiene una vía paralela no tarifada disponible, cuyas características de calidad pueden variar mucho en cada caso. Este punto nos permite comparar las actitudes de los usuarios en función de la calidad de la alternativa sin peaje, ya que puede determinar las percepciones de los conductores en la medida en que aumenta la capacidad de evitar los peajes. Por esta razón, los factores de actitud, como las percepciones de los conductores sobre las tarifas de peaje, pueden desempeñar un papel importante, ya que la percepción de un peaje costoso puede estar relacionada con un menor uso de la carretera de peaje.

La tecnología adoptada en el sistema de telepeaje español no tiene la capacidad de rastrear la posición del usuario en ningún momento, ya que solo registra los pódicos de peaje cruzados cada mes por el dispositivo. Además, no se analiza una nueva tecnología por introducir en las carreteras, sino un sistema de telepeaje en funcionamiento durante décadas – el DSRC que emplea el servicio “Vía-T”.

Además, la encuesta incluye otra variable importante, que es el conocimiento previo de los conductores de la existencia de “tags” como un medio para pagar los peajes. Como se puede suponer fácilmente, si los conductores no tienen información acerca de la posibilidad de adquirir un “tag” casi nunca podrán responder sobre su opinión acerca de estos dispositivos. De la misma manera, si los conductores no conocen las características básicas y el funcionamiento de los dispositivos de telepeaje, no podrán dar una opinión fundamentada sobre su uso hipotético. La encuesta muestra que ambos problemas, el conocimiento previo de la existencia del telepeaje y el conocimiento básico sobre la operación del “tag” y los beneficios potenciales para los usuarios, están íntimamente relacionados con la densidad de las carreteras de peaje dentro de la región de residencia (ver Tabla 6).

Finalmente, la encuesta recopila otras variables con respecto a la disposición de los usuarios a pagar en autopistas interurbanas (Gomez et al., 2015) y la aceptabilidad de los usuarios hacia diferentes esquemas de carreteras (Bueno et al., 2016). La investigación también considera otros aspectos que pueden influir en las actitudes de los usuarios, como la tarificación y el tipo de infraestructura de peaje (túnel / sección interurbana).

La información recopilada de la encuesta se explota para determinar los factores explicativos que influyen en: i) la adopción de ETC por parte de los usuarios; y ii) la disposición de los usuarios a usar carreteras de peaje con mayor frecuencia si los “tags” se proporcionaran de forma gratuita. El objetivo de este último es explorar la efectividad de una opción de política dirigida a fomentar el uso de autopistas y promover la adopción de los sistemas de peaje electrónico, en línea con los objetivos de la Comisión Europea en el campo del transporte. Estas dos variables recopiladas en la encuesta constituyen los parámetros dependientes que se analizan a través de los modelos de elección desarrollados a continuación (consúltase el epígrafe 6.4).

Tabla 6. Resumen de las principales características de la encuesta

VARIABLE	SUBGRUPO	Nº DE RESPUESTAS	% DE LA MUESTRA
Características Socioeconómicas	Sexo	Hombre	51,3
		Mujer	48,7
	Edad	Menos de 24 años	5,4
		Entre 24 y 34 años	16,0
		Entre 35 y 49 años	41,7
		Entre 50 y 64 años	28,1
		Más de 64 años	8,8
	Región	Cataluña	20,0
		Madrid	19,8
		Comunidad Valenciana	20,3
		País Vasco	19,8
		Galicia	20,1
	Salario	Menos de 20.000 €	28,6
		Entre 20.000 y 30.000 €	34,8
		Entre 30.000 y 50.000 €	14,4
		Más de 50.000 €	3,4
		No contesta	18,8
Características relacionadas con los viajes	Tipo de vehículo	Turismo	89,3
		Furgoneta	7,2
		Pesado (camión + bus)	3,5
	Viaje más frecuente	Urbano	34,3
		Media distancia	48,7
		Larga distancia	17,0
	Frecuencia	Usuario frecuente (>8 viajes / mes)	69,0
		Usuario ocasional (<8 viajes / mes)	22,0
		Usuario potencial (no las ha usado)	9,0
	Propósito del viaje	Ir a trabajar a diario (communting)	27,8
		Negocios	10,9
		Fin de semana	24,4
		Vacaciones	17,5
		Otros	10,4
Variables de Actitud	Percepción de los peajes	Barato	14,0
		Caro	86,0
	Percepción del ahorro en el tiempo de viaje	Sí	81,2
		No	3,6
		Indiferente	15,2

Elaboración propia

Un primer análisis de la muestra resalta que una mayoría de los encuestados presenta edades comprendidas entre los 35 y los 49 años, e ingresos inferiores a los 30.000 euros anuales, sin olvidar el hecho de que aproximadamente el 20% de las personas encuestadas no informaron sobre su nivel de ingresos. En cuanto al tipo de vehículo utilizado, la encuesta muestra que una mayoría de los conductores son usuarios de automóviles (89,0%). Además, los desplazamientos diarios (27,8%) y durante los fines de semana (24,4%) son los propósitos de viaje más comunes en la muestra. Asimismo, una alta proporción de encuestados (69,0%) realizan más de 8 viajes al mes (usuarios frecuentes).

Con respecto a las preguntas que motivan la encuesta, la propiedad del dispositivo para abonar los peajes de forma electrónica y la disposición de los conductores a utilizar las carreteras de peaje con mayor frecuencia si dichos dispositivos se proporcionan de forma gratuita, los datos recogidos muestran que solo el 21,2% de las personas encuestadas poseían un “tag”, y alrededor del 50% de ellos utilizarían las carreteras de peaje con mayor frecuencia si dicho “tag” se proporcionara de forma gratuita.

6.2.2 La red de autopistas de peaje españolas

España tiene una de las redes viales de alta capacidad más extensas de Europa, con un total de 17.163 km (Ministerio de Fomento, 2018). Actualmente, la red de alta capacidad de peaje abarca 3.039 km, el 17,7% del total de la red de alta capacidad. Este hecho convierte a España en una de las redes nacionales de peaje de alta capacidad más extensas de Europa. Sin embargo, la red de peaje española no está distribuida homogéneamente en todo el país, ya que se concentra en un número limitado de regiones.

Figura 10. Mapa de las autopistas de peaje en régimen de concesión de España

Fuente: Informe 2017 sobre el sector de autopistas de peaje en España del Ministerio de Fomento (2019).

Como se mencionaba anteriormente, pocas regiones (principalmente Cataluña, la Comunidad Valenciana y Galicia) comprenden la mayor parte del total de carreteras de peaje del país. Si bien estas regiones tienen una red de peaje extendida, otras partes del país, como Extremadura o Cantabria, cuentan con la totalidad de las carreteras de alta calidad gratuitas. Además, es preciso señalar que todas las carreteras de peaje en España cuentan con una carretera paralela sin coste directo para el usuario, que normalmente es una carretera convencional con peores prestaciones. A este respecto, vale la pena mencionar que la calidad de la carretera paralela libre varía mucho para la red analizada, encontrando diferencias importantes entre las regiones. Por ejemplo, las secciones de peaje que compiten con las autopistas gratuitas son numerosas en regiones como Madrid, mientras que, en el País Vasco o Cataluña, la ruta alternativa suele ser una carretera convencional. Una descripción más amplia de la red de peaje en español se puede encontrar en Gomez et al. (2015).

Tabla 7. Datos de la red de autopistas de peaje en España (año 2018)

CARRETERA	TITULARIDAD	LONGITUD (km)	AÑO DE PUESTA EN SERVICIO
AG-55	Xunta de Galicia	32,5	Entre 1993 y 2016
AG-57	Xunta de Galicia	21,0	1999
AP-1	Diputaciones Forales de Álava y Guipúzcoa	46,6	Entre 2004 y 2009
AP-15	Com Foral de Navarra	105,1	Entre 1974 y 1980
AP-2	Ministerio de Fomento	215,4	Entre 1969 y 1977
AP-36	Ministerio de Fomento	125,2	2006
AP-4	Ministerio de Fomento	94,2	1972
AP-41	Ministerio de Fomento	48,1	2006
AP-46	Ministerio de Fomento	28,0	2011
AP-51	Ministerio de Fomento	24,0	2002
AP-53	Ministerio de Fomento	56,6	Entre 2002 y 2009
AP-6	Ministerio de Fomento	69,8	Entre 1963 y 2007
AP-61	Ministerio de Fomento	27,2	2003
AP-66	Ministerio de Fomento	78,1	1983
AP-68	Ministerio de Fomento	291,0	Entre 1975 y 1980
AP-7	Ministerio de Fomento	948,3	Entre 1969 y 2007
AP-71	Ministerio de Fomento	37,4	2002
AP-8	Diputaciones Forales de Vizcaya y Guipúzcoa	121,5	Entre 1971 y 2010
AP-9	Ministerio de Fomento	216,4	Entre 1979 y 2003
BI-626	Diputación Foral de Vizcaya	2,0	2002
BI-627	Diputación Foral de Vizcaya	1,5	2002
C-16	Generalitat de Cataluña	52,3	1996
C-32	Generalitat de Cataluña	99,7	Entre 1969 y 1998
C-33	Generalitat de Cataluña	14,0	1977
M-12	Ministerio de Fomento	10,5	2005
R-2	Ministerio de Fomento	56,5	2003
R-3	Ministerio de Fomento	30,7	2004
R-4	Ministerio de Fomento	52,8	2004
R-5	Ministerio de Fomento	32,0	2004

Fuente: Ministerio de Fomento (2018)

En relación con el sistema de cobro electrónico de peajes español “Vía-T”, el usuario debe adquirir un “tag” que esté vinculado a una cuenta bancaria o medio de pago con tarjeta de crédito. La tecnología DSRC empleada presenta ventajas significativas, como la gestión de datos, ya que tiene la capacidad de no rastrear la posición de los usuarios en cualquier momento, y, solo registra su paso por determinados puntos de la carretera en los que se sitúan los pórticos (plazas de peaje). Los transpondedores se comercializan principalmente a través de entidades bancarias, y el usuario tiene que pagar una tarifa anual de entre 35 y 50 euros por poseer el dispositivo. Respecto a la penetración de las tecnologías de peaje electrónico en España, 7.000 de los 17.500 usuarios diarios pagan electrónicamente, según Bip&Drive (2016).

Al igual que en otras naciones, los operadores de autopistas de peaje en España ofrecen descuentos para usuarios frecuentes, solo aplicables a los conductores que utilizan el sistema de telepeaje. La cuantía del descuento depende de la cantidad de pases realizados por la autopista en el mismo mes de acuerdo con los índices adoptados por los operadores privados de carreteras de peaje. También hay descuentos especiales para ciertos grupos, como autobuses de servicio regular, autobuses escolares o estudiantes de hasta 25 años. Estos descuentos son acumulativos con reducciones de peaje para uso frecuente. Como parece razonable, los beneficios de los descuentos por peaje son más relevantes en aquellas regiones con una mayor densidad de autopistas.

6.3 Técnica de análisis: Modelo de elección discreta

Como se mencionó anteriormente, este análisis realiza dos modelos de elección discreta para identificar los factores explicativos que determinan la adopción de pagos electrónicos en las carreteras de peaje por parte de los conductores. En particular, la investigación se centra en analizar: i) la adopción del cobro electrónico de peajes por parte de los usuarios; y ii) la disposición de los usuarios a usar carreteras de peaje con mayor frecuencia si los dispositivos se proporcionaran de forma gratuita. Para ello, se adopta un marco de elección discreta basado en un modelo logit. Los modelos de elección se utilizan con frecuencia para analizar las percepciones de los viajeros, pronosticar el comportamiento de estos en escenarios hipotéticos o para comprender la reacción y adaptación de los ciudadanos a diferentes fuentes de información (Train, 2003).

Los modelos de elección incorporan la teoría microeconómica del comportamiento del consumidor y el comportamiento de elección psicológica, que se utiliza con frecuencia en la investigación del transporte. Son modelos de maximización de la utilidad que suponen que los individuos eligen la alternativa con la mayor utilidad para ellos entre las opciones disponibles (Ben-Akiva & Bierlaire, 2003). La utilidad de cada elección se puede determinar mediante una serie de variables explicativas y se considera como la adición de dos componentes diferentes: variables observadas (V_{ik}), que son el componente sistemático o representativo de la utilidad; y componentes aleatorios (ε_{ik}), que comprenden el término idiosincrásico:

$$U_{ik} = V_{ik} + \varepsilon_{ik} = \beta_k X_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (1)$$

donde X_{ik} es un vector de variables explicativas que influyen en las elecciones individuales, y β_k representa un vector de parámetros que deben estimarse según el modelo (Louviere et al., 2008). Dada la naturaleza binaria (Sí / No) de las opciones a modelar, se ha adoptado un enfoque logit binario. Matemáticamente, según Gujarati (2003), la función de probabilidad que rige el modelo logit es la distribución logística:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-V_{ik}}} \quad (2)$$

Debido a la heterogeneidad, mencionada anteriormente, que podemos esperar en los resultados de la adopción de sistemas de telepeaje en las diferentes regiones españolas, así como otros problemas identificados por Gómez et al. (2016), el modelo también incorpora un enfoque multinivel además de la especificación logit, teniéndose, por tanto, un modelo logit multinivel. Este modelo representa una extensión de los modelos clásicos para superar la

correlación potencial entre las observaciones, causada por estructuras jerárquicas o anidadas en los datos que podrían ocurrir cuando, por ejemplo, se observan diferentes comportamientos de individuos a través de grupos (regiones). Este hecho podría significar que se viole el supuesto de observaciones independientes (Koppelman et al., 2006), lo que llevaría a la llamada "falacia atomista", con importantes consecuencias negativas en los resultados, como la mala interpretación y significados estadísticos espurios de las estimaciones de parámetros (Hox, 2002).

Basado en una estructura más compleja, las especificaciones multinivel consideran un modelo diferente para cada nivel de datos. Esto permite explorar la variabilidad intergrupar, en este caso las posibles diferencias de comportamiento entre los usuarios de diferentes regiones que pueden ser causadas por la diferente densidad de carreteras de peaje a lo largo de España. Para esta investigación, se aplica el enfoque estándar de varios niveles, basado en coeficientes aleatorios, que se ha descrito ampliamente en la literatura (de Leeuw y Meijer, 2007).

La modelización realizada en este caso de estudio considera una estructura de dos niveles (i-j), donde el subíndice i se relaciona con los individuos, mientras que j se refiere al nivel regional. Además, la ecuación comprende efectos aleatorios tanto en los parámetros de intercepción como de pendiente, lo que permite variaciones aleatorias entre las regiones (j), como se muestra a continuación:

$$Y_{ij}^* = \beta_{0(n)j} + \beta_{1(n)j} X_{1ij} + \dots + \beta_{p(n)j} X_{pij} + \varepsilon_{ij}; \quad (3)$$

$$\beta_{0(n)j} = \beta_{0(n)} + u_j ; \quad \beta_{p(n)j} = \beta_{p(n)} + u_j$$

donde $\beta_{0(n)j}$ es el modelo del intercepto, que consiste en un término fijo $\beta_{0(n)}$ y una variación aleatoria u_j entre las regiones, de manera similar a la de Papadimitriou et al. (2014). Por tanto, permite que los interceptos varíen aleatoriamente a nivel regional. De manera similar, $\beta_{1(n)j}$ es el coeficiente para la variable explicativa X_1 , permitiendo también la variabilidad entre regiones (j). En este sentido, un intercepto con aleatoriedad estadísticamente significativa con respecto a las regiones indica que las divergencias entre las respuestas se deben a diferencias regionales no observadas, y no solo a las diferencias entre los encuestados. Además, una pendiente aleatoria estadísticamente significativa con respecto a las regiones significa que la influencia de una determinada variable explicativa X_p varía significativamente entre regiones.

Como se hace comúnmente en las especificaciones multinivel, el modelo incorpora variables explicativas que influyen en la utilidad en dos niveles diferentes (véase la ecuación 4). A nivel

individual, se consideran tres tipos de parámetros dentro del enfoque de: características socioeconómicas personales (S); Atributos relacionados con el viaje (T), y actitudes generales sobre carreteras de peaje y sus características (A). La única variable explicativa incluida a nivel regional (R) se refiere a la abundancia de autopistas dentro de cada región, ya que podría influir significativamente en la adopción de los sistemas de ETC por parte de los usuarios. La utilidad (U_{ik}) lograda por un determinado individuo k de la región j para elegir la alternativa i se puede expresar de la siguiente manera:

$$U_{ijk} = f(S_{ik}, T_{ik}, A_{ik}, R_j) \quad (4)$$

Para analizar adecuadamente las diferencias regionales en la variable dependiente, se estima inicialmente un primer modelo (llamado "Modelo 0" o modelo base) para verificar la significancia estadística de los efectos aleatorios incluidos, es decir, en este caso, la presencia de diferencias estadísticas a través de las regiones. Los resultados del Modelo 0 se comparan posteriormente con el modelo completo, una vez incluidas todas las variables explicativas.

6.4 Resultados

Los resultados de este segundo análisis parten de la encuesta realizada a usuarios, reales y potenciales, de las autopistas de peaje en España detallada anteriormente. Los datos recopilados en la misma se han explotado para estimar dos modelos logit binarios. Como se ha señalado en esta tesis doctoral, en primer lugar, se analizarán algunos hallazgos preliminares sobre el conocimiento previo de los usuarios de los sistemas de telepeaje. A continuación, se muestran los resultados del modelado con respecto a la propiedad de los dispositivos de pago electrónico. Finalmente, se analiza la disposición de los conductores a usar las autopistas con más frecuencia si dichos dispositivos de pago electrónico se proporcionaran de forma gratuita.

6.4.1 Análisis preliminar: Conocimiento de los conductores de los sistemas de telepeaje

Antes de mostrar los resultados de los diferentes modelos, es importante analizar de forma preliminar los datos relativos al conocimiento previo de los conductores de los sistemas de telepeaje (consulte la Tabla 88). Como se puede observar, casi tres cuartos del total de encuestados (74,1%) expresaron su conocimiento de la existencia de los sistemas de cobro electrónico de peaje en España. De este modo, se puede asumir que los servicios de telepeaje son bastante conocidos entre los conductores.

La mayor tasa de conocimiento corresponde a los encuestados con edades comprendidas entre los 35 y los 49 años (80,3%). Por el contrario, se encuentran tasas más bajas entre las personas de edad avanzada, en particular mayores de 64 años (58,4%); y los conductores más jóvenes, de 18 a 24 años (66,5%). Esto puede reflejar el bajo uso de sistemas ITS en general, y de los sistemas de telepeaje en particular, por parte de personas mayores y la preferencia por el uso de rutas paralelas sin peaje entre los jóvenes.

Tabla 8. Conocimiento previo de los sistemas de peaje por parte de los conductores

		SÍ (%)	NO (%)
Total de la muestra		74,1	25,9
Edad	Menos de 24 años	66,5	33,5
	Entre 24 y 34 años	77,6	22,4
	Entre 35 y 49 años	80,3	19,7
	Entre 50 y 64 años	69,5	30,5
	Más de 64 años	58,4	41,6
Región	Cataluña	82,7	17,3
	Madrid	71,1	28,9
	Comunidad Valenciana	65,4	34,6
	País Vasco	79,0	21,0
	Galicia	72,5	27,5
Tipo de vehículo	Turismo	73,6	26,4
	Furgoneta	71,4	28,6
	Pesado (camión + bus)	91,7	8,3
Propósito del viaje	Ir a trabajar a diario (communtig)	76,9	23,1
	Negocios	84,8	15,2
	Fin de semana	68,1	31,9
	Vacaciones	56,8	43,2
	Otros	69,1	30,9

Elaboración propia

Además, existe un gran conocimiento de estos sistemas entre los usuarios que conducen vehículos pesados, tanto camiones como autobuses (91,7%), que corresponden al personal de las empresas de transporte. Esto podía deberse a la política de descuentos del sistema español de telepeaje “Vía-T” a usuarios frecuentes y las diferentes ventajas para las empresas de transporte, como el pago centralizado de peajes. Para los automóviles y las furgonetas, la tasa de conocimiento es significativamente menor, probablemente debido a su menor uso de las carreteras en comparación con las empresas de transporte. Con respecto a la variable de propósito del viaje, los sistemas de telepeaje son especialmente conocidos por los viajeros frecuentes, es decir, las personas que utilizan las carreteras de peaje con frecuencia alta (más de 8 viajes al mes). Por otro lado, el uso ocasional de las carreteras de peaje (por ejemplo, para viajes de vacaciones y fines de semana) está relacionado con menores tasas de conocimiento.

Además, los resultados muestran que, como podría esperarse inicialmente, el conocimiento de los sistemas de telepeaje no es homogéneo en todo el país, ya que varía según la densidad de las autopistas de peaje en cada región. En Cataluña, una región con una extensa red de autopistas de peaje, el conocimiento de los usuarios de los sistemas de peaje electrónico aumenta hasta el 82,7%. Por el contrario, este porcentaje es solo del 65,4% en la Comunidad Valenciana. Como se menciona anteriormente, la política de descuentos ofrecidos a los conductores parece tener una influencia determinante en este aspecto. Esta heterogeneidad regional observada en la muestra parece respaldar la adopción de una especificación multinivel adoptada para el enfoque de modelado.

6.4.2 Análisis de la adopción de los dispositivos para el pago electrónico de los peajes

Este apartado se centra en el análisis de la adopción de los dispositivos que permiten a los conductores efectuar el pago de los peajes de forma electrónica. Previamente a la presentación de los resultados arrojados por el modelo logit, es conveniente incluir algunas tendencias que se vislumbran en la encuesta con respecto a algunas variables explicativas (ver Tabla 99). Como puede verse, solo alrededor del 20% de los encuestados declararon tener un “tag”, cifra que puede considerarse bastante baja. Entre otros resultados, encontramos que la propiedad del dispositivo de telepeaje parece aumentar paralelamente al nivel de ingresos y parece estar fuertemente relacionada con el tipo de vehículo –un mayor uso de sistemas de peaje electrónico entre los conductores de vehículos pesados– y el viaje habitual que se realiza –la tasa de propiedad del dispositivo es mayor entre los conductores que hacen viajes de larga distancia. También se puede observar que la región de residencia parece influir mucho en la adopción del telepeaje, ya que la propiedad del “tag” es mayor en aquellas regiones con una red de peaje más densa, como Cataluña (29,1%) o País Vasco (27,6%). Por el contrario, el uso del pago electrónico es notablemente menor en las regiones con menor presencia de autopistas de peaje, como Madrid (15,3%). Estos hallazgos deben abordarse de manera más adecuada a través del enfoque de modelización matemática mencionado anteriormente.

Después de esta visión general preliminar, se ha desarrollado una modelización logit multinivel para analizar la propiedad del dispositivo de pago electrónico. En particular, este modelo (Modelo 1) estima la probabilidad de poseer un “tag” en función de un conjunto de variables explicativas. Este análisis resulta útil para determinar aquellos factores que pueden contribuir a una mayor adopción de sistemas de telepeaje entre los conductores. Antes de construir el modelo, se realizaron diferentes pruebas para verificar la multicolinealidad entre las variables

explicativas de acuerdo con la teoría desarrollada por Gujarati (2003). Los resultados no mostraron interacciones significativas.

Tabla 9. Análisis de las variables en función de si el conductor tiene en propiedad un dispositivo de telepeaje

			SÍ (%)	NO (%)
Total de la muestra			21,2	78,8
Características socioeconómicas	Edad	Menos de 24 años	14,9	85,1
		De 24 a 34 años	19,9	80,1
		De 35 a 49 años	24,3	75,7
		Más de 50 años	19,1	80,9
	Región	Cataluña	29,1	70,9
		Madrid	15,3	84,7
		Comunidad Valenciana	16,2	83,8
		País Vasco	27,6	72,4
		Galicia	17,5	82,5
	Salario	Menos de 20.000 €	20,9	79,1
		De 20.000 a 30.000 €	22,9	77,1
		Más de 30.000 €	31,2	68,8
Atributos relacionados con el viaje	Tipo de vehículo	Turismo	19,0	81,0
		Furgoneta	24,9	75,1
		Pesados (camión + bus)	63,6	36,4
	Viaje frecuente	Urbano	14,1	85,9
		Metropolitano	19,5	80,5
		Long-Distancia	38,1	61,9
	Propósito del viaje	Viaje diario (commuting)	21,4	78,6
		Negocios	36,6	63,4
		Fin de semana	15,3	84,7
		Vacaciones	12,9	87,1
		Otros	15,0	85,0
Variables de actitud	Percepción del precio del peaje	Caro	24,8	75,2
		Barato	20,6	79,4
	Percepción sobre si vale la pena el tiempo de viaje ahorrado	No	12,2	87,8
		Sí	21,6	78,4
	Conocimiento previo del telepeaje		27,5	72,5

Elaboración propia

Todas las variables explicativas utilizadas en el modelo son categóricas, por lo que se necesita elegir un caso base como referencia para interpretar correctamente los resultados del modelo (consulte la Tabla 100). Esto permite determinar si las respuestas de los usuarios, ya sean positivas o negativas, son estadísticamente significativas en comparación con el caso base. En cuanto al parámetro de región de residencia, se selecciona Galicia como el caso base porque parece representar una posición intermedia en términos de conciencia de los usuarios hacia el pago electrónico y la densidad de la red de peaje. Con respecto a las variables de frecuencia y propósito del viaje, el uso frecuente y el tipo de desplazamiento se han seleccionado como los casos base, ya que permiten verificar de forma más clara las posibles diferencias con otras situaciones.

Antes de ejecutar el modelo completo, dentro de un enfoque multinivel, es necesario ejecutar previamente el llamado Modelo 0 o “modelo vacío” para validar si las variaciones aleatorias entre regiones son una parte significativa de la variación total entre las respuestas. Como se puede ver en la Tabla 100 (lado izquierdo), los efectos no observados en las regiones son altamente significativos ($p\text{-valor} = 0,000$), por lo tanto, hay evidencia de diferencias estadísticamente significativas entre las regiones con respecto a la propiedad de los dispositivos de telepeaje. De acuerdo con los hallazgos comentados anteriormente, las regiones con una red de peaje más densa muestran tasas más altas de adopción del telepeaje. Por ejemplo, los resultados para Cataluña (0,42) o el País Vasco (0,35) son notablemente más altos en comparación con el resultado para otras regiones con una red de carreteras de peaje menos densa, como Madrid (-0,32).

Posteriormente, se estima el modelo completo que contiene todas las variables explicativas. La Tabla 10 incluye (lado derecho) los resultados del modelado final, una vez que se eliminan aquellas variables explicativas que no son estadísticamente significativas. Con ese fin, se han utilizado diferentes pruebas de razón de verosimilitud (RV) para verificar que no se produzcan cambios en el ajuste general del modelo al eliminar estos parámetros. Con respecto al modelo final, los signos de los coeficientes de regresión y su significación estadística y práctica están en línea con los resultados esperados. Como se puede ver, los resultados confirman que, desde un punto de vista estadístico ($\text{valor } p < 0.05$), la adopción del sistema de telepeaje por parte de los conductores está influenciada por las actitudes relacionadas con el viaje y, en menor medida, por las variables de actitud. Esto contrasta enormemente con los resultados encontrados para las características socioeconómicas individuales.

De acuerdo con los resultados del modelo, las características socioeconómicas no demostraron tener un papel importante en la adopción de los dispositivos de telepeaje por parte de los usuarios, ya que este grupo de variables no es estadísticamente significativo al 95% (valor de $p > 0,05$). Entre estas variables se destacan la edad, el género y el nivel de ingresos, para los cuales no se puede concluir una relación estadística con la adopción del telepeaje a partir de este análisis. Desde una perspectiva de política y gestión de las autopistas de peaje, este resultado señala que no es posible establecer segmentos específicos de usuarios en función de sus características socioeconómicas para dirigir los esfuerzos comerciales a aumentar la penetración del telepeaje, dado que todas las variables de este tipo son no significativas.

En cuanto a los atributos relacionados con el viaje, algunos parecen influir fuertemente en la adopción del pago electrónico de los peajes por parte de los usuarios, como el tipo de vehículo — mayor adopción para vehículos pesados—, la frecuencia de los viajes —una mayor adopción para usuarios frecuentes— y el propósito del viaje — mayor adopción para viajes de negocios, entre las variables explicativas más relevantes. En primer lugar, la investigación muestra una diferencia importante entre los vehículos ligeros y los vehículos pesados, probablemente debido a que estos últimos hacen un uso más intenso de las carreteras y, por lo tanto, pueden beneficiarse en mayor medida de las reducciones en el tiempo de viaje en los puestos de peaje y los descuentos que se ofrecen al adoptar dispositivos de pago electrónico. Como se señalaba anteriormente, el propósito del viaje también es importante en la decisión de adquirir un “tag”. El propósito de viaje de ‘negocios’ está claramente asociado a un mayor uso del telepeaje, mientras que otros motivos de viaje, como el ocio de fin de semana o vacaciones, que están relacionados con un menor uso de las carreteras de peaje, no son significativos. También se pueden observar relaciones estadísticamente significativas para el viaje más frecuente realizado por el usuario. En este punto, encontramos que los conductores que suelen hacer un mayor número de viajes interurbanos muestran un mayor uso del pago electrónico. Esto parece razonable dado que la red de autopistas española es casi puramente interurbana, con muy pocos tramos en ámbitos metropolitanos.

Tabla 10. Resultado de modelo "Análisis de la propiedad del dispositivo de telepeaje"

			MODELO CERO			MODELO FINAL		
Variables explicativas			Coefficiente	Error estándar	p-valor	Coefficiente	Error estándar	p-valor
Variables Individuales	Atributos relacionados con el viaje	Tipo de vehículo <i>(caso base: Turismo)</i>						
		Furgoneta				0,079	0,191	0,679
		Pesados				1,383	0,241	0,000
		Viaje frecuente <i>(caso base: Urbano)</i>						
		Metropolitano				0,203	0,126	0,107
		Larga distancia				0,915	0,152	0,000
		Frecuencia <i>(caso base: Frecuenter)</i>						
		Ocasional				-0,594	0,162	0,000
		Potencial				0,171	0,192	0,374
		Propósito del viaje <i>(caso base: Commuting)</i>						
		Negocios				0,308	0,139	0,027
		Fin de semana				-0,237	0,156	0,129
		Vacaciones				-0,283	0,268	0,292
		Otros				-0,161	0,162	0,321
	Variables de actitud	Percepción del precio del peaje <i>(caso base: Caro)</i>						
		Barato				0,521	0,151	0,001
		Conocimiento previo del telepeaje <i>(caso base: No)</i>						
		Sí				3,419	0,386	0,000
Variables regionales	Densidad de autopistas de peaje					0,029	0,005	0,000
Constante			-1,349	0,157	0,000	-5,742	0,434	0,000
Efectos aleatorios	Región		0,336	0,116	0,000	0,045	0,105	0,667
-2 log verosimilitud			-1408,765			-1169,318		
N° de observaciones			2.769			2.768		

Elaboración propia

En cuanto a las variables de actitud, las personas que perciben que los peajes son baratos muestran una mayor probabilidad de poseer un dispositivo de pago electrónico de peajes. Esto puede deberse al hecho de que esas personas viajan por autopistas de peaje con una mayor frecuencia y, por lo tanto, estar más familiarizadas con los beneficios que ofrece el pago electrónico de peajes. También se incluye una variable para controlar el conocimiento previo de los sistemas de telepeaje, ya que como se indicó anteriormente, los conductores no pueden decidir si poseen un "tag" para abonar los peajes si no conocen previamente cómo son y en qué consisten los dispositivos de pago electrónico.

Con respecto a las variables regionales, se puede observar que la propiedad de los “tag” es mayor en aquellas regiones con una mayor densidad de carreteras de peaje. También es importante señalar que los efectos no observados en las regiones casi desaparecen del modelo al incluir esta variable. Como se puede ver en la Tabla 100, los coeficientes aleatorios se vuelven muy cercanos a cero (0,045) y son estadísticamente no significativos (p -valor = 0,66) tras incluir parámetros explicativos en el modelo. De esta forma se puede concluir que las diferencias regionales inicialmente identificadas en la adopción del telepeaje por parte de los usuarios se explican adecuadamente con el modelo completo.

En resumen, los resultados de la modelización indican que la propiedad de los dispositivos de telepeaje está fuertemente asociada al uso de las autopistas de peaje, pero no a un perfil de usuario socioeconómico en particular. Además, el hecho de que las variables de actitud expliquen mejor la propiedad de los dispositivos de telepeaje que las características socioeconómicas tiene importantes implicaciones para los decisores técnicos a la hora de alentar la adopción del peaje electrónico. Estas implicaciones, como se observa en el siguiente modelo, se centran en las medidas que los administradores de infraestructuras pueden tomar para mejorar el uso del telepeaje. Con respecto a la bondad del ajuste, el modelo mostró una verosimilitud (log likelihood) de -1.169. Se realizó una prueba de razón de verosimilitud (RV) para verificar que el modelo final sea en general significativo en comparación con el modelo 0 (p -valor = 0,000).

6.4.3 Disponibilidad a realizar un mayor uso de las autopistas de peaje si los dispositivos de telepeaje fueran gratuitos

El modelo 2 explora las posiciones de los conductores respecto a la implantación de una actuación en materia de telepeaje. En particular, se plantea la hipotética provisión de dispositivos de telepeaje de manera gratuita para los usuarios con el objetivo de fomentar la adopción del telepeaje y promover el uso de carreteras de peaje. Como se señaló anteriormente, el objetivo de aumentar el uso de las carreteras de peaje se relaciona principalmente con atraer la demanda de carreteras paralelas no tarifadas, generalmente de baja calidad en España, mejorando así la seguridad vial y la congestión del tráfico en la red vial. Por tanto, el Modelo 2 analiza si los usuarios usarían carreteras de peaje con mayor frecuencia si los dispositivos de telepeaje se proporcionaran de forma gratuita. No obstante, debido al alcance general de la encuesta, a los encuestados no se les preguntó específicamente cuánto aumentarían o reducirían su uso de las carreteras de peaje o si la medida es aceptable o no. Esta pregunta en la encuesta está motivada por el hecho de que el costo de poseer una etiqueta parece ser un

factor que limita especialmente la tasa de penetración del peaje electrónico entre los usuarios. Como ya se mencionó, en España los conductores tienen que pagar una tarifa anual de alrededor de 35-50 euros por poseer un “tag”, por lo que la adopción del peaje electrónico no resultaría interesante para los usuarios poco frecuentes debido a su escaso beneficio de los descuentos en los peajes. Otras opciones de política interesantes que podrían considerarse para promover la adopción del cobro electrónico de peajes, como agregar una tarifa adicional por el pago manual, no se incluyeron ya que el enfoque se realiza sobre la principal barrera identificada para el caso de España, es decir, el coste de ser propietario de un dispositivo de telepeaje. Los problemas de privacidad también pueden desempeñar un papel en ciertos casos, pero podemos esperar un efecto muy limitado para España dado que el tipo de tecnología de telepeaje adoptada en nuestro país no rastrea la posición de los usuarios.

Los hallazgos preliminares sobre la disposición de los usuarios a usar las autopistas con mayor frecuencia si los “tag” fueran gratuitos se muestran en la Tabla 111 para los diferentes grupos de encuestados. Es importante tener en cuenta que el número de observaciones se reduce significativamente (394 observaciones), ya que esta pregunta solo se formuló para los encuestados que estaban familiarizados con los dispositivos de telepeaje, pero que no tenían un “tag”. A primera vista, podemos ver que la entrega de dispositivos de telepeaje gratuitos sería una medida de política eficaz para aumentar el uso de las carreteras de peaje, dado que alrededor del 50% de los encuestados muestran una respuesta positiva. Con pocas excepciones, este porcentaje es bastante estable en toda la muestra y entre grupos de variables explicativas, como se puede ver en la Tabla 111. Sin embargo, algunos grupos específicos de usuarios, como conductores menores de 24 años, conductores de vehículos pesados o residentes en Madrid, parece que aumentarían especialmente su uso de autopistas de acuerdo con las tendencias preliminares.

En particular, en comparación con otras categorías, la tasa de respuestas positivas es más alta para los jóvenes (menores de 24 años), mayores niveles de ingresos (más de 30.000 euros), conductores de vehículos pesados o individuos que realizan viajes de larga distancia. También vale la pena destacar la mayor proporción de respuestas positivas observadas en Madrid, lo que probablemente indica que el coste actual asociado a los dispositivos de cobro electrónico de peajes es una barrera para aumentar el uso de carreteras de peaje en esta región. En este punto, responder “No” a esta pregunta significa que los individuos no usarían más la carretera de peaje a pesar de la gratuidad del “tag”. Eso significaría que la demanda de pago electrónico es principalmente inelástica, lo que parece ocurrir principalmente en Galicia.

Tabla 11. Análisis de las variables si el dispositivo de telepeaje fuera gratuito para el conductor

			SÍ (%)	NO (%)
Total de la muestra			50,2	49,8
Características Socioeconómicas	Género	Hombre	48,9	51,1
		Mujer	50,6	49,4
	Edad	Menos de 24 años	61,4	38,6
		De 24 a 34 años	55,9	44,1
		De 35 a 49 años	49,4	50,6
		Más de 50 años	45,6	54,4
	Región	Cataluña	45,5	54,5
		Madrid	61,9	38,1
		Comunidad Valenciana	49,5	50,5
		País Vasco	47,3	52,7
		Galicia	41,6	58,4
	Salario	Menos de 20.000 €	46,3	53,7
		De 20.000 a 30.000 €	40,9	59,1
		Más de 30.000 €	63,5	36,5
Atributos relacionados con el viaje	Tipo de vehículo	Turismos	49,9	50,1
		Furgonetas	42,8	57,2
		Pesados (camión + bus)	68,8	31,2
	Viaje frecuente	Urbano	49,4	50,6
		Metropolitano	46,8	53,2
		Larga distancia	63,5	36,5
	Propósito del viaje	Viaje diario (commuting)	48,3	51,7
		Negocios	59,9	40,1
		Fin de semana	52,2	47,8
		Vacaciones	54,4	45,6
		Otros	42,5	57,5
Variables de actitud	Percepción del precio del peaje	Caro	47,8	52,2
		Barato	50,0	50,0
	Percepción sobre si vale la pena el tiempo de viaje ahorrado	No	51,5	48,5
		Sí	39,4	60,6
	Conocimiento previo del telepeaje	No	52,7	47,3
		Sí	44,2	55,8

Elaboración propia

Con el fin de analizar de manera más rigurosa la implementación potencial de esta política, se ha estimado un modelo binario de varios niveles (Modelo 2). Nuevamente, los resultados para el modelo vacío (lado izquierdo en la Tabla 12) evidenciaron que los efectos no observados a nivel de región son altamente significativos (p -valor = 0,023) con respecto a la disposición a usar carreteras de peaje con mayor frecuencia si los “tags” fueran gratuitos. De acuerdo con los hallazgos preliminares, los interceptos aleatorios son particularmente relevantes para Madrid (0,37), luego los conductores en esta región muestran una mayor probabilidad de usar carreteras de peaje con mayor frecuencia si no tuvieran que asumir el coste de poseer un dispositivo de telepeaje. Esto puede estar relacionado con la posibilidad de utilizar autopistas metropolitanas en Madrid para evitar la congestión que comúnmente ocurre en la hora punta en las carreteras de alta capacidad gratuitas que compiten con ellas. Por el contrario, los interceptos aleatorios son casi nulos o negativos para otras regiones con mayor presencia de autopistas, como Cataluña (-0,11) o Galicia (-0,22). Este resultado evidencia que los usuarios en estas regiones son menos propensos a aumentar su uso de las carreteras de peaje debido a la carga de los peajes que ya sufren actualmente.

Con respecto a los resultados del modelo completo (lado derecho en la Tabla 12), no se pueden identificar tendencias claras con respecto a la importancia de las características socioeconómicas, los atributos relacionados con el viaje o las variables de actitud cuando se explica la disposición de los conductores a usar las carreteras de peaje con mayor frecuencia si los “tags” se proporcionaran de forma gratuita. Este resultado está en línea con los hallazgos preliminares anteriores, que mostraron una probabilidad bastante homogénea en toda la muestra a aumentar el uso de carreteras de peaje. En definitiva, solo unas pocas variables resultaron estadísticamente significativas al 95% de confianza, no perteneciendo a un grupo particular de parámetros. Dado este hecho y el reducido número de observaciones, se mantuvieron aquellas variables explicativas con al menos una categoría significativa en el nivel del 90%. Este criterio fue confirmado por una prueba de logaritmo de verosimilitud, que sugiere mantener estos parámetros en el modelo completo.

Tabla 12. Resultado de modelo "Análisis del uso de las autopistas de peaje si los dispositivos de telepeaje fueran gratuitos"

			MODELO CERO			MODELO FINAL		
Variables explicativas			Coefficiente	Error estándar	p-valor	Coefficiente	Error estándar	p-valor
Variables Individuales	Características Socioeconómicas	Salario (caso base: Menos de 20.000€)						
		De 20.000 a 30.000 €)				-0.244	0.231	0.291
		Más de 30.000 €				0.553	0.228	0.077
	Atributos relacionados con el viaje	Viaje frecuente (caso base: Urbano)						
		Metropolitano				-0,192	0,228	0,401
		Larga Distancia				0,881	0,364	0,015
		Frecuencia (caso base: frecuente)						
		Ocasional				-0,538	0,314	0,086
	Potencial				-0,318	0,286	0,267	
Variables regionales	Densidad de autopistas de peaje					-0,022	0,009	0,012
Constante			-0,026	0.128	0,836	0,886	0,437	0,042
Efectos aleatorios	Región		0,240	0.106	0,023	0,000	0.311	0,893
-2 log verosimilitud			-583,104			-256,779		
Nº de observaciones			846			394		

Elaboración propia

De acuerdo con los resultados del modelo, solo tres variables explicativas (aparte de los parámetros regionales) resultaron influir significativamente en la disposición de los conductores a usar las carreteras de peaje con mayor frecuencia si los dispositivos de telepeaje se proporcionasen de forma gratuita. Estos parámetros son el nivel de ingreso, la frecuencia de viaje y el motivo de viaje que se realiza con frecuencia. En lo que respecta al nivel de ingresos, la disposición de los conductores a usar las autopistas con más frecuencia si los "tags" se proporcionaran de forma gratuita es parcialmente significativa para niveles de ingresos superiores a 30.000 €. Podemos suponer que este segmento de la demanda es más elástico para adoptar un desvío a carreteras tarifadas. Sin embargo, otras características socioeconómicas, como la edad o el género, no evidenciaron tener un papel importante.

También podemos observar en la Tabla 12 que realizar frecuentemente viajes de larga distancia muestra una influencia positiva en la probabilidad de usar carreteras de peaje con más frecuencia si los dispositivos de telepeaje fueran gratuitos. De nuevo, esto puede explicarse por la naturaleza interurbana de la red de autopistas española y los mayores descuentos monetarios aplicables en viajes largos si los conductores usan un dispositivo de telepeaje. Con respecto a la

frecuencia de los viajes, los conductores ocasionales parecen mostrar una menor probabilidad de aumentar su uso de carreteras de peaje en comparación con los usuarios frecuentes, pero no se encuentran resultados estadísticamente significativos al 95%. Por el contrario, si bien puede parecer sorprendente a la luz de algunos de los hallazgos preliminares anteriores, el modelo no proporciona resultados estadísticamente significativos para ciertas variables, como el tipo de vehículo. En este punto, podríamos esperar una posición más proclive de los conductores de camiones y autobuses a aumentar el uso de las autopistas en caso de que los “tags” fueran gratuitos, dado que hacen un uso muy intenso de la red vial. Sin embargo, este efecto puede ser parcialmente capturado por otras variables como la frecuencia de los viajes, cercana a ser significativa en el modelo.

En cuanto a las variables de actitud, ninguna de ellas mostró resultados estadísticamente significativos en el modelo. Por ejemplo, percibir que el precio del peaje es costoso podría estar fuertemente asociado con una mayor probabilidad de aumentar el uso de las carreteras de peaje, dada la posibilidad de percibir mayores descuentos. Aunque el coeficiente tiene el signo esperado, no es estadísticamente significativo. Este es también el caso de la variable que controla las percepciones de los usuarios sobre el ahorro de tiempo proporcionado por las infraestructuras de peaje.

Con respecto a las variables regionales, aquellas regiones con una mayor densidad de autopistas muestran una menor disposición a hacer un uso adicional de las autopistas en caso de que los “tags” fueran gratuitos. Esto podría estar asociado a la alta carga de peajes que actualmente soportan los conductores que viven en estas áreas. También vale la pena señalar que los efectos regionales no observados casi desaparecen en el modelo completo. Como se puede ver en la Tabla 12, nuevamente los coeficientes aleatorios se vuelven muy cercanos a cero y no son estadísticamente significativos (p -valor = 0,89) después de incluir parámetros explicativos regionales en el modelo, por lo que las diferencias regionales inicialmente identificadas se explican adecuadamente con el modelo completo. Con respecto a la bondad de ajuste del modelo, mostró un logaritmo de verosimilitud de -256. Se adoptó una prueba de razón de verosimilitud (LR) para verificar que el modelo final era en general significativo en comparación con el modelo 0 (p -valor = 0,000).

De los resultados del Modelo 2, se puede concluir que no hay tendencias claras con respecto al tipo de variables explicativas que aumentarían el uso de carreteras de peaje en caso de que los dispositivos de telepeaje se proporcionaran de forma gratuita. Por esta razón, no hay un grupo

claro de usuarios que aumentaría su uso de las carreteras de peaje en caso de cualquier cambio en el costo de los “tags”. Por el contrario, parece que la proporción de respuestas positivas es bastante constante en toda la muestra, con alrededor del 50% de los individuos dispuestos a hacer un uso adicional de las carreteras de peaje. De cualquier manera, se puede extraer una conclusión muy positiva: entre los usuarios se observa una posición amplia en relación a aumentar el uso actual de las carreteras de peaje. Como aproximadamente el 50% de los encuestados estaría dispuesto a adoptar el telepeaje y hacer un uso adicional de la red de peaje, esta política claramente promueve que las autopistas sean más atractivas, probablemente debido a la posibilidad de beneficiarse gratuitamente de los pagos sin efectivo y las reducciones de tiempo de viaje que ofrece el telepeaje. Por lo tanto, la entrega de “tags” gratuitos a los usuarios demuestra ser una medida de política efectiva que deberían adoptar los operadores de peaje y las administraciones públicas, dada la eficacia general observada en todos los tipos de usuarios. Sin embargo, esto debe tomarse con precaución dado el tamaño de muestra limitado que respondió a esta pregunta.

PARTE IV:

CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas de cobro electrónico de peajes ofrecen la posibilidad de que los vehículos que circulan por carreteras sujetas a tarificación realicen el pago de forma flexible, segura, cómoda y eficaz. La presente tesis doctoral busca sentar las bases para la obtención de criterios y pautas que permitan una eficaz implantación de sistemas de cobro electrónico de peajes en las carreteras, teniendo en cuenta tanto a los gestores de dichas infraestructuras como a sus usuarios. El conocimiento en profundidad de estas tecnologías alcanzado en esta investigación permite una mejora tanto para los usuarios de la red de carreteras, a la administraciones públicas y empresas concesionarias encargadas de la explotación de dichas infraestructuras, así como a la sociedad en su conjunto.

Del estudio en profundidad del estado del arte han surgido una serie de aspectos que no han sido suficientemente analizados en la literatura científica. Esta tesis doctoral propone un doble estudio, basado en una aproximación sobre las tecnologías de telepeaje y otra aproximación sobre el comportamiento de los usuarios. Así, se desarrollan dos análisis, centrados respectivamente en las tecnologías de cobro electrónico, a través de un análisis comparativo de los sistemas de cobro electrónico de peajes, y la visión de los usuarios de estos sistemas, a través del análisis de una encuesta que muestra las opiniones de los conductores con respecto al conocimiento y uso del telepeaje, particularizado para el caso de España.

A continuación, se desarrollan las principales conclusiones de la presente investigación. Así, estas conclusiones se desarrollarán en base al cumplimiento de los objetivos específicos recogidos en el capítulo 3 de esta tesis doctoral. En primer lugar, se exponen las principales conclusiones, así como las respuestas obtenidas a las preguntas de la investigación, planteadas en el epígrafe 2.5. En segundo lugar, se presentan una serie de recomendaciones para los gestores de carreteras de peajes relacionadas con los sistemas de cobro electrónico de peajes. Finalmente, se muestran las limitaciones encontradas y las futuras líneas de investigación.

7.1 Conclusiones y respuestas a las preguntas de la investigación

En este epígrafe se desarrollan las principales conclusiones y resultados de la tesis doctoral. Para ello, se responde a las preguntas que formularon en el capítulo 2 y que dieron lugar a los objetivos específicos de la investigación.

En lo relativo a la visión tecnológica de los sistemas de cobro electrónico de peajes, la investigación plantea las dos preguntas siguientes:

- **PREGUNTA 1: *¿Qué criterios deben valorar los gestores de carreteras a la hora de planificar e introducir en su red de carreteras una determinada tecnología de cobro electrónico de peajes?***
- **PREGUNTA 2: *¿Qué parámetros permiten cuantificar los criterios para determinar la elección de una u otra tecnología de telepeaje en una sección de carretera?***

El análisis tecnológico de los sistemas de cobro electrónico de peaje realizado en la presente tesis se basa en el estudio comparativo de diferentes características de estos sistemas: costes, interoperabilidad, protección de datos y privacidad, *enforcement*, obsolescencia, etc. Este análisis comparativo se ha llevado a cabo a través de la metodología D.A.F.O. que permite obtener una serie de conclusiones relevantes en función de si el sistema de telepeaje es de nueva implantación, o bien se trata de sistemas ya en servicio.

En el caso de la **implantación de un nuevo sistema de cobro electrónico de peajes**, diferentes factores deben ser tenidos en cuenta por parte de los gestores de carreteras a la hora de la elección de la tecnología de telepeaje. De este modo, el **tipo de red** es el primer elemento a valorar. Así, debe analizarse si los tramos a tarificar son puntos específicos de la red, como pasos fronterizos o accesos a los principales centros productivos, constituyen un conjunto específico de tramos o, en cambio, suponen la totalidad de la red de alta capacidad o la red viaria al completo.

En el primero de los casos, tecnologías como el DSRC o RFID aparecen como las más idóneas ya que los costes no serán excesivamente altos –la necesidad de infraestructura auxiliar será limitada– y la fiabilidad de los mismos será muy alta. Sin embargo, a medida que el tamaño de la red a tarificar aumenta, las economías de escala muestran que las tecnologías basadas en las comunicaciones móviles y por satélite son más ventajosas. En este sentido, los **aspectos presupuestarios** también son importantes ya que, a medida que se incrementa el número de kilómetros a tarificar, las tecnologías basadas en comunicaciones móviles y por satélite

presentan menores costes unitarios (por km tarificado) de implantación y mantenimiento que las basadas en radiofrecuencia.

Asimismo, también deben ser tenidos en cuenta aspectos adicionales. Factores como el **desarrollo e implantación de la tecnología móvil**, tanto de cobertura como de dispositivos terminales, son críticos a la hora de valorar la posible introducción de la tecnología móvil. También será determinante el **tipo de carretera que se tarifica**. Así, en tramos metropolitanos, con una mayor densidad de enlaces, el número de pódicos necesarios en caso de la tecnología DSRC y RFID aumenta, lo que dispara los costes. Sin embargo, en tramos interurbanos donde la densidad de red sea baja estas tecnologías son muy competitivas al disminuir sus costes y aumentar la fiabilidad. Relacionado con la **precisión** de las tecnologías, los sistemas que funcionan a través de las comunicaciones móviles o vía satélite presentan falta de exactitud cuando la autopista de peaje y la alternativa sin coste directo para el usuario están muy juntas, ya que la tecnología no logra distinguir la procedencia de la señal. Este hecho no sucede con el resto de las tecnologías analizadas.

Además, no debe olvidarse la **planificación a medio y largo plazo**. Los sistemas de cobro electrónico de peajes son tecnologías que se encuentran en plena evolución técnica. Por esta razón, la planificación a medio y largo plazo es fundamental para los decisores técnicos y políticos. Entre los elementos que deben ser tenidos en cuenta está la posible **integración de servicios de movilidad al usuario** de la carretera, en los cuales el telepeaje estará sin duda presente. También debe ser valorada la posible **obsolescencia** de determinadas tecnologías, así como los costes de adaptación a la hora de integrar tecnologías ya implantadas en las nuevas redes de telepeaje. Por último, es esperable que la preocupación de la ciudadanía por la **privacidad** de sus datos personales, así como por la ciberseguridad en sus vehículos, aumente en los próximos años. Por ello, este reto debe ser afrontado por los poderes públicos desde los ámbitos legislativo y técnico.

En cuanto a los **sistemas ya en funcionamiento**, la primera enseñanza es la importancia de la **interoperabilidad** entre los diferentes sistemas de telepeaje. De forma general, esta flexibilidad no se da en las conexiones internacionales, dado que existe una disparidad de sistemas de telepeaje entre países/estados vecinos, como en el caso de la Unión Europea o en Estados Unidos. En los sistemas nacionales sí se han dado pasos importantes en esta dirección, como en el caso de España, pero en muchos estados quedan grandes márgenes de mejora. Por tanto, queda patente que es indispensable que estos sistemas sean interoperables tanto a escala

regional, como nacional e internacional, para evitar la creación de obstáculos a los flujos de tráfico.

Así, la interoperabilidad debe permitir a los usuarios viajar por las diferentes redes de carreteras sin tener que someterse a procedimientos distintos y sin tener que instalar ningún dispositivo adicional al cambiar de una zona de tarificación a otra. Es muy importante señalar que esto no significa que vaya a existir un único proveedor o una única tecnología, sino que existirá suficiente **compatibilidad técnica** y política entre los diferentes sistemas para que los conductores que tengan que abonar peajes en diferentes tramos de carreteras puedan hacerlos sin ningún tipo de interrupción.

Por ello, el primer paso hacia la interoperabilidad debe ser el establecimiento de un nivel mínimo común que permita a los abonados pagar el peaje con el mismo modo de pago y el mismo equipo en cualquier punto de la red, independientemente de la administración titular o del concesionario que opera la carretera. El segundo aspecto que debe valorarse es la **interoperabilidad contractual**, ya que la disponibilidad de equipos técnicamente interoperables tiene que ir acompañada del establecimiento de acuerdos contractuales entre las diferentes empresas operadoras de infraestructuras. En este sentido, una conclusión relevante es la importancia de imponer un único estándar de interoperabilidad comercial, requerido en los términos de licitación, a todos los concesionarios al inicio del proceso de tarificación.

Los sistemas de cobro electrónico de peajes son extremadamente sensibles a la legislación de **enforcement** y la posibilidad de identificar y perseguir a los evasores de peajes. El éxito de un sistema de flujo libre se basa en la correcta planificación de los medios humanos y materiales necesarios (política, tribunales, etc.) para poner la ley en efecto. Además, se debe mejorar la coordinación entre las administraciones públicas competentes. En este sentido, la UE ha creado un nuevo sistema de intercambio de información que permitirá a las autoridades nacionales de los Estados miembros acceder a los datos nacionales de matriculación de vehículos de los demás Estados miembros con el fin de identificar a los propietarios de aquellos vehículos relacionados con el impago de los peajes de carretera.

En cuanto a la visión de los sistemas de cobro electrónico de peajes centrada en los usuarios de estos sistemas, la investigación se plantea las siguientes preguntas:

- **PREGUNTA 3: *¿Qué factores condicionan la propensión al uso de sistemas de pago electrónico de peajes por parte de los conductores?***

– **PREGUNTA 4: ¿Qué implicaciones tiene en la aceptación del telepeaje por parte de los usuarios la gratuidad de los dispositivos de telepeaje?**

De acuerdo con la experiencia, el aumento en el uso del telepeaje mejorará la asignación de rutas en tiempo real, equilibrando así la demanda entre los diferentes tramos de carretera y ofreciendo una mejor calidad a los conductores. Los resultados de esta investigación arrojan claves para explicar el uso por parte de los conductores de los mecanismos de pago electrónico en carreteras de peaje.

Según los resultados del análisis econométrico realizado en el capítulo 6 de la tesis, la adopción de dispositivos de peaje electrónico por parte de los conductores no parece estar influenciada por las **características socioeconómicas** de los usuarios, como el ingreso o la edad. La única variable de este tipo que influye estadísticamente en la adopción del telepeaje es la **región de residencia**. En el caso de España, este hecho está relacionado con la asimetría en la densidad de la red de peaje debido al asimétrico reparto de la población por el territorio. Por lo tanto, este resultado variará según la distribución de la red de peaje de cada país. En definitiva, no es posible determinar un perfil socioeconómico único de los usuarios de la carretera que actualmente no realizan por el pago de los peajes de manera electrónica. En otras palabras, no es posible establecer un único perfil de aquellos usuarios a los que deben dirigirse los esfuerzos para aumentar el uso del telepeaje.

Otra conclusión, relacionada con la anterior, es que poseer un dispositivo de telepeaje está fuertemente asociado al uso de las autopistas de peaje y a **las características del desplazamiento** que se realiza, como la frecuencia del viaje, el propósito del viaje y el hecho de conducir por razones profesionales (personal de las empresas de transporte). Conocer esta realidad es importante a la hora de identificar las posibilidades y los segmentos de mercado para aumentar el uso de los sistemas de telepeaje a corto y medio plazo.

Asimismo, según los resultados de la investigación, la **entrega gratuita de dispositivos de telepeaje** a los usuarios parece ser una medida de gestión eficaz para alentar la adopción del peaje electrónico y promover el uso de carreteras de peaje entre los usuarios. Al menos en el caso de España, la efectividad de esta medida es bastante significativa y constante entre los encuestados, a pesar de que se identifican algunos colectivos con una mayor probabilidad de aumentar el uso de carreteras de peaje. Así, la entrega gratuita de dispositivos de telepeaje, o la búsqueda de mecanismos para reducir los costes de los dispositivos asumidos por los usuarios, configurarían una política efectiva a ser adoptada por parte de los operadores de peaje y la administración pública, con el objetivo de promover una adopción más amplia del cobro

electrónico de peajes. Este “tag” gratuito podría integrar otros servicios de interés para el usuario y las administraciones: control de evasiones, control de ITV, pago de impuestos o la integración del *eCall*, entre otros.

7.2 Recomendaciones para la toma de decisiones en el ámbito del telepeaje

Esta tesis doctoral permite asimismo realizar una serie de recomendaciones. Éstas se pueden generalizar a otros mercados, además de los ya analizados en los casos de estudio, especialmente aquellos donde el cobro electrónico de peaje no es obligatorio o aún permanece lejos de ser la alternativa mayoritaria. Este sería el caso de, por ejemplo, países del sur de Europa que aplican peajes de concesión, como España, Francia o Italia. Estas sugerencias están encaminadas a eliminar y superar las debilidades detectadas. Entre las recomendaciones, se considera que es necesario:

- Promocionar la introducción de sistemas electrónicos de peaje en aquellos lugares en los que existan peajes tradicionales como mecanismo para hacer más flexibles, seguros y eficaces los pagos de los peajes. Para ello, las administraciones podrían poner en marcha, de manera acordada con los operadores, diferentes acciones que incentiven la adopción del cobro electrónico por parte de los usuarios de autopistas. Entre estas medidas, podría destacarse el establecimiento de tarifas diferenciadas para los usuarios en función del tipo de pago (manual/electrónico) que se realice del peaje, de manera que se establecieran tarifas más reducidas a quienes optasen por emplear el telepeaje. Asimismo, en línea con una de las actuaciones analizadas en la tesis doctoral, podría explorarse la posibilidad de facilitar dispositivos de telepeaje sin coste para los usuarios o a un precio sensiblemente más reducido que el habitual, bien a determinados segmentos de la población o a perfiles específicos de usuarios de autopistas. No obstante, ello requeriría la realización de una evaluación económica de dicha medida, que tuviera en cuenta el posible impacto sobre los presupuestos públicos o los resultados de los operadores.
- Introducir en los sistemas de telepeaje todos aquellos elementos que permitan aumentar la interoperabilidad entre las diferentes redes de carreteras y empresas concesionarias, a nivel local, regional, nacional e internacional. En este sentido, se considera fundamental llegar a acuerdos entre las empresas concesionarias y las Administraciones Públicas para el establecimiento de estándares y medidas de gestión encaminadas a su consecución. Partiendo del espíritu de la Directiva 520/2019 sobre sistemas de telepeaje, se deben crear marcos de actuación para establecer bases de datos sobre los vehículos a escala europea, superando así las restricciones actuales.

- Optar, en el caso de nuevos sistemas de telepeaje, por la implantación de aquellos sistemas que permitan la interoperabilidad con el mayor número de sistemas posible. De esta forma, se debe avanzar en el sentido de que la normativa obligue a introducir la interoperabilidad en las fases de planificación, así como en los pliegos de los proyectos.
- Promover, por parte de organizaciones internacionales –ONU, PIARC, Unión Europea, etc.–, la armonización técnica y contractual de los dispositivos a bordo de los vehículos de tal forma que puedan ser válidos en el mayor número de países europeos. De esta forma, se debe perseguir el establecimiento de normas y estándares técnicos a nivel internacional. Asimismo, se debe favorecer, a través de grupos de trabajo, congresos internacionales, etc., el intercambio de experiencias y conocimientos. En este sentido, se propone institucionalizar el grupo de trabajo creado por la Comisión Europea para el estudio y redacción de la Directiva 520/2019, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de carretera y por la que se facilita el intercambio transfronterizo de información sobre el impago de cánones de carretera en la Unión.
- Minimizar los costes, especialmente para los usuarios, de las diferentes tecnologías como paso previo a la interoperabilidad. En este marco, el análisis del comportamiento de los conductores, así como un correcto estudio de los flujos de tráfico, puede dar lugar a la selección de la mejor forma para canalizar esta bajada de costes. Así, estos resultados deben ser incorporados en la planificación a medio y largo plazo, así como en la elaboración de futuros proyectos. Asimismo, el aprovechamiento de las economías de escala que produzca el desarrollo e implantación de diversos sistemas tecnológicos en la carretera también puede dar lugar a la bajada de costes para los usuarios de la carretera. Como se ha concluido en la presente tesis doctoral, una disminución de costes para los usuarios conllevaría un aumento de la aceptación social de los sistemas de telepeaje, lo que aumentaría su uso con el consiguiente aumento de la seguridad vial y disminución de la congestión y la contaminación atmosférica.
- Aprovechar los datos generados en las transacciones de los peajes para mejorar la gestión y explotación de las infraestructuras, planificando las labores de conservación, así como ofreciendo un servicio más cercano y personalizado a la ciudadanía, sin poner en riesgo su privacidad. En este sentido, se espera que en los

próximos años las administraciones públicas encargadas de la red de carreteras, pasen a gestionar gran cantidad de datos procedentes de la infraestructura, llegando a controlar una infraestructura física y otra infraestructura digital. Por esta razón, los datos provenientes de los sistemas de cobro electrónico de peajes tendrán un papel fundamental debido a su gran volumen e importancia.

- Aprovechar los incentivos por parte de las administraciones públicas para la introducción y desarrollo de los servicios adicionales en la carretera (eCall, control de emisiones, etc.) para el incentivo de los sistemas de cobro electrónico de peajes entre la ciudadanía. De esta forma, aprovechando las economías de escala que se generen, se conseguirá un mayor desarrollo de los sistemas de telepeaje reduciendo los costes de los mismos.

7.3 Limitaciones y futuras líneas de investigación

La investigación que ha dado lugar a la presente tesis doctoral se he enfrentado a diferentes limitaciones. Entre las que afectaron al análisis sobre las tecnologías de los sistemas de telepeaje destacan la falta de información por parte de las administraciones públicas en lo relativo a sus sistemas de telepeaje. Esta falta de información es especialmente patente en lo relativo a los costes de instalación y mantenimiento de estas tecnologías. Asimismo, también es patente la disparidad de criterios empleados por las empresas desarrolladoras de estas tecnologías a la hora de publicar las características y propiedades de sus sistemas, lo que complica el estudio conjunto de los mismos. Como se puede deducir, estas limitaciones están íntimamente ligadas a razones de secretos comerciales y de propiedad intelectual.

A la hora de estudiar el comportamiento de los usuarios, es importante señalar que el análisis realizado tiene algunas limitaciones. En primer lugar, el tamaño de la muestra obtenida de la encuesta realizada en España puede considerarse bastante limitado, especialmente en lo que respecta al análisis realizado sobre la disposición de los usuarios a hacer un uso adicional de las carreteras de peaje en caso de que los *tags* fueran gratuitos. En segundo lugar, debido a las características técnicas del sistema de telepeaje español, que no rastrea la posición de los usuarios, los problemas de privacidad no se abordaron explícitamente en la investigación. Además, no ha sido posible explorar la influencia de los problemas de interoperabilidad en la adopción del telepeaje ya que, en el caso muy particular de España, la interoperabilidad transnacional se ha logrado con los países vecinos.

Con el objetivo de profundizar en la línea de investigación iniciada en la presente tesis doctoral, se proponen a continuación un conjunto de trabajos e iniciativas futuras que permitan desarrollar y profundizar en los temas aquí tratados, así como superar las limitaciones encontradas:

- Ampliar el análisis sobre la percepción de los usuarios a un mayor número de variables explicativas. Los estudios futuros podrían extender este análisis a una mayor variedad de variables explicativas, especialmente sobre la conciencia de los conductores para utilizar las carreteras de peaje con mayor frecuencia si los dispositivos de pago electrónico se proporcionaran de forma gratuita. Además, las diferencias en la adopción de los pagos electrónicos por parte de los conductores también deben analizarse a través de otras perspectivas utilizando, por ejemplo, variables relacionadas con la psicología y la sociología. La importancia de los aspectos técnicos, como la falta de

interoperabilidad transnacional de los servicios de telepeaje, también representa un aspecto clave que se explorará en futuras investigaciones.

- Ampliar el estudio del impacto que las nuevas tecnologías, junto con las nuevas formas de movilidad, puedan tener en el futuro de los peajes urbanos y control de las áreas con tráfico restringido. La irrupción del vehículo autónomo y la llamada ‘economía colaborativa’ abren grandes retos sobre la capacidad de la infraestructura y la forma de relacionarse con ella por parte de la ciudadanía.
- Evaluar otras medidas de gestión distintas de las ya analizadas como la gratuidad del dispositivo de telepeaje, como, por ejemplo, tarifas que varían según el método de pago (manual o electrónico), descuentos específicos por colectivo u horario aplicables a los usuarios del cobro electrónico o el establecimiento de tarifas planas, entre otras.
- Replicar y ampliar el análisis de la percepción de los usuarios sobre el cobro electrónico de peajes en países y regiones con diferente presencia e importancia del telepeaje. De esta forma, se podrá obtener una visión más completa sobre la evaluación de la percepción del telepeaje entre la ciudadanía.
- Emplear otras formulaciones econométricas más complejas, como, por ejemplo, el caso del modelo logit mixto, que permite analizar las heterogeneidades en las preferencias de los usuarios.

Asimismo, además de futuras investigaciones dentro del ámbito académico, la presente tesis doctoral también sienta las bases para futuros desarrollos prácticos en la materia como:

- Desarrollo de soluciones y plataformas que integran el peaje electrónico como un servicio más de movilidad. En este sentido, el telepeaje debe ser una herramienta que permita una mejor intermodalidad dentro de las principales áreas urbanas y metropolitanas, a través de líneas de *Mobility as a Service* (MaaS) y de iniciativas de fomento del vehículo compartido.
- Desarrollo de herramientas de gestión, por parte de las administraciones públicas y empresas concesionarias encargadas de la explotación de las autopistas de peaje, para el tratamiento de los datos procedentes de los dispositivos de telepeaje. En un futuro cercano, la correcta gestión y uso de los datos procedentes de los diferentes dispositivos embarcados en los vehículos –telepeaje, *eCall*, *C-ITS*, etc.– permitirá a los organismos

encargados de la explotación de las carreteras una mejor gestión de las mismas, siendo más eficaces y equilibradas las inversiones y el aprovechamiento de la capacidad de las infraestructuras. Esta gestión de una inmensa cantidad de datos no debe poner en riesgo la seguridad y la privacidad de la ciudadanía.

PARTE V: REFERENCIAS Y DIVULGACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

8. REFERENCIAS

- Abari, O., Vasisht, D., Katabi, D., & Chandrakasan, A. (2015). Caraoke : An E-Toll Transponder Network for Smart Cities. *Sigcomm 2015*, 297–310.
<https://doi.org/10.1145/2785956.2787504>
- Abuzwidah, M., & Abdel-Aty, M. (2015). Safety assessment of the conversion of toll plazas to all-electronic toll collection system. *Accident Analysis and Prevention*, 80, 153–161.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.03.039>
- Amorim, M., Lobo, A., Rodrigues, C., & Couto, A. (2014). Optimal Location of Electronic Toll Gantries: The Case of a Portuguese Freeway. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 880–889. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.122>
- Ansari, K., Wang, C., Wang, L., & Feng, Y. (2013). Vehicle-to-vehicle real-time relative positioning using 5.9 GHZ DSRC media. *IEEE Vehicular Technology Conference*.
<https://doi.org/10.1109/VTCFall.2013.6692454>
- Balasch, J., Rial, A., Troncoso, C., Preneel, B., Verbaauwhede, I., Leuven, I. U., ... Leuven, B. (2010). PrETP : Privacy-Preserving Electronic Toll Pricing. *19th USENIX Security Symposium 2010*, 63–78. Retrieved from
http://www.usenix.org/event/sec10/tech/full_papers/Balasch.pdf
- Balmer, U. (2006). *Kilometer Fee for Heavy Goods Vehicles The Swiss Experience Driver for Introduction : Transit Traffic*. Budapest, Hungary.
- Barbaresso, J., & Johnson, P. (2014). *Connected Vehicle Infrastructure Deployment Considerations: Lessons Learned from the Safety Pilot Model Deployment*. Detroit, USA.
- Beier, W., & Rodriguez, R. L. (2005). *EG5 on GNSS technologies for EFC Open issues to enable the widespread introduction of GNSS-based EFC services in Europe Final report*. 15.
- Ben-Akiva, M., & Bierlaire, M. (2003). Discrete Choice Methods and Their Applications to Short-Term Travel Decisions. *Handbook of Transportation Science*, (1985), 7–37.
https://doi.org/10.1007/0-306-48058-1_2
- Bip&Drive. (2016). *Vía-T Annual Report*. Madrid, Spain.
- Bueno, P., Gomez, J., & Manuel, J. (2016). Exploring Variations in User ´ s Acceptability towards

- different Road Pricing Schemes. *6th European Transport Research Conference*.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). (2019). *Prognose der Einnahmen aus dem Verkauf von Vignetten an Halter von im Ausland zugelassenen Fahrzeugen bei der Einführung einer Infrastrukturaabgabe*.
- Burden, M., & Nijhuis, J. (2012). Debating contactless toll charging by smartphone. *ITS International*, (April). Retrieved from <http://www.itsinternational.com/categories/charging-tolling/features/debating-contactless-toll-charging-by-smartphone/>
- Caneschi, F. (2007). CEN standardization of the electronic toll systems architecture. *ITST 2007 - 7th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, Proceedings*, 357–361. <https://doi.org/10.1109/ITST.2007.4295893>
- Carpintero, S., Vassallo, J. M., & Soliño, A. S. (2015). Dealing with Traffic Risk in Latin American Toll Roads. *Journal of Management in Engineering*, 31(2), 05014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000266](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000266)
- Catling, I., & Hamet, P. (2006). *Report of Expert Group 9 Specification of the EFC application based on satellite technologies*.
- CETMO, F. (2012). *Tarifificación vial: Aspectos clave y situación en diversos países*. Barcelona, Spain: Fundación CETMO.
- Chin-ping, C. E., Ph, D., Mu-fu, W., & Yc, C. (2016). Successful Taiwan Freeway Electronic Toll Collection (ETC) Implementation through Intelligent Transport System (ITS). *11th Asia-Pacific Transportation Development Conference and 29th ICTPA Annual Conference*, 86–92. Hsinchu, Taiwan: ASCE - American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Consejo Europeo, & Parlamento Europeo. (2011). *Guide for the application of the Directive on the interoperability of Electronic Road Toll Systems*. <https://doi.org/10.2833/6832>
- de Grange, L., Gonzalez, F., & Troncoso, R. (2015). Estimates of Price Elasticity of Demand for Urban Freeway Use with High-Frequency Control Variables: The Case of Santiago, Chile. *Applied Economics*, 47, 2326–2337. <https://doi.org/10.1080/00036846.2015.1005825>
- Department of Transportation of Texas. (2018). *Toll Road Operations* (Vol. 312).

- Ding, Z. M. (2014). A Design of Cooperative Vehicle Infrastructure System Based on Internet of Vehicle Technologies. *Applied Mechanics and Materials*, 552, 363–366.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.552.363>
- Du, W., & Chen, W. (2011). ETC development pushes combination of RFID and ITS. *13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2011)*, (May 1998), 1515–1518.
- Eisses, S., & Hamet, P. (2007). *Security aspects of the EETS*.
- Engdahl, J., & Hamet, P. (2005). *Recommendations on microwave DSRC technologies at 5.8 GHz to be used for the European electronic toll service*. 70. Retrieved from http://ec.europa.eu/transport/themes/its/studies/doc/eg01_dsrm_technologies.pdf
- Engdahl, J., & Sieber, A. (2004). *The Austrian Heavy Vehicles Tolling System*. Stevenage, UK.
- Engdahl, J., Trans, R., & Hamet, P. (2005). Final Review of draft UNI DSRC Specifications. In *Group*.
- European GNSS Agency. (2018). Galileo Technology Report Issue 3. In *Gsa*.
<https://doi.org/10.2878/743965>
- Expert Group 4. (2005). *CCertification on the equipment related to the Directive 2004/52/CE*.
- FCA, & Switzerland. (2013). *Performance-Related Heavy Vehicle Fee*.
- Felix, A., Neuenschwander, R., Ag, R., & Ag, R. (2000). *WP 3: Case Studies*.
- Feng, Z., Zhu, Y., Xue, P., & Li, M. (2010). Design and realization of expressway vehicle path recognition and ETC system based on RFID. *Proceedings - 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, ICCSIT 2010*, 7, 86–90.
<https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5563803>
- Fertel, C., Bahn, O., Vaillancourt, K., & Waaub, J. P. (2013). Canadian energy and climate policies: A SWOT analysis in search of federal/provincial coherence. *Energy Policy*, 63, 1139–1150. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.057>
- Fowler, S., Bradley, J. E., & Marquis, B. (2006). Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2006. *Transportation Research*, (January).

- Fuente, B. de la, Rodríguez, J., Rodríguez, A., García, A., Velasco, A., López, J. C., ... Temboury, M. (2011). *La Euroviñeta: Claves para la introducción del pago por uso en España*. Madrid, Spain.
- General Assembly of the State of Virginia. (2008). *Tolling Facilities Report* (Vol. 3202).
- Główny Urząd Statystyczny Statistics. (2017). Road transport in Poland in the years 2016 and 2017. In *Główny Urząd Statystyczny Statistics*.
- Golden Gate Bridge. Highway and Transportation District. (2016). Golden Gate Bridge. Retrieved from <http://goldengate.org/tolls/>
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81(184), 158–163.
- Gomez, J., Papanikolaou, A., & Vassallo, J. M. (2015). Users' perceptions and willingness to pay in interurban toll roads: identifying differences across regions from a nationwide survey in Spain. *Transportation*, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9662-6>
- Gujarati, D. N. (2003). *Basic Econometrics*.
- Händel, P., Member, S., Ohlsson, J., Ohlsson, M., Skog, I., & Nygren, E. (2014). *Smartphone-Based Measurement Systems for Road Vehicle Traffic Monitoring and Usage-Based Insurance*. 8(4), 1238–1248.
- Hayward, M. (2015). Electronic toll collection systems in Europe. *Clean Mobility and Intelligent Transport Systems*, 135–156. https://doi.org/10.1049/PBTR001E_ch7
- Hensher, D. a. (1991). Electronic toll collection. *Transportation Research Part A: General*, 25, 9–16. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(91\)90151-F](https://doi.org/10.1016/0191-2607(91)90151-F)
- Heras-Molina, J., Gomez, J., & Vassallo, J. (2016). Interoperability of electronic toll collection systems throughout Europe . Is it possible ? *6th Transport Research Arena*. Warsaw, Poland.
- Hollingsworth, M. (2005). *Integration of On-Board Units into vehicles*.
- Hsu, G., Lin, L., Jan, R., & Chen, C. (2013). Design of ETC Violation Enforcement System for Non-

- payment Vehicle Searching. *Transactions on Advanced Communications Technology*, 2(1), 169–178.
- Hsu, M., & Shih, A. (2015). A Traffic Signal Control Mechanism in a Connected Vehicle Environment. 256–257.
- Huang, C., & Burris, M. W. (2015). The short-run impact of gas prices fluctuations on toll road use. *Case Studies on Transport Policy*, 3(October), 137–150.
<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2014.12.005>
- Infraestructuras de Portugal. (2019). *Rede Rodoviária de Portugal 2018*. Lisboa.
- Infraestructuras de Portugal. (2016). Portugal Tolls. Retrieved from
<http://www.portugaltolls.com/web/portal-de-portagens/home>
- Ingenico. (2013). *Ingenico. Annual Report 2013*.
- Jain, U., Sarkar, P., Vibhuti, A., & Arora, D. (2016). Demand estimation of Personal Rapid Transit (PRT) using stated preference technique and binary logit models. *Journal of Transport Literature*, 10(2), 5–9. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n2a1>
- Jardí-Cedó, R., Castellà-Roca, J., & Viejo, A. (2015). Privacy-preserving electronic toll system with dynamic pricing for low emission zones. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8872, 327–334. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17016-9_22
- Jordán, J. G., Soriano, F. R., Catalá, P., & Montes, S. (2003). A STUDY OF ROAD PRICING SYSTEMS BASED ON GNSS / CN.
- Jou, R. C., Chiou, Y. C., & Ke, J. C. (2011). Impacts of impression changes on freeway driver intention to adopt electronic toll collection service. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 945–956. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.05.002>
- Jou, R. C., Chiou, Y. C., Kuo, C. W., & Tan, H. I. (2013). Freeway drivers' willingness to pay for an on board unit under an electronic toll collection system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.11.002>
- Jou, R. C., & Huang, G. L. (2014). Willingness to pay price for tolls and on-board units for short-distance freeway users who normally avoid toll boots. *Transport Policy*, 31, 10–18.

<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.11.001>

Kamarulazizi, K. (2010). Electronic Toll Collection System Using Passive RFID Technology. *Theoretical and Applied Information Technology*, 11(2), 70–76.

Kapsch. (2013). *Soluciones para el Peaje*.

Kottenhoff, K., & Brundell Freij, K. (2009). The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging - The case of Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.09.004>

Lamy, B. (2012). 5 . 9 GHZ , WHICH FUTURE IN EUROPE?

Lee, W. H., Tseng, S. S., & Wang, C. H. (2008). Design and implementation of electronic toll collection system based on vehicle positioning system techniques. *Computer Communications*, 31, 2925–2933. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2008.05.014>

Limelight. (2012). *2012 Road User Satisfaction Survey*.

Lu, S., He, T., & Gao, Z. (2010). Electronic toll collection system based on global positioning system technology. *International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, CESCE 2010*, 2, 11–14. <https://doi.org/10.1109/CESCE.2010.147>

Matas, A., Raymond, J. L., & Ruiz, A. (2012). Traffic forecasts under uncertainty and capacity constraints. *Transportation*, 39, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11116-011-9325-1>

McKinnon, A. C. (2006). A review of European truck tolling schemes and assessment of their possible impact on logistics systems. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 9(March 2015), 191–205. <https://doi.org/10.1080/13675560600859110>

Mcnew, J. (2010). *5.9 GHz Tolling Systems*.

Memarian, B., Jeong, D. H. S., & Uhm, D. (2012). Effects of survey techniques on on-board survey performance. *Transport Policy*, 21, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.006>

Mesqui, J., & Hamet, P. (2005). *Recommendations on enforcement (including cross - border enforcement) for the EETS*.

- Ministerio de Fomento. (2018). *Los transportes y las infraestructuras. Informe anual 2017*.
Ministerio de Fomento.
- Ministerios de Obras Públicas Transportes y Telecomunicaciones. (2003). *Cuenta de Gestión MOPTT 2003*.
- Mizutani, F., & Uranishi, S. (2008). Privatization of the Japan Highway Public Corporation: Focusing on organizational structure change. *Transport Reviews*, 28, 469–493.
<https://doi.org/10.1080/01441640701791749>
- Nowacki, G., Mitraszewska, I., & Kami, T. (2011). THE NATIONAL AUTOMATIC TOLL COLLECTION SYSTEM FOR THE REPUBLIC OF POLAND. *Transport and Telecommunication*, 9(2), 24–38.
- Numrich, J., Ruja, S., & Voß, S. (2013). Global Navigation Satellite System based tolling: state-of-the-art. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, 13(2012), 93–123. <https://doi.org/10.1007/s11066-013-9073-9>
- Odeck, J., & Kjerkreit, A. (2010). Evidence on users' attitudes towards road user charges-A cross-sectional survey of six Norwegian toll schemes. *Transport Policy*, 17(6), 349–358.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.04.001>
- Oehry, B. (2010). *Swiss Heavy Vehicles Fee LSVA Implementation and Experiences*. Basel, Switzerland.
- Ogden, K. W. (2001). Privacy issues in electronic toll collection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9, 123–134. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00041-3)
- Öörni, R., & Korhonen, T. O. (2014). eCall minimum set of data transmission – results from a field test in Finland. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(October 2013), 639–647.
<https://doi.org/10.1049/iet-its.2013.0113>
- Papadimitratos, P., Fortelle, A. D. La, Paristech, M., Evenssen, K., & Asa, Q. (2009). Vehicular Communication Systems : Enabling Technologies , Applications , and Future Outlook on Intelligent Transportation. *IEEE Communications Magazine*, (November), 84–95.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5307471>
- Parlamento Europeo. (2008). *Pricing systems for road freight transport in EU Member States*

and Switzerland. <https://doi.org/10.1002/9780470752272.ch12>

- Pascale, a., Deflorio, F., Nicoli, M., Dalla Chiara, B., & Pedroli, M. (2015). Motorway speed pattern identification from floating vehicle data for freight applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 51(305), 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.018>
- Pecegueiro, J. (2006). *Recommendations on enforcement specifications and technologies for the EETS*.
- Perrett, K. (2005). *Recommendations on parameters to be stored in on-board equipment designed for use with the European Electronic Toll*. Retrieved from http://ec.europa.eu/transport/its/studies/doc/eg02_classification.pdf
- Persad, K., Walton, C., & Hussain, S. (2007). *Electronic vehicle identification: Industry standards, performance, and privacy issues*. 1–3. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=811155>
- Philipp, K. (2006). *The Role of Financial Institutions Payment and contractual aspects of EETS*.
- Pickford, A., & Blythe, P. (2006). Road User Charging and Electronic Toll Collection. In *Book* (Vol. 1).
- Pietrzyk, M. C. (2010). *Cost-Effectiveness Analysis of AVI/ETTM for Florida's Turnpike System*. Tampa, Florida: University of South Florida.
- Prah, L. (2012). *Toll collection system in the Republic of Slovenia*.
- Prud'homme, R., & Bocarejo, J. P. (2005). The London congestion charge: A tentative economic appraisal. *Transport Policy*, 12, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.03.001>
- Q-FREE. (2013). *Q-FREE annual Report 2013*. Trondheim, Norway.
- Rapp, M. H., & Balmer, U. (2004). *The Swiss Distance Related Heavy Vehicle Fee (LSVA) - a Novel Approach to Area-Wide Road Charging*.
- Rdw. (2012). *Road Pricing in Europe*. 1–178.
- Ren, Z., & Gao, Y. (2009). Design of electronic toll collection system in expressway based on

- RFID. *Proceedings - 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, ESIAT 2009*, 3, 779–782.
<https://doi.org/10.1109/ESIAT.2009.555>
- Riley, P. F. (2008). The tolls of privacy: An underestimated roadblock for electronic toll collection usage. *Computer Law and Security Report*, 24(6), 521–528.
<https://doi.org/10.1016/j.clsr.2008.09.006>
- Rizzi, L. I., & Ortúzar, J. de D. (2003). Stated preference in the valuation of interurban road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 35(1), 9–22. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00082-3)
- Schade, J., & Baum, M. (2007). Reactance or acceptance? Reactions towards the introduction of road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41, 41–48.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.008>
- Schwarz-Herda, F. (2013). ROAD PRICING FOR HEAVY VEHICLES : A KEY FOR FINANCING ROAD INFRASTRUCTURE? *Roads*, 358, 1–3.
- Sheehan, R. (2008). *Technologies That Complement Congestion Pricing*.
- Sistema de Identificação Electrónica de Veículos. (2010). *OBU Technical Specification*.
- Sorensen, P. a, & Taylor, B. D. (2005). Review and Synthesis of Road-Use Metering and Charging Systems. *Report Commissioned by the Committee for ...*, 1–153.
- Toll Collection. (2012). *Interoperability with Toll2Go in Austria* (p. 8). p. 8.
- Train, K. E. (2003). Discrete Choice Methods with Simulation. *Cambridge University Press*, 1–388. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753930>
- Tren, D. G. (2006). *Definition of the EFC Application for the EETS Based on Microwave Technologies*. (1), 1–32.
- Unión Europea. *Tratado de Funcionamiento la Unión Europea*. , (2010).
- Unión Europea. (2011). *Libro blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por la política de transportes competitiva y sostenible*. 35. Retrieved from <http://eur->

lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:ES:PDF%5Cnhttp://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0144:EN:NOT

Union Rutière de France. (2018). *Faits & Chiffres 2018. Statistiques des Mobilités en France et en Europe* (1.).

Vassallo, J. M., Ortega, A., & Baeza, M. D. L. Á. (2012). Impact of the Economic Recession on Toll Highway Concessions in Spain. *Journal of Management in Engineering*, 28(October), 398–406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000108](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000108)

Yang, H., Ozbay, K., & Bartın, B. (2012). Effects of Open Road Tolling on Safety Performance of Freeway Mainline Toll Plazas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324, 101–109. <https://doi.org/10.3141/2324-12>

Yim, Y. (1991). *Electronic Toll Collection System (ETC) User Survey*. Berkeley, CA, EEUU.

Zabic, M. (2011). *GNSS-based Road Charging Systems*.

9. ANEXO: DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

La presente tesis doctoral es el resultado de cinco años de investigación en el ámbito de los sistemas inteligentes de transporte y del análisis socio-económico de las infraestructuras. Así, la producción científica de dicha investigación, además de para la redacción de esta tesis, ha sido divulgada en diferentes congresos internacionales como:

- 6th Transport Research Arena (2016). 'Interoperability of electronic toll collection systems throughout Europe: is it possible?'
- XII Congreso de Ingeniería del Transporte (2016). Electronic toll collection systems and their interoperability: the state of art.
- 96th Transportation Research Board (2017). Measuring drivers' attitudes toward use of electronic toll collection systems in Spain.
- 98th Transportation Research Board (2019). Free flow interoperable toll highway concessions in Santiago de Chile: lessons learned after fifteen years.

También se han publicado diferentes artículos en revistas indexadas en el 'Journal Citation Report' (JCR):

- "Measuring Drivers' Attitudes Toward Use of Electronic Toll Collection Systems in Spain". Heras-Molina, J., Gomez, J., Vassallo, JM. (2017). Transportation Research Record, vol. 2670(1), pages 1-8. January. DOI: 10.3141/2670-01
- "Drivers' adoption of electronic payment in the Spanish toll road network". Heras-Molina, J., Gomez, J., Vassallo, JM. (2017). Transportation, Springer, vol. 46(3), pages 931-955, June. DOI: 10.1007/s11116-017-9831-x

Asimismo, una parte de esta tesis doctoral se desarrolló a partir del Proyecto Fin de Máster 'Establecimiento de las bases teóricas de las tecnologías de cobro electrónico de peaje para su incorporación en el Sistema Europeo de Telepeaje' del Máster Universitario en Sistemas de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid.

Por último, es importante señalar que además de en el ámbito académico, la investigación que ha dado lugar a esta tesis doctoral también se ha publicado en:

- Establecimiento de las bases teóricas de las tecnologías de cobro electrónico de peaje para su incorporación en el Sistema Europeo de Telepeaje. Nº2 / 2015. De las Heras Molina, J. Cuadernos Tecnológicos de la PTC (2015).
- Asociación Público-Privada en América Latina. Afrontando el reto de conectar y mejorar las ciudades. Vassallo, JM., Bueno, P., Garrido, L., García, A., López, L., de las Heras, J. Banco de Desarrollo de América Latina – CAF (2019). ISBN: 978-980-422-117-0