

Establecimiento de las bases teóricas de las tecnologías de cobro electrónico de peaje para su incorporación en el Sistema Europeo de Telepeaje

Javier de las Heras Molina
Juan Gómez Sánchez
José Manuel Vassallo Magro



Madrid, marzo de 2016

© Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC). Av. General Perón, 26 - 2º iz, 28020 Madrid.
Reservados todos los derechos. ISBN: 978-84-617-8686-2



Índice de Contenidos

Resumen.....	7
Abstract	9
1. Aproximación al problema	11
2. Objetivos y alcance de la investigación.....	14
3. Antecedentes y Estado del arte	17
3.1. Unión Europea	18
3.2. Sistemas de Telepeaje a escala nacional.....	22
3.2.A. Suiza	23
3.2.B. Austria	24
3.2.C. Alemania.....	25
3.2.D. República Checa.....	25
3.2.E. Eslovaquia.....	26
3.2.F. Polonia.....	26
3.2.G. Eslovenia.....	27
3.2.H. Hungría	27
3.2.I. Portugal	28
3.3. Documentos técnicos y científicos	28
4. Metodología de la investigación	31
5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	35
5.1. Revisión de las tecnologías de telepeaje existentes	36
5.1.1. Reconocimiento automático de matrícula (anpr)	36
5.1.2. DSRC.....	37
5.1.3. Identificación por radiofrecuencia (RFID).....	39
5.1.4. Tecnología satelital - GNSS	39
5.1.5. Tacógrafo	41
5.1.6. Comunicaciones móviles (GSM y Smartphone)	42
5.2 El peaje del futuro: Hacia la integración de servicios	43
5.3 Análisis comparativo.....	44
5.3.1. Estudio de costes	45
5.3.2. Interoperabilidad y adaptación al eets.....	46
5.3.3. Precisión y protección de datos	46
5.3.4. Vigilancia y control del fraude.....	47
5.3.5. Obsolescencia.....	48
5.3.6. Telepeaje: más que un sistema de pago.....	49
6. Conclusiones	51
7. Bibliografía.....	54



Índice de Figuras

Figura 1. Países de la UE que aplican la Directiva Euroviñeta (Elaboración propia).....23

Figura 2. Esquema de la metodología empleada en el TFM (Elaboración propia)..... 34



Resumen

En 2004, la Comisión Europea creó el Servicio Europeo de Telepeaje con el objetivo de conseguir la interoperabilidad entre los diferentes sistemas de cobro electrónico de peajes usados en Europa. Sin embargo, la falta de cooperación entre los diferentes grupos de interés (Unión Europea, administraciones nacionales y usuarios) ha impedido alcanzar esta meta una década después.

Este Trabajo Fin de Máster revisa el estado del arte de las seis principales tecnologías empleadas en el cobro electrónico de peajes a lo largo del mundo, así como las tecnologías, hoy en desarrollo, que tendrán protagonismo en un futuro. Así, el estudio se centra en las diferentes propiedades y características que presenta cada sistema, permitiendo detectar las principales fortalezas y debilidades de cada tecnología. De esta forma, es posible realizar un análisis DAFO y un análisis comparativo de las principales características. Finalmente, se realizan una serie de recomendaciones para mejorar la problemática de la interoperabilidad entre los sistemas de telepeaje.

La investigación concluye que, dada la diversidad de ventajas e inconvenientes que presenta cada tecnología, la elección de un determinado sistema de telepeaje debe tener en cuenta la superación de dichas debilidades. En este sentido, se proponen diferentes recomendaciones con el propósito de mejorar las políticas de sistemas de telepeaje a nivel europeo.



Abstract

The European Electronic Toll Service was created in 2004 with the aim of ensuring interoperability among the existing electronic toll collection systems in Europe. However, a lack of cooperation among stakeholders groups (European Union, national administrations and users) has not made possible to achieve this goal ten years later.

This Master´s Thesis develops a literature review of the six main electronic toll systems available worldwide, and provides some insight on different emerging technologies. By focusing on different operational and strategic aspects offered by each technology, the research identifies their main strengths and weaknesses. This study enables to obtain SWOT and comparative analysis. Finally, different recommendations are made to improve the current framework.

The study concludes that given the diversity of advantages and inconveniences offered by each system, the selection of a certain ETC technology should also take into account its potential to overcome the weaknesses in the current ETC framework. In this line, different policy recommendations are also proposed aimed at improving the present ETC strategy at the European level.



1. Aproximación al problema

Según el Diccionario de la Real Academia Española, un peaje supone un pago correspondiente a los derechos de tránsito o circulación por determinados lugares. De una manera más amplia, se puede definir el peaje como la tarifa o tasa que debe abonar un medio de transporte como derecho de tránsito para poder circular por una determinada infraestructura. En general, la vía sujeta a peaje otorga a los usuarios una serie de ventajas, como ahorros en los tiempos de viaje, mayores estándares de calidad y seguridad o menores costes de explotación, que no presentan las alternativas libres de peaje.

El peaje, como procedimiento para financiar infraestructuras y vías de comunicación, tiene su origen en las civilizaciones egipcia y persa, no siendo tampoco desconocido en tiempos del Imperio Romano, del que lo hemos heredado. Sin embargo, a lo largo de su historia ha sufrido una notable evolución hasta llegar a nuestros días. En la Edad Media, el peaje designaba el tributo que se exigía por el soberano o por el señor feudal a quien se hubiese concedido ese privilegio, para que las personas o las mercancías pudiesen transitar por determinados puntos de las vías de comunicación, cruzar un río, acceder a una ciudad, etc. 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 la que el pago del peaje autorizaba a discurrir; esto es, funcionaba el peaje a modo de verdadera aduana interior (Enciclopedia Jurídica, 2014).

Actualmente, esta figura se concibe como el medio a través del cual, mediante el abono de una determinada cuantía, los usuarios de determinadas obras públicas, normalmente carreteras, puentes y túneles, participan en la financiación de su construcción y/o mantenimiento. A modo de ejemplo, es habitual que en España se acuda al peaje como medio de pago al contratista-concesionario que se compromete a la construcción y/o explotación de una obra de las características ya señaladas, pues a él es a quien se faculta a cobrarlo de las personas que hagan uso de las mismas. De esta forma, para que una determinada obra pública sea financiada mediante el sistema de peaje, ha de tratarse de obras destinadas al uso público directo e inmediato, basándose en la idea de pago por uso.

Sin embargo, uno de los grandes cambios que ha vivido el mundo de los peajes es la paulatina introducción del cobro electrónico de peajes, conocido popularmente como telepeaje o ETC, por sus siglas en inglés. De este modo, fueron apareciendo diferentes tecnologías, cuyo objetivo sería eliminar los tradicionales puestos de peaje, con barrera y pago manual, por otros que permitieran un tráfico más fluido y con menos retenciones. Por esta razón, estas tecnologías se introdujeron en primer lugar en el ámbito urbano para pasar años después al interurbano.

Otro de los aspectos que permite este tipo de tecnologías es la posibilidad de eliminación de las estaciones de peaje permitiendo a los usuarios pagar por la distancia realmente recorrida, mediante una tarifa por kilómetro. Así, se han ido desarrollando diversas tecnologías como el DSRC (Dedicated Short-Range Communication), GNSS (Satellite positioning) o el tacógrafo, entre otras.

En las autopistas y carreteras de peaje europeas se pueden encontrar numerosos sistemas de peaje electrónico, en función de las decisiones de cada uno de los Estados miembro (Nowacki & Niedzicka, 2009). Ante la evidencia de que esta realidad crea ineficiencias, sobrecostes y pérdida

de competitividad (Hamilton & Eliasson, 2012), la Comisión Europea está intentando unificar las técnicas para conseguir la interoperabilidad de los diferentes sistemas, es decir, que con un solo sistema se puedan recorrer todas las autopistas de la Unión (B. Oehry, 2007).

Para alcanzar el mencionado objetivo de la interoperabilidad, la Unión Europea ha venido desarrollando en los últimos años un importante trabajo técnico y legislativo que tiene en la Directiva 2004/52/EC su máximo referente. Dicha Directiva fue adoptada para remediar la fragmentación en el ámbito del Servicio Europeo de Telepeaje (EETS por sus siglas en inglés) y propiciar la supresión de las barreras artificiales que dificultan el funcionamiento del mercado interior, respetando al mismo tiempo la posibilidad de tarificación a los diferentes tipos de vehículos a nivel local, nacional o internacional (Sommerville & Burden, 1997). Los diversos equipos instalados a bordo de los vehículos deben permitir la aplicación de estas políticas de tarificación viaria, respetando los principios de no discriminación entre los ciudadanos de los distintos Estados miembro (Angelis & Giorgi, 2013).

Como se mencionaba anteriormente, en este período de tiempo se ha producido un desarrollo de los diferentes sistemas nacionales de telepeaje en un gran número de países europeos con sus propias particularidades y necesidades (Pickford & Blythe, 2006). Asimismo, en el ámbito académico se ha desarrollado una importante literatura científica y técnica sobre los diferentes sistemas de peaje electrónico. Ambos elementos deberán tenerse en cuenta a la hora de crear un marco de interoperabilidad.

A pesar de lo anteriormente señalado, la realidad es que la consecución de la interoperabilidad en la Unión Europea está lejos de alcanzarse debido, fundamentalmente, a la complejidad del mismo.

En este marco de referencia se asienta el presente Trabajo Fin de Máster de investigación, cuya principal aspiración es realizar una revisión bibliográfica de los diferentes sistemas de cobro electrónico de peaje, así como establecer las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos.

2. Objetivos y alcance de la investigación

De acuerdo con la aproximación del problema realizada anteriormente, el objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster de investigación es el establecimiento de un marco teórico para la mejora de la interoperabilidad dentro del Sistema Europeo de Telepeaje. Asimismo, existen una serie de objetivos secundarios, o subobjetivos, como el análisis de las tecnologías de telepeaje maduras y plenamente operativas hoy en día, así como las que se encuentran en desarrollo y que ganarán protagonismo en los próximos años; la realización de análisis D.A.F.O. y de diferentes propiedades de todas las tecnologías; y la realización de recomendaciones que permitan afrontar las debilidades de los sistemas.

Dichos objetivos, se fundamentan básicamente en la necesidad observada de realizar un estudio pormenorizado de cada uno de los sistemas de cobro electrónico detectando sus debilidades y fortalezas y las amenazas y oportunidades (análisis DAFO). Este estudio, no existente en la actualidad, facilitaría la aplicación efectiva de las Directivas europeas, así como un mejor conocimiento de las diferentes alternativas existentes. Asimismo, este análisis dará lugar a un punto de partida óptimo para emprender diferentes estudios de investigación en el futuro, como modelos para determinar el sistema de telepeaje más apropiado en función de la red o de las necesidades de los usuarios.

Asimismo, es preciso remarcar que esta investigación no sólo se centra en las tecnologías existentes en la actualidad, sino que también profundiza en aquéllas que están en fase de desarrollo y que en los próximos años estarán vigentes. Este elemento es especialmente importante en un campo en el que el desarrollo tecnológico es constante y se corre el riesgo de que una determinada tecnología quede obsoleta en un corto espacio de tiempo.

Tal y como se mencionaba anteriormente, el presente trabajo de revisión bibliográfica puede constituir un extraordinario punto de partida para próximas investigaciones, que dada la pretensión del presente trabajo fin de máster, sólo se mencionarán sin entrar a su análisis. En este ámbito se puede enmarcar las recomendaciones que se realizan y que permiten mejorar los principales problemas del Sistema Europeo de Telepeaje.

El alcance de la investigación será el análisis de los siguientes parámetros de cada uno de los sistemas de cobro electrónico de peaje que actualmente están en servicio:

- **Funcionamiento:** A pesar de que los fundamentos tecnológicos son propios de otras ramas de la ingeniería, como la industrial y la de telecomunicaciones, cualquier análisis de los sistemas de peaje electrónico debe abordar su funcionamiento, puesto que dicho aspecto influirá en el resto, como los costes, fiabilidad, etc.
- **Fiabilidad:** Entendida como la probabilidad de buen funcionamiento del sistema de cobro. Todo sistema tendrá pues la aspiración de alcanzar una fiabilidad del 100%. Sin embargo, esta meta es difícil de alcanzar y cada sistema llegará hasta un porcentaje más o menos alto que debe ser tenido en cuenta.
- **Vigilancia:** La viabilidad de cualquier sistema de peaje viene asociado a que los usuarios abonen dicho peaje. Dicho propósito se cumple al 100% cuando se emplea el sistema clásico de barreras, sin embargo, cuando no existen barreras físicas, el fraude aparece por lo que

debe ser combatido mediante medidas de vigilancia y control.

- Protección de los datos de los usuarios y privacidad: La libertad de circulación, así como la privacidad de los datos personales (movimientos, cuentas bancarias, etc.) son derechos básicos de toda persona, por ello, deben gestionarse con la mayor seguridad y transparencia posibles. Dada la creciente importancia que están adquiriendo estos asuntos en la sociedad del siglo XXI, no deben obviarse en el presente trabajo.
- Costes: Probablemente se trate de uno de los parámetros que más se tendrán en cuenta por parte de los decisores políticos y por los ciudadanos a la hora de elegir uno u otro sistema de telepeaje. Dentro de los costes se diferencia entre los costes de infraestructura, de dispositivos a bordo de los vehículos y de gestión y explotación del servicio.
- Vida útil: Es la duración estimada que cada tecnología específica puede tener, cumpliendo correctamente con la función para el cual ha sido creada, antes de tener que ser sustituida. La vida útil estará relacionada con los costes del sistema y con la fiabilidad, así como con posibles cambios en la normativa que pueden afectar a la vida útil.
- Interoperabilidad y su relación con el Servicio Europeo de Telepeaje: La interoperabilidad, objetivo fundamental del Servicio Europeo de Telepeaje, hace referencia a la posibilidad de que dos o más sistemas de cobro electrónico de peajes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada. A la hora de analizar los sistemas de telepeaje, se diferencian claramente aquéllos que son propuestos por la Comisión como interoperables y aquéllos que no lo son.
- Posibles signos de obsolescencia: Debida fundamentalmente a actividades de investigación y desarrollo que permiten en períodos de tiempo relativamente breves fabricar y construir equipos mejorados con capacidades superiores a las de los precedentes. Este hecho, común a los diferentes componentes informáticos, también está presente en los sistemas de telepeaje y, por tanto, debe ser analizado como un parámetro más a valorar.

En cuanto a las tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo, el alcance de la investigación se centrará en las oportunidades de reducción de costes que ofrecen estos sistemas incipientes; el período de tiempo en el que podrían estar operativas; así como las ventajas, desde el punto de vista de la fiabilidad, vida útil, protección de la privacidad y mejora de la interoperabilidad, respecto a los sistemas actuales.

Estos aspectos relacionados con los objetivos y, principalmente, el alcance del trabajo se desarrollarán en mayor profundidad en los epígrafes siguientes.



3. Antecedentes y Estado del arte

Para la redacción del presente Trabajo Fin de Máster de investigación se han realizado un profundo análisis de la bibliografía y documentación existente en el tema de los sistemas electrónicos de peaje y su relación con el objetivo de lograr la interoperabilidad a escala europea.

El presente estudio sobre el estado del arte se puede dividir, sin pérdida de generalidad, en tres ámbitos diferentes:

- Documentación europea: Realizada por los diferentes órganos de decisión de la Unión Europea como la Comisión y el Parlamento. Se tratan de los diferentes textos legislativos, así como las conclusiones sobre la materia de diferentes grupos de expertos.
- Experiencias nacionales: A lo largo de los últimos años, diferentes países europeos y de otras regiones del mundo han introducido sistemas de cobro electrónico de peajes, por lo que sus experiencias constituyen una excepcional referencia de cada una de las tecnologías, así como de sus ventajas e inconvenientes.
- Literatura científica: Dado que el presente trabajo es académico, es fundamental recoger en este estado del arte los análisis científicos más relevantes en la materia, que aportan al mismo un punto de vista objetivo y técnico.

A continuación, se procede al análisis pormenorizado de cada uno de estos ámbitos.

3.1. Unión Europea

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 libre 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.

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 basada en el objetivo de la apertura de los mercados del transporte y la creación de unas condiciones de competencia equitativa. En este sentido, se puede observar que la necesidad de garantizar en un corto espacio de 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 (Comisión Europea, 2012) 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 extensamente 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 del transporte 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 sistema moderno, eficiente y fácil de utilizar. Lo que queda patente en todo caso es la importancia para incluir la supresión de los obstáculos técnicos, administrativos y jurídicos existentes.

La Directiva 2004/52/CE 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, se deben suprimir las barreras artificiales que dificultan el funcionamiento del mercado interior, respetando al mismo tiempo la posibilidad de que los Estados miembro o la Comunidad 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 miembro.

De esta forma, la Directiva señala que su objetivo fundamental es 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. 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 y de los sistemas futuros, y los costes de su adopción por 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 interaccionar 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, 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 por sus siglas en inglés). Dichos equipos de instalación a bordo serán interoperables y capaces de comunicar 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 alcanzar la interoperabilidad a través de los dispositivos a bordo limitando las posibles tecnologías.

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 técnico 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. Sin embargo, esta Decisión sí 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 esta tecnología de peaje electrónico permite la recaudación del mismo sin barreras físicas, lo que redundará en beneficio de la seguridad y de la disminución de la congestión.

De este modo, la Decisión de la Comisión 2009/750/CE trata a lo largo del 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 este Trabajo Fin de Máster de investigación. En este sentido, se asevera que son los Estados miembros los que se asegurarán de la 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 puede ser complicada. 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, por la que se establece el peaje en las carreteras de la Unión Europea. Sin embargo, también ofrece una imagen general de los diferentes sistemas de telepeaje y sus ventajas e inconvenientes.

Otro documento, titulado Guide for the application of the directive on the interoperability of Electronic Road Toll System (Consejo Europeo & Parlamento Europeo, 2011), 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.

Aunque se pueda pensar que estos documentos no tienen la relevancia técnica y científica suficientes para formar parte de un trabajo de investigación, sí presentan importantes ventajas como para ser incluidos en el presente estado del arte. Entre ellas cabe destacar 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 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 este Trabajo Fin de Máster de investigación, ya que tratan aspectos tecnológicos, técnicos y de gestión, económicos y contractuales. Por tanto, de sus textos saldrá una parte importante de la bibliografía empleada tanto en el artículo como en el resto de la investigación.

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 visto 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 trataron 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 los equipos a emplear deben tener, según el Grupo 4 (Expert Group 4, 2005) "mendeley" : { "formattedCitation" : "(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, se encargó 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.

3.2. Sistemas de Telepeaje a escala nacional

En los últimos años, diferentes países europeos han introducido en su red de carreteras diferentes sistemas de tarificación basadas en el principio de pago por uso. La gran mayoría de estos estados se sitúan en el centro de Europa, tal y como se puede observar en la Figura 1 siendo los que sufren los mayores niveles de congestión y de uso de sus carreteras por parte de vehículos de transporte de mercancías.

Las tecnologías de telepeaje empleadas difieren según los diferentes países, aunque los principales son: DSRC (Austria, República Checa, Polonia, Eslovenia, Hungría y Portugal), 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.

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 cada uno de estos casos por separado para completar el estado del arte sobre la materia.

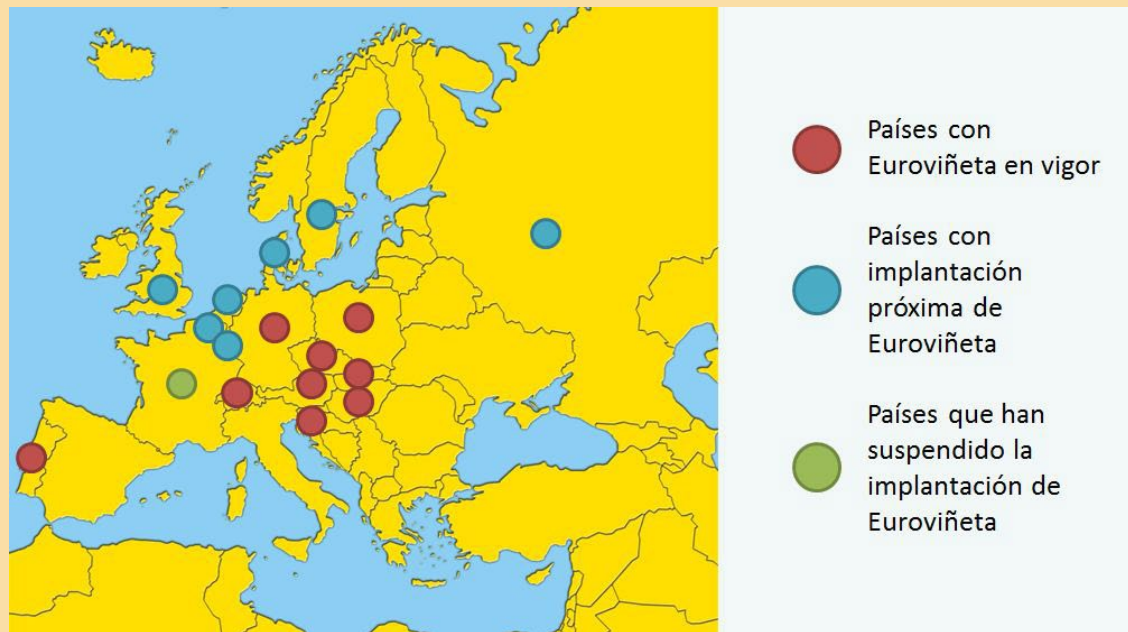


Figura 1. Países de la UE que aplican la Directiva Euroviñeta (Elaboración propia).

3.2.A. 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 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 tarifada, 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 OBE (On Board Equipment), instalado en el interior del vehículo y conectado de manera permanente a un tacógrafo. El OBE 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 OBE que debe asociarse a una cuenta bancaria. Mensualmente, cada usuario debe enviar los datos de la lectura de su OBE, 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 FCA realiza, a partir de las lecturas enviadas por los conductores, los cálculos y comprobaciones necesarias pasando a cobrar a los usuarios.

Gracias al sistema GPS instalado en cada OBE y una serie de pórticos de vigilancia (enforcement) con tecnología DSRC, la FCA 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 que, mediante la tecnología DSRC, permiten activar y desactivar el OBE cuando el vehículo accede o abandona el país. De esta forma, se consigue que el OBE 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 pórticos 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). La importancia de la vigilancia en 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 mandar los datos del tacógrafo a las administraciones.

3.2.B. 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 tarifada 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 pórticos que hay instalados en las carreteras austríacas (Schwarz-Herda, 2013). El sistema de pórticos 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 mediante medios automáticos. Dado que este Trabajo Fin de Máster de investigación se centra en los sistemas electrónicos de peaje, sólo se hará referencia a los segundos. El enforcement automático se compone de varios instrumentos. En primer lugar, un importante número de pórticos 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.

3.2.C. Alemania

Alemania es la principal potencia económica, industrial y demográfica de la Unión Europea. Esta realidad hace que el transporte de mercancías haya sufrido un constante crecimiento en las últimas décadas. 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 en el país teutón fue la primera en combinar la técnica de localización mediante satélites (GNSS) y la tecnología de telefonía móvil (GSM). Al igual que sucede en otras tecnologías, el cobro se realiza automáticamente a través de un equipo instalado en el vehículo, el OBE, 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 OBE 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 pódicos de enforcement instalados a lo largo de la red de pago. Estos pódicos verifican si los vehículos sujetos al pago del peaje han sido registrados correctamente en el sistema, además de comprobar si el OBE 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.

3.2.D. 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 tarifada actualmente en la República Checa comprende un total de 1.500 km, pertenecientes a autopistas, vías rápidas y carreteras de primera clase (Myto CZ, 2014).

La operación del sistema de telepeaje en la República Checa se basa en la tecnología DSRC y en dispositivos OBU, que incorpora 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 pódicos DSRC, y combinarlo con un nuevo modelo basado en la tecnología satelital (GNSS), cuyo alcance posibilita una mayor flexibilidad y la tarificación de las carreteras de ámbito rural (KAPSCH, 2008).

Las labores para controlar el cobro son ejercidas en primer lugar por diversos pódicos 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.

3.2.E. 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: 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 (SkyToll, 2014).

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 las secciones recorridas. 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 de 98,9% (Fundación CETMO, 2012).

3.2.F. 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 7.000km en 2018 (ViaTOLL, 2014).

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, Mitraszewska, & Kami, 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 lo 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.

3.2.G. 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, el país 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 a 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 (recuérdese la situación central del país 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 a lo 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%.

3.2.H. 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 varios centros de pódicos repartidos por el país. En lo referente a la vigilancia en el control del cobro, la red magiar de carreteras cuenta con 74 pódicos fijos en las principales autopistas, así como con 100 vehículos de control móvil y la labor policial.

3.2.1. 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, como los anteriormente expuestos, por lo que no se ve perjudicado por la excesiva circulación de vehículos extranjeros que pudiesen producir congestión 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, Lobo, Rodrigues, & Couto, 2014). El sistema de ETC elegido es el DSRC controlado a través de pódicos colocados a lo largo de la red de carreteras. 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.

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 luso a la Guardia Civil.

3.3. Documentos técnicos y científicos

Tras el análisis de los documentos europeos y de cada uno de los Estados que cuentan con sistemas de telepeaje, la revisión de artículos técnicos y científicos permite ampliar enormemente el espectro de la investigación, ya que introducen 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 ETC 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 (ITS por sus siglas en

inglés), bien desde el punto de vista de la física y la electrónica analizando el funcionamiento de los dispositivos. Ambas aproximaciones son igualmente válidas para la finalidad que se pretende con la presente investigación, por lo que se pasarán a desarrollar a continuación.

Comenzando por la tecnología de Reconocimiento automático de matrícula (ANPR), empleada en numerosos peajes urbanos, como en el caso de Londres, Estocolmo y Milán (Prud'homme & Bocarejo, 2005). Asimismo, es utilizada 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.

El sistema DSRC (Dedicated short-range communications) 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 (Lee, Tseng, & Wang, 2008). 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) o de forma conjunta con playas de peaje tradicionales con barreras. El sistema DSRC es especialmente indicado en aquellas redes con un alto tráfico y pocos enlaces (Yang, Ozbay, & Bartin, 2012).

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 (Ren & Gao, 2009), (Feng et al., 2010) y (Du & Chen, 2011). 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.

Las tecnologías vía satélite se basan en el conocimiento en todo momento de la posición del vehículo y, de esta forma, medir el uso de la carretera y calcular el peaje a pagar (Lu, He, & Gao, 2010). Actualmente este sistema se utiliza en numerosos países europeos y es el que más respaldo está recibiendo de las autoridades comunitarias (Jordán et al., 2003). A pesar de que actualmente la precisión de este sistema es menor que la de otros, como el DSRC, se espera una importante mejora en los próximos años y en éste y otros ámbitos (Numrich, Ruja, & Voß, 2013).

El tacógrafo es un dispositivo electrónico, obligatorio para los vehículos pesados tanto de pasajeros como de mercancías, que registra diversos sucesos originados en el propio vehículo como la distancia recorrida, tiempos de descanso, carga y descarga, etc. En lo referente al pago de peajes, esta tecnología 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 aplicar la tarifa (Balmer, 2006).

Las comunicaciones vía telefonía móvil jugarán un papel cada vez más destacado en los próximos años ante el cada vez más evidente auge de los teléfonos móviles inteligentes (Händel et al., 2014). A pesar de que se trata de una tecnología en 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 cuanto a otras tecnologías en desarrollo, cabe destacar la importancia de los dispositivos que integran diferentes sistemas inteligentes de transporte, como lo harán a partir de 2018 con el eCall (Öörni & Korhonen, 2014). 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, Fortelle, Paristech, Evenssen, & Asa, 2009). Asimismo, se están produciendo desarrollos importantes en los procedimientos de transmisión de datos, como es el caso de la comunicación a 5,9 GHz (Lamy, 2012).

Tras la revisión anterior, se puede observar fácilmente cómo unas tecnologías tienen una mayor importancia dentro de la literatura científica que otras, como es el caso de los sistemas DSRC (Ansari et al., 2013), el mayoritario en Europa, y lo de radiofrecuencia, los más empleados en Estados Unidos (General Assembly of the State of Virginia, 2008).

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), (Iqbal & Lim, 2008), (Ogden, 2001) y (Hensher, 1991), 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.

Otros trabajos se centran en la importancia de las labores de vigilancia y control del pago del peaje. El impago del peaje por parte de un grupo de usuarios puede llegar a provocar una reducción significativa en los ingresos del operador. Por esta razón, numerosos autores han tratado esta problemática (Hsu et al., 2013), que en el marco de sistemas de telepeaje no puede solventarse con el uso de barreras físicas. 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.



4. Metodología de la investigación

La metodología seguida en el presente Cuaderno Tecnológico de la Carretera, persigue determinar la relevancia e importancia de la interoperabilidad dentro 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 falta de interoperabilidad entre los diferentes sistemas de telepeaje que deben integrar el EETS. 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 realizará 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 2004/52/EC, en donde se define el Servicio Europeo de Telepeaje (EETS) como solución a los problemas de interoperabilidad que sufren los diferentes sistemas nacionales de peaje. 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 EETS a partir del principio un vehículo, un contrato, un dispositivo. Así, este Trabajo Fin de Máster se centra en la parte relativa a los dispositivos de telepeaje. Las autoridades europeas han propuesto tres tecnologías principales para el cobro electrónico de peajes dentro de la UE: DSRC, GNSS y GSM-GPRS. Sin embargo, a pesar de que la EETS 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 y, asimismo, encontrar mejores soluciones para la interoperabilidad y para labores de ayuda al telepeaje como los sistemas de vigilancia.

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:

- 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.
- GNSS: La tecnología satelital utiliza la posición del vehículo para determinar el peaje a pagar

por el usuario.

- Tacógrafo: Recoge la distancia recorrida por el conductor a través de un dispositivo a bordo conectado con un odómetro.
- Comunicaciones móviles (GSM y Smartphone): Basados en aplicaciones móviles y las frecuencias de la telefonía.

Asimismo, se hará referencia a diferentes sistemas emergentes que, muy probablemente, tendrán una gran importancia en un futuro cercano. Estas tecnologías están íntimamente relacionadas con los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), como la comunicación a 5,9 GHz, basada en la comunicación entre el vehículo y las infraestructuras ITS, y por tanto pueden ser empleadas por los sistemas de telepeaje.

Otros nuevos desarrollos son la aplicación eCall, que será obligatoria en la UE a partir de 2018, y permitirá que en caso de accidente grave llamar automáticamente a los servicios de emergencia e informar del lugar exacto del percance; y los sistemas de tarificación de seguros basados en el uso del vehículo, en el que se utiliza el kilometraje recorrido como factor de tarificación en el seguro del vehículo.

A la hora de organizar la información, en primer lugar se ha optado por realizar una descripción de cada tecnología. Así, se pretende establecer los principios que rigen el funcionamiento de cada sistema y centrar el marco de la investigación. Posteriormente, se prestará una especial atención a diferentes factores que permiten diferenciar y comparar las diferentes tecnologías. Entre estos factores destacan la precisión a la hora de cobrar, los costes (tanto para el operador como para los usuarios), posibilidad de interoperabilidad, obsolescencia o métodos de vigilancia, entre otros.

La parte más importante de la investigación es, sin duda, el análisis de la información obtenida en los pasos anteriores. Este estudio comienza con un análisis D.A.F.O., en el que se comparan las diferentes tecnologías. El análisis D.A.F.O. empleado en este Trabajo Fin de Máster de investigación sigue la metodología general que se suele emplear en este tipo de análisis. En primer lugar, se establecen los objetivos y metas (señalados en el apartado 2). 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, y cuáles son 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.

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.

A continuación, 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

EETS, 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.

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

Esta metodología se ha seguido a la hora de realizar el artículo de investigación que se encuentra en la segunda parte del presente TFM. Además, 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 2:

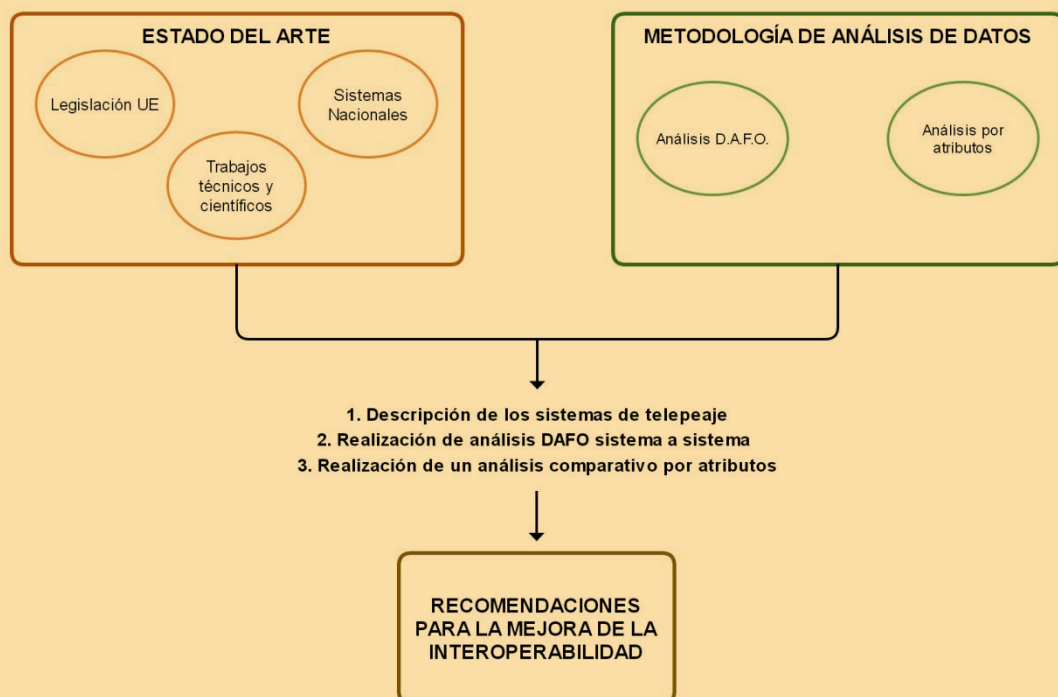


Figura 2. Esquema de la metodología empleada en el TFM (Elaboración propia)



5. Desarrollo de la Investigación

De acuerdo con lo expuesto en capítulos anteriores, el desarrollo de la investigación, una vez realizada la amplia revisión bibliográfica, comienza con la revisión de las seis tecnologías de telepeaje existentes más empleadas en la actualidad. Posteriormente, se continúa con las diferentes previsiones a futuro de los sistemas de telepeaje. Finalmente se procede a la realización de un análisis comparativo de las diferentes tecnologías, basado en el estudio de los costes, adaptación al EETS, 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 UE para su uso en el ámbito del EETS.

5.1 Revisión de las tecnologías de telepeaje existentes

5.1.1. 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 madura y altamente automatizada. El ANPR se ha utilizado principalmente para propósitos el cobro en los peajes urbanos, como Londres, Estocolmo y Milán. 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 de 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 contra una lista de registros para 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 ANPR requiere generalmente que los usuarios se registren en el sistema de peaje antes de usar la carretera de peaje para crear una cuenta de pago, o para pagar por viaje. Así, los peajes pueden ser pre-pagados o pospago.

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 pórticos 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, la falta de estandarización de la matrícula, etc. Esto hace necesario la comprobación manual de matrículas para corregir posibles errores. Además, nos encontramos con la preocupación de protección de datos, ya que los conductores y pasajeros podrían ser identificados a través de este sistema, con una falta de armonización legal en todos los países en este sentido.

Las tecnologías ANPR ya implantadas, por lo general, se han mostrado como altamente rentable. Hay varias razones que pueden señalarse a este respecto. En primer lugar, el uso del vídeopeaje como el principal sistema ETC no precisa ni de dispositivos en el vehículo y ni pórticos adicionales a

efectos de vigilancia. En segundo lugar, el sistema en general, implica menores costes operativos que otros sistemas de telepeaje, y menos equipo de carretera, es decir, requiere menos costes de inversión. Además, la tecnología de peaje de vídeo está muy automatizada, con un esfuerzo de trabajo que depende principalmente de la posterior comprobación manual de la oficina. Su efectividad se ha evidenciado en casos tales como el sistema de tarificación de la congestión en Londres (Prud'homme y 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 la base de datos nacional de registro de vehículos y de conductores al día 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 la pérdida de ingresos, especialmente para los evasores de peaje extranjeros, lo que hace necesaria la verificación manual, resultando en mayores costes de operación.

El Video tolling 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 enfoque habitual es obtener imágenes de los vehículos imágenes. También puede ser utilizado para hacer cumplir otras infracciones de tráfico, como para el estacionamiento o exceso de velocidad. Sin embargo, esta tecnología presenta importantes limitaciones que hicieron que no fuera propuesto por la Directiva Europea relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje.

5.1.2. DSRC

La tecnología DSRC (Dedicated short-range communication) consiste en la transmisión de microondas de datos entre un dispositivo en el vehículo (OBU) y la infraestructura de peaje en carretera (RSE), que comprende principalmente pórticos DSRC instalados a lo largo de la carretera de peaje (Sorensen y Taylor, 2005). Ha sido el enfoque más común en todo el mundo para la implantación del cobro electrónico de peajes 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 y col., 2011).

La tecnología DSRC permite la comunicación inalámbrica de microondas (DSRC 5.8 GHz) entre el OBU y RSE 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 el 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. El RSE requerido incluye pórticos 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 pórtico, 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. La RSE a menudo se complementa 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 y Blythe, 2006), el sistema tradicional, bien en los esquemas de varios carriles de flujo libre (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 son a menudo obligados a reducir su velocidad y, en consecuencia, el 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, en equipos de control, como la tecnología ANPR, se instalan para evitar la evasión de peaje.

En contraste con el DSRC en las playas de peaje, el DSRC de flujo libre en varios carriles (MLFF) 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 el cobro se produce. El sistema es capaz de identificar qué pórticos han sido cruzados 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 la ganancia, los impactos sobre la movilidad y la economía local, y las características de las rutas alternativas (Amorim et al., 2014).

El proceso de cobro del peaje mediante la tecnología DSRC puede estar 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 ETC propuestas por la Directiva 2004/52/CE para el EETS.

La rentabilidad del sistema de peaje DSRC puede variar sustancialmente, dependiendo de la longitud del 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, 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 pocos segmentos de carretera (Q-LIBRE, 2013). Por el contrario, es difícil de 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 clave. 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.

5.1.3. 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 pódico 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) y (Ren y Gao, 2009). Esta información se envía a la base de datos central, donde la información del usuario se comprueba y peaje se calcula y aplica.

Los transpondedores utilizados en los sistemas basados en RFID (viñetas) 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) que las viñetas pasivas (Kamarulazizi, 2010). Las viñetas pasivas o pegatinas se colocarán 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 metros (CETMO, 2012). Si el vehículo no está equipado con una etiqueta, el sistema de control basado en la tecnología ANPR identifica a los infractores.

La tecnología RFID puede ser menos precisa que la DSRC, a pesar de 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 de privacidad explica por qué esta tecnología no ha sido propuesta por la Directiva 2004/52/CE para el EETS.

5.1.4. Tecnología satelital - 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 con el fin de calcular el peaje. Actualmente se emplea en los sistemas nacionales de peaje de camiones en Alemania y Eslovaquia mediante el uso de GPS.

La tecnología satelital requiere el uso de 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 conectarse a una oficina central, donde se recibe y procesa la información del vehículo. Para limitar la evasión de peaje, el sistema se complementa con el equipo típico 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, el oficina central maneja los datos de los clientes, tales como información de pago, los 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 áreas de carretera con cargo, incluyendo los llamados "puntos de recarga virtuales". Este mapa permite al sistema determinar con precisión la posición de un vehículo con fines de carga sin la necesidad de pódicos de peaje, ni el establecimiento fijo de las secciones y las características de la red de peaje. Por esta razón, las ventajas más significativas de la tecnología GNSS son su necesidad limitada de equipo de borde de la carretera, y su flexibilidad para definir y modificar las características de la red 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. La red GSM transfiere los datos del peaje a la oficina central donde se genera la factura. El equipo de peaje electrónico y la infraestructura también pueden 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.

La vigilancia y control es similar al enfoque presentado en el 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 a 2%, de acuerdo con Fuente et al. (2011) en relación con el sistema de peaje de camiones alemán.

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 medio ambiente local. Por otra parte, las redes móviles no siempre tienen una cobertura del 100% o exactitud, lo que podría afectar de peaje cuando las carreteras cercanas se pueden alojar de forma diferente. A pesar de estas deficiencias, la tecnología es cada vez más fiable, puesto que la cobertura por satélite mejora y se instalan 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. Para mitigar las preocupaciones del público, sólo la información posicional esencial debe ser almacenada y procesada.

Estos sistemas satelitales combinan unos altos costes de 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. Sin embargo, 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. A pesar de que el GNSS es una de las tecnologías propuestas por la Directiva 2004/52/CE, las cuestiones de normalización deben ser abordadas antes de que pueda ser implementado por el EETS. Sin embargo, se han logrado importantes avances en este campo y se espera que la normalización del GNSS se resuelva en un futuro próximo.

5.1.5. 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 en todo el país, eligió esta tecnología para cobrar los peajes por el tráfico de mercancías a partir de 2001. Proyectos piloto para implementar un sistema similar se han desarrollado en regiones como Oregon (EE.UU.).

Dentro de esta tecnología ETC, los vehículos están equipados con un OBU que está acoplado al tacógrafo y que registra 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 el equipo de vía en los pasos fronterizo que activa y desactiva el OBU al cruzar la frontera de la zona de peaje, con el objetivo de cobrar sólo 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 las autoridades de peaje. Por ello, varias funciones de seguridad y control se han introducido para garantizar que las declaraciones de los usuarios sean exactas, mediante el uso de ANPR, DSRC y la tecnología GPS. Por lo tanto, el potencial para la evasión con esta tecnología es limitada (Felix y Neuenschwander, 2002), aunque son posibles declaraciones de vehículos erróneas o manipulaciones del tacógrafo. Sin embargo, las tasas de evasión están por debajo del 1% según Balmer (2006).

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 del equipo de vía instalados en el borde alrededor del área de peaje, dado que el precio del OBU es significativamente mayor que otros transpondedores utilizados por los sistemas DSRC y GNSS (Oehry, 2010; FCA, 2013).

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 parecen una opción adecuada para el EETS.

5.1.6. Comunicaciones móviles (GSM y Smartphone)

Se espera que en un futuro cercano los teléfonos móviles y los teléfonos inteligentes jueguen un papel importante en el sistema EETS, pero actualmente se encuentran en una etapa embrionaria. La combinación de los avances tecnológicos en el campo de la comunicación de campo cercano (NFC) 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 un 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 servicios de valor añadido y una interfaz de mejor calidad que ofrecen 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 de peaje, en particular, evitando la adquisición de equipos o de los gastos de distribución (Burden y Nijhuis, 2012). Además permite el contacto continuo con sus clientes.

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

Sin embargo, dada la limitada adopción de esta tecnología hasta la fecha, algunas cuestiones que 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 y 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 popular, la penetración completa no se ha alcanzado y, por tanto, de peaje teléfono móvil debe estar respaldada por un sistema alternativo de cobro de peaje.

La interoperabilidad es un punto a favor de esta tecnología, ya que la tecnología móvil ya es interoperable en toda Europa. Dada su gran potencial, esta tecnología ha sido incluido en la Directiva 2004/52/CE y por lo tanto es compatible con los requisitos del EETS.

5.2 El peaje del futuro: Hacia la integración de servicios

Con el fin de evaluar mejor las tecnologías que podrían desempeñar un papel en el desarrollo futuro del EETS, 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 Acceso a las Comunicaciones para las zonas móvil terrestre (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 la interactuar con la información de la carretera. Como en la transmisión de información, basado en la conexión a Internet del vehículo, se consigue una alta fiabilidad (Ding, 2014) puede ser utilizado para la 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 fijos de infraestructura. 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 otra parte, 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), en las 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 Near Field Communication (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 mantiene 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 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 para calcular la cantidad a ser pagada.

Entre las tecnologías mencionadas anteriormente, el sistema eCall será obligatorio en todos los vehículos nuevos a partir de 2017. 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 diferentes tecnologías juntas en un dispositivo tendría un impacto significativo en los costes para todos los sistemas. A este respecto, los informes recientes (Ingenico, 2013) sugieren que alrededor de 50 millones de vehículos en Europa habrán adoptado el sistema UBI a finales de 2018.

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 tema 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 Análisis comparativo

En esta sección se analiza comparativamente las diferentes tecnologías de telepeaje descritas anteriormente. Con el fin de desarrollar un examen amplio y generalizado de opciones de peaje, se evalúa el rendimiento de las tecnologías 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 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 tecnología aceptada por la Directiva 2004/52/CE (véase la Tabla 1). También ayuda a establecer un vínculo entre la consecuente revisión descriptiva de las tecnologías actuales en la Sección 3 y el análisis comparativo de las opciones de sistemas de telepeaje.

5.3.1. Estudio de 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 EETS. Este aspecto puede variar significativamente entre las opciones de telepeaje, debido principalmente al equipo de vía, los OBU y la gestión requerida por cada tecnología.

En cuanto a los equipos de carretera (RSE), 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 GNSS y GSM 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 costoso sistema central. En cuanto a otras tecnologías, la ANPR necesita equipo de vía menos costoso, 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.

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, especialmente en el sistema basado en el tacógrafo. Por otra parte, el coste de los propósitos de aplicación podría reducirse mediante la aplicación de un intercambio paneuropeo de los datos del vehículo y del conductor, así como 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 el equipo de carretera probablemente mantengan sus costes a un nivel bastante similar en el futuro próximo. Sin embargo, la migración a 3G y 4G ofrece menores costes por paquete de datos transmitido y una mayor calidad. Se espera que el principal avance en los métodos de pago con canales de pago digitales. De esta manera, los pagos sin contacto, como NFC permitirán la transacción sin problemas de privacidad.

5.3.2. Interoperabilidad y adaptación al eets

Uno de los problemas más importantes relacionados con el sistema 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 EETS. La interoperabilidad de doble dirección con otras tecnologías ETC 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 OBU 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 la tecnología no está muy extendida. Así, se necesita más trabajo para asegurar la interoperabilidad con los sistemas de DSRC existentes.

Los sistemas basados en el tacógrafo, tal como se aplica actualmente, tienen difícil adaptarse a una estrategia europea sobre ETC y no parecen una opción adecuada para el EETS. 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 la señal perdida, y la falta de normas técnicas para hacer que la interoperabilidad transnacional posible que 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.

5.3.3. 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 fracaso 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 mayores 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 próxima aplicación del sistema GLONASS y Galileo mejorará la precisión global.

Por otra parte, el ANPR es una tecnología madura y altamente automatizada, y no limita a operar 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 velocidades 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 GSM no es todavía una tecnología madura quedando por abordar aspectos como la duración de la batería, la proporción de la población con este tipo de teléfonos, la falta de normas y la incapacidad del sistema para identificar el tipo y la categoría de vehículos. Un obstáculo potencial para el desarrollo de los servicios de teléfono 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, personales y potencialmente reales de tiempo y de identificación. 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 otros méritos (Ogden, 2001; Iqbal y Lim, 2008). 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 GNSS 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 para afectar a la privacidad del usuario.

5.3.4. Vigilancia y control del fraude

La falta de pago de peajes por una proporción de conductores provoca una importante pérdida de ingresos de los operadores de autopistas de peaje. 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 aplicación fiables para identificar a los evasores de peaje y garantizar el pago de peajes. Una recomendación 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. Además, la revisión humana y seguirá siendo necesaria para mejorar el índice de precisión de esta tecnología, por lo tanto, 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 la implementación de controles de policía junto a las carreteras de peaje. Esto también se da por el hecho de que en algunos casos las transacciones DSRC no se aceptan como prueba. 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.

5.3.5. Obsolescencia

Para evaluar qué tecnologías de telepeaje podrían desempeñar un papel 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 signos mínimos de obsolescencia (Lu et al., 2010) (Barbaresso y Johnson, 2014). El GNSS aún se está desarrollando a través de un mejor procesamiento de la señal y la mejora de la cobertura del satélite, lo que permitirá a la reducción de costes para tarifificar 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 algún avance sustancial. 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 queden obsoletos.

En contraste con las tecnologías anteriores ETC, 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 establecer el ritmo al que la industria se mueve. 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, se debe considerar una revisión de la actual Directiva EETS, con el objetivo de examinar de nuevo la referencia a la tecnología GSM. 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.

5.3.6. Telepeaje: más que un sistema de pago

De una manera similar como 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 no se identifica la ubicación del vehículo.

Los recientes desarrollos tecnológicos, en especial la informática móvil, la comunicación inalámbrica están empujando los sistemas de transporte inteligente (ITS) hacia un gran paso adelante. 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 en tres direcciones principales: la seguridad del transporte, la eficiencia del transporte y los servicios de usuario integrados en el vehículo. Dado que los sistemas de telepeaje son parte de ITS, la calidad de estos servicios adicionales está mejorando constantemente.

Tabla 1. análisis d.a.f.o. de las tecnologías recogidas en la directiva 2004/52/ec

TECHNOLOGY	STRENGTHS	WEAKNESSES	OPPORTUNITIES	THREATS
DSRC	<p>Widely adopted, simple and tested technology.</p> <p>CEN standards available.</p> <p>High reliability & performance, low signal interference (available for subterranean facilities).</p> <p>Inexpensive OBUs and low operation costs (compared to GNSS).</p> <p>Large number of DSRC OBUs currently in operation.</p>	<p>Necessity to install road-side infrastructure (gantries) along the road.</p> <p>High capex and maintenance cost of tolling infrastructure.</p> <p>Difficult to modify the tolled network once implemented.</p> <p>Costly for roads with many intersections.</p> <p>Monitoring gantries take up land and it is difficult to find space in non-motorway environments.</p>	<p>Ability to provide/support other value-added services through the OBU.</p> <p>Easier interoperability with existing private concession toll roads.</p> <p>Closer control of the tolling system and revenues by Member States.</p>	<p>The creation of a centralized tolling system may be extremely difficult.</p> <p>Coordination in electronic transactions among countries.</p> <p>Less profitable in low traffic volume roads.</p>
Satellite-based (GNSS)	<p>Flexibility to define and modify what is to be charged and how is to be charged.</p> <p>Easily expandable to other roads and regions.</p> <p>Scarce necessity to invest in physical tolling roadside infrastructure.</p> <p>Once installed, less costly to maintain.</p>	<p>Higher start-up costs (OBUs, back-office, etc.) when compared to other technologies.</p> <p>Less used and mature technology than other options.</p> <p>Higher operation costs due to GSM communication.</p> <p>Detailed and careful planning is needed before starting running the system.</p> <p>Accuracy errors in certain sections of the tolled network. Satellite signal may be lost (additional roadside devices need to be installed).</p>	<p>Possibility to create a single centralized electronic toll collection system at the European level.</p> <p>Ability to provide/support other value-added services through the OBU: traffic information, speed control, etc.</p> <p>Better performance and accuracy are expected with the implementation of the GALILEO navigation system.</p> <p>Interoperability with other tolling technologies (DSRC) has already been achieved (TOLL2GO).</p> <p>Once implemented, tolling low traffic volume is less costly.</p>	<p>Interoperability with existing tolling schemes needs to be pursued.</p> <p>Potential reluctance of Member States in case a centralized tolling system is created.</p> <p>Data protection is strongly required due to the amount of information collected.</p>
Mobile communication (GSM and smartphones)	<p>Flexibility to define and modify what is to be charged and how is to be charged.</p> <p>Little physical tolling roadside infrastructure investment.</p> <p>No need for in-vehicle device or costly enforcement infrastructure. Low maintenance costs.</p> <p>Interoperability with other tolling technologies.</p>	<p>Device battery duration.</p> <p>No proven data about accuracy in certain sections of the tolled network.</p> <p>Detailed and careful planning is needed before starting the system.</p> <p>Variable proliferation of Mobile and smart phones in different areas.</p>	<p>Possibility to create a single centralized electronic toll collection system at EU level.</p> <p>Continuous technological improvements in the sector.</p> <p>Possibility to integrate Toll payment with other user services.</p> <p>User-friendly interface.</p>	<p>Data protection issue in relation to cellular network used to track user position.</p> <p>Potential reluctance of Member States in case a centralized tolling system is created.</p> <p>Less used & mature technology than others (No standards currently available).</p> <p>Can become obsolete very quickly given technological developments in the sector.</p>

6. Conclusiones

Los sistemas de cobro electrónico ofrecen la posibilidad de aplicar tarifas a los vehículos que circulan por carreteras sujetas a tarificación de una forma muy flexible. Sin embargo, esta flexibilidad no se da en las conexiones internacionales, dado que existe una disparidad de sistemas de telepeaje entre los diferentes países de la Unión Europea. Por tanto, es indispensable que estos sistemas sean interoperables más allá de las fronteras nacionales para evitar la creación de nuevos obstáculos a los flujos de tráfico en Europa.

Así, la interoperabilidad debe permitir a los usuarios viajar por la UE sin tener que someterse a procedimientos distintos de los de su propio país y sin tener que instalar ningún dispositivo adicional para cambiar 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 en la UE puedan hacerlos sin ningún tipo de interrupción.

El presente Trabajo Fin de Máster de investigación tiene por objetivo realizar una revisión bibliográfica de los diferentes sistemas de telepeaje que existen en la actualidad, así como los diferentes sistemas emergentes que estarán plenamente operativos en los próximos años. A partir de esta revisión bibliográfica es posible establecer un análisis D.A.F.O. y, a partir de éste, poder realizar, en próximas investigaciones, un procedimiento para determinar qué tecnología es la más apropiada para cada red, teniendo siempre en mente el objetivo de la interoperabilidad.

La metodología seguida comienza con la definición del problema, la falta de interoperabilidad entre los diferentes sistemas de telepeaje a escala europea. Tras la búsqueda de información, tanto de documentación técnica, legislativa como práctica, desde una perspectiva estructurada y profesional. A continuación, se organiza la información de manera sistemática para posteriormente realizar el análisis de dicha bibliografía que permite obtener una serie de conclusiones y recomendaciones para el futuro. Los exámenes de la bibliografía realizados, además del análisis D.A.F.O. señalado anteriormente, se han centrado en comparar las diferentes tecnologías a través de diferentes aspectos, como los costes, privacidad u obsolescencia, entre otros.

Una vez analizados los diferentes sistemas de cobro electrónico de peajes, pueden establecerse una serie de temas prioritarios, comunes a todos ellos. De esta forma, el primero de estos puntos es la interoperabilidad técnica. Los sistemas telepeaje existentes en las carreteras europeas utilizan las comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC), la localización por satélite (GNSS) y la telefonía móvil (GSM). 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 de concesionarios del sistema. 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 explotadoras de infraestructuras.

Además, existen otros temas de gran importancia como son los costes, tanto para los usuarios como para los operadores, de cada tecnología; la privacidad de los datos de los usuarios, aspecto éste que presenta, cada vez más, una importancia creciente; el modo de realizar las labores

de vigilancia; o el papel que pueden jugar dentro de unos años las tecnologías, a día de hoy, emergentes.

Este trabajo permite asimismo realizar una serie de recomendaciones, que pueden ser desarrolladas con mayor profundidad en futuras investigaciones. Estas recomendaciones 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 existen peajes tradicionales.
- Introducir en los sistemas de telepeaje recogidos en el EETS todos aquellos elementos que permitan aumentar la interoperabilidad entre los diferentes Estados miembro, siguiendo la iniciativa emprendida por España y Portugal en el ámbito del sistema VíaT que permite la interoperabilidad entre ambos países.
- Optar, en el caso de la construcción de nuevas carreteras de peaje, por la implantación de sistemas electrónicos de peaje que permitan la interoperabilidad con el mayor número de sistemas posible.
- Promover, por parte la Unión Europea, 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.
- Minimizar los costes, especialmente para los usuarios, de las diferentes tecnologías como paso previo a la interoperabilidad.



7. Bibliografía

- 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. doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.122
- Angelis, M. De, & Giorgi, P. (2013). The European Electronic Toll Service: a key strategy for easier mobility in Europe. In *Convegno Nazionale AEIT: Innovation and Scientific and Technical Culture for Development* (p. 6). Mondello, Italy.
- 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*. doi:10.1109/VTCFall.2013.6692454
- Asbl, A. (2012). AETIS ASBL - POSITION PAPER, 1–4.
- Balasz, J., Rial, A., Troncoso, C., Preneel, B., Verbauwhede, 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/Balasz.pdf
- Balmer, U. (2006). *Kilometer Fee for Heavy Goods Vehicles The Swiss Experience Driver for Introduction : Transit Traffic*. Budapest, Hungary.
- 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.
- 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*. Pisa, Italy.
- Carpintero, S. (2010). Toll Roads in Central and Eastern Europe: Promises and Performance. *Transport Reviews*, 30(3), 337–359. doi:10.1080/01441640903017380
- Catling, I. (2004). *The European Commission Directive on EFC* (pp. 99–103).
- Catling, I., & Hamet, P. (2006). *Report of Expert Group 9 Specification of the EFC application based on satellite technologies* (pp. 1–20).
- CETMO, F. (2012). *Tarifación vial: Aspectos clave y situación en diversos países*. Barcelona, Spain: Fundación CETMO.
- Chatterjee, K. (1999). Modelling the impacts of transport telematics: current limitations and future developments. *Transport Reviews*, 19(1), 57–80. doi:10.1080/014416499295673
- Chen, C.-D. C. C.-D., Fan, Y.-W., & Farn, C.-K. (2007). Investigating Factors Affecting the Adoption of

- Electronic Toll Collection: A Transaction Cost Economics Perspective. *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)*, 1–10. doi:10.1109/HICSS.2007.298
- Chen, C. Der, Fan, Y. W., & Farn, C. K. (2007). Predicting electronic toll collection service adoption: An integration of the technology acceptance model and the theory of planned behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15, 300–311. doi:10.1016/j.trc.2007.04.004
- Chen LI, Zhiyong ZHANG, Junbin XU, Kewen WANG, Y. L. (2012). The study of ETC lane Traffic capacity based on Passenger Car Equivalent. In *12th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2012)* (pp. 2433–2442). Beijing, China.
- Chiou, Y. C., Jou, R. C., Kao, C., & Fu, C. (2013). The adoption behaviours of freeway electronic toll collection: A latent class modelling approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 266–280. doi:10.1016/j.tre.2012.09.003
- Comisión Europea. LIBRO BLANCO: Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte. Por una política de transportes competitiva y sostenible (2012).
- European Commission (2009). Commission Decision on the definition of the European Electronic Toll Service and its technical elements.
- European Commission (2012). The European Electronic Toll Service (EETS) ensures interoperability of road toll systems — frequently asked questions. Brussels: European Commission.
- Consejo Europeo, & Parlamento Europeo. (2011). *Guide for the application of the Directive on the interoperability of Electronic Road Toll Systems* (pp. 4–54). doi:10.2833/6832
- Consultrans. (2011). *Estudio socioeconómico del transporte por carretera en España*. (p. 161).
- De Palma, A., & Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(June 2008), 1377–1399. doi:10.1016/j.trc.2011.02.010
- Ding, Z. M. (2014). A Design of Cooperative Vehicle Infrastructure System Based on Internet of Vehicle Technologies. *Applied Mechanics and Materials*, 552, 363–366. doi: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*.
- Electronic Toll-Collection System. (2011). In *Advanced Transportation Management Technologies* (pp. 1–19).

- Engdahl, J. (2013). *Implementation of the EETS in Switzerland*. Basel, Switzerland.
- 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_dsdc_technologies.pdf
- Engdahl, J., & Sieber, A. (2004). *The Austrian Heavy Vehicles Tolling System* (pp. 64–72). Stevenage, UK.
- Engdahl, J., Trans, R., & Hamet, P. (2005). *Final Review of draft UNI DSRC Specifications. Group* (pp. 1–41).
- Expert Group 4. (2005). *CCertification on the equipment related to the Directive 2004/52/CE* (pp. 1–29).
- FCA, & Switzerland. (2013). *Performance-Related Heavy Vehicle Fee* (pp. 1–8).
- Felix, A., & Neuenschwander, R. (2002). *WP 3: Case Studies Task 3.2: Case Study Switzerland*. Basel, Switzerland.
- 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. doi: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. doi:10.1016/j.enpol.2013.09.057
- 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).
- 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.
- Guangxian, X. (2008). The Research and Application of RFID Technologies in Highway 's Electronic Toll Collection System. *Image Processing, 31*, 1–4.
- H . M . Al-Deek, A . A . Mohamed, A . E . R. (1997). OPERATIONAL BENEFITS OF ELECTRONIC TOLL COLLECTION : CASE STUDY. *Urban Transportation Division, 3*(December), 467–477.
- Hamilton, C. J., & Eliasson, J. (2012). Costs and benefits of the European directive on road tolling interoperability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 30*, 221–238. doi:10.1016/j.trc.2011.09.009

- 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.
- Hensher, D. a. (1991). Electronic toll collection. *Transportation Research Part A: General*, *25*, 9–16. doi:10.1016/0191-2607(91)90151-F
- Holguín-Veras, J., & Wang, Q. (2011). Behavioral investigation on the factors that determine adoption of an electronic toll collection system: Freight carriers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *19*, 593–605. doi:10.1016/j.trc.2010.09.010
- 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.
- Ingenico. (2013). *Ingenico. Annual Report 2013*.
- Innovations, T. (2006). The Many Facets of ETC Interoperability. In *ITS World Congress* (pp. 1–32).
- Institute for Road Safety Research, S. (2014). *Fact sheet Police enforcement and driving speed* (pp. 1–6).
- Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. (2010). *ITS Deployment Tracking National Survey. Electronic Toll Collection* (p. 4).
- Iqbal, M. U., & Lim, S. (2008). Designing tolling technologies with privacy in mind : A user perspective. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *61*(2), 1–25.
- Jordán, J. G., Soriano, F. R., Catalá, P., & Montes, S. (2003). *A STUDY OF ROAD PRICING SYSTEMS BASED ON GNSS / CN* (pp. 1–8).
- Jou, R. C., Chiou, Y. C., Chen, K. H., & Tan, H. I. (2012). Freeway drivers' willingness-to-pay for a distance-based toll rate. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *46*(3), 549–559. doi:10.1016/j.tra.2011.11.012
- 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. doi: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. doi: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 booths. *Transport Policy*, 31, 10–18. doi: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* (pp. 1–14).
- Klodzinski, J., Gordin, E., & Al-Deek, H. M. (2008). Evaluation of Impacts of Open Road Tolling on Main-Line Toll Plaza. *Transportation Research Record*, 2012, 72–83. doi:10.3141/2012-09
- Lamy, B. (2012). 5. 9 GHZ , WHICH FUTURE IN EUROPE? (pp. 1–8).
- 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. doi:10.1016/j.comcom.2008.05.014
- 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. doi:10.1109/CESCE.2010.147
- Lussich, M. (2010). *Viabilidad de una tasa para el transporte de mercancías por carretera en España*.
- 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. doi:10.1080/13675560600859110
- Mcnew, J. (2010). *5.9 GHz Tolling Systems*.
- Mesqui, J., & Hamet, P. (2005). *Recommendations on enforcement (including cross - border enforcement) for the EETS*.
- Ministerio de Fomento. (n.d.). La política europea de transporte. *La Aportación Del Transporte Por Carretera a La Intermodalidad*, 1–25. Retrieved from http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2D060510-D2E8-43E5-9E1C-860DD149746E/1551/02_politica_europea_transportes.pdf
- 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.
- Nowacki, G., & Niedzicka, A. (2009). Some Problems of the European Electronic Toll Service Interoperability. In *Intelligent Transport Systems* (pp. 185–192). Varsovia, Polonia.
- 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. doi:10.1007/s11066-013-9073-9
- Oehry, B. (2007). *Is European interoperability finally becoming reality?* (pp. 67 – 77). Stevenage, UK. doi:10.1049/ic:20070805
- 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. doi: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. doi: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. doi:10.1109/MCOM.2009.5307471
- Parlament, E. Directive 2004/52/EC on the interoperability of electronic road toll systems in the Community (2004).
- Parlamento Europeo. (2008). *Pricing systems for road freight transport in EU Member States and Switzerland* (pp. 146–158). doi: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. doi: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). Toll Collection Technology and Best Practices Vehicle, 1–2.
- 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. Book* (Vol. 1).
- 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. doi: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* (pp. 1–8).
- 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. doi: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. doi:10.1016/j.clsr.2008.09.006
- Santa, J., Toledo-Moreo, R., Úbeda, B., Zamora-Izquierdo, M. a., & Gómez-Skarmeta, A. F. (2011). Technological Issues in the Design of Cost-Efficient Electronic Toll Collection Systems. *Vehicular Technologies*, (20), 359–374. doi:10.5772/2285
- Sheehan, R. (2008). Technologies That Complement Congestion Pricing.
- Sistema de Identificação Electrónica de Veículos. (2010). *OBU Technical Specification*.
- Sommerville, F., & Burden, M. (1997). European Electronic Tolling and Charging Research. *Transport Systems Division*, 3, 211–213.
- 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.
- Suriarachchi, M., Mehra, R., & Turland, R. (2010). *Toll interoperability - essential for the United Kingdom* (pp. 1–10). London, UK.
- Takahashi, H., Tada, H., & Xing, J. (2014). Evaluation of pre-registration and incentive scheme applied for mitigation of motorway traffic congestion. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(February 2012), 102–111. doi:10.1049/iet-its.2012.0115
- Tewolde, G. S. (2012). Sensor and network technology for intelligent transportation systems. In *ElectroInformation Technology EIT 2012 IEEE International Conference on* (pp. 1–7). Flint, MI, EEUU. doi:10.1109/EIT.2012.6220735
- Thibaut, F. (2008). Making the difference for the tollway users and the operation company. The case of Attica Tollway. In *Organization Management Workshop*.
- Toll Collection. (2012). Interoperability with Toll2Go in Austria.

- 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\nhttp://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0144:EN:NOT>
- W.A.A. (2014). Definición de peaje. Enciclopedia Jurídica. Consultado en <http://www.encyclopedia-juridica.biz14.com/d/peaje/peaje.htm>.
- Wu, B., Chen, Y., & Yeh, C. (2013). Driving behaviour-based event data recorder. *IET Intelligent Transport Systems*, (January 2013), 361–367. doi:10.1049/iet-its.2013.0009
- Xiao, Z. H., Guan, Z. Q., & Zheng, Z. H. (2008). The research and development of the highway's electronic toll collection system. *Proceedings - 1st International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, WKDD*, 359–362. doi:10.1109/WKDD.2008.100
- Xing, J., Takahashi, H., & Kameoka, H. (2010). Mitigation of expressway traffic congestion through transportation demand management with toll discount. *IET Intelligent Transport Systems*, 4(June 2009), 50. doi:10.1049/iet-its.2009.0032
- 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. doi:10.3141/2324-12
- Yelds, A., & Burris, M. (2000). Variable Toll Pricing Program, Lee County, Florida: Revealed Preference Telephone Survey Findings. *Transportation Research Record*, 1732(00), 42–49. doi:10.3141/1732-05
- Yilin, L. (2013). THE ANALYSIS OF HIGHWAY TOLL STATION ETC LANE CAPACITY. In *Fourth International Conference on Transportation Engineering* (Vol. 10, pp. 2848–2853). Chengdu, China.
- Yim, Y. (1991). *Electronic Toll Collection System (ETC) User Survey*. Berkeley, CA, EEUU.
- Zabic, M. (2011). *GNSS-based Road Charging Systems*.



PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DE LA CARRETERA (PTC)

Goya, 23 - 3º, 28001 Madrid (España)

Web: www.ptcarretera.es / email: info@ptcarretera.es

En colaboración con:



Con el apoyo de:

