

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Tesis Doctoral

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS TARIFARIAS PARA LA GESTIÓN DE LA MOVILIDAD EN CARRETERAS METROPOLITANAS

Autor:

Miller Humberto Salas Rondón
Ingeniero Civil

Director de la tesis:

Dr. Francesc Robusté Antón
Catedrático de Transporte de la UPC

Co-director de la tesis:

Dr. Sergi Saurí Marchán
Profesor de Transporte de la UPC

Programa de Doctorado: Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña - UPC

Barcelona, Septiembre de 2008

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Con base en las actuales dinámicas de crecimiento urbano y metropolitano, donde se requieren recorrer grandes trayectos y donde la estructura urbana y densidad poblacional limita la eficacia del transporte público en cuanto a servicio y frecuencia, el uso del coche se ha masificado y sus ventajas (mayor movilidad, comodidad, libertad, status, disponibilidad, servicio puerta a puerta, etc.) y costes sociales no percibidos han hecho que su crecimiento sea notable y por ende el de la movilidad. La carretera ha estructurado los corredores y áreas metropolitanas en la segunda mitad del siglo XX y, paradójicamente, ha sido el coche quién ha permitido redescubrir e incluso reinventar el transporte colectivo, en particular el ferrocarril metropolitano. Ante este aumento de demanda que exige mayor accesibilidad (en cantidad y calidad), los gobiernos han respondido incrementando la oferta de un mayor número de infraestructuras y servicios de transporte para permitir la cohesión y capilaridad del territorio haciéndolo asequible tanto a las relaciones sociales como a la producción de bienes y servicios.

Sin embargo, la construcción de un mayor número de kilómetros de carreteras y accesos ha tensionado un territorio escaso y ambientalmente sensible, requiere de más recursos para su mantenimiento, y generalmente que se produzca y atraiga una mayor cantidad de demanda (viajes o veh-km). Se ha demostrado que un incremento en la oferta de infraestructuras (las cuales actúan como medio canalizador de la demanda y como condición necesaria de su desarrollo) no ha sido una solución eficaz para detener las crecientes expectativas de una mayor y mejor movilidad que exige un servicio eficiente y de calidad, especialmente en las carreteras metropolitanas donde el fenómeno del *commuting* conlleva a operar a capacidad durante las horas punta.

Cuando un camión se incorpora al flujo normal de tráfico, éste ocasiona de forma directa un daño sobre el pavimento, y si se suman todos los tipos de vehículos que circulan por la carretera para ver la relación flujo-velocidad, se aprecia el impacto sobre el incremento de los tiempos de viaje y su fiabilidad. Además de la congestión, otros efectos también están directamente relacionados con el flujo del tráfico, como las emisiones de gases de cada uno de los vehículos que contaminan el aire y contribuyen al calentamiento global (CO, CO₂, NO_x, SO_x, etc.), la producción de ruido, estrés y su contribución relacionada con el riesgo de la ocurrencia de un accidente (entre otras externalidades).

Estos efectos negativos causados principalmente por el transporte por carretera se traducen en costes suplementarios, los cuales se terminan imponiendo sobre los mismos usuarios, sobre el proveedor de la infraestructura, sobre otros usuarios y sobre el resto de la sociedad. La imposición de estos costes externos por el uso del transporte y en particular, la dificultad de reflejarlos dentro de las decisiones de viajar o no, cuándo, cómo y dónde, aumenta el rango de problemas y las repercusiones asociadas al medioambiente, la economía y la sociedad en general.

Para paliar estos costes externos producidos por un exceso de flujo de vehículos, se han propuesto soluciones como: (i) dejar de hacer viajes, lo cual es impracticable a largo plazo, (ii) incrementar el índice de ocupación vehicular, (iii) realizar un trasvase hacia otros modos, (iv) aplicar medidas restrictivas por el uso de la infraestructura (en tiempo o por número de matrícula), (v) implantar restricciones de tipo económico (cobro de una tarifa) con lo cual se producen efectos sobre el excedente de los usuarios con menor nivel de renta pero a cambio se obtienen ingresos para realizar compensaciones bien sea mejorando el servicio de transporte público o la infraestructura existente y (vi) aplicar una combinación entre restricción y tarifación, en este caso las restricciones se pueden obviar a cambio de una tarifa.

La cuantificación de los costes externos señala claramente que exceden los costes relacionados con el mantenimiento y disponibilidad de infraestructuras, de ahí que sea la definición de una estrategia amplia que involucre instrumentos de tipo económico y medidas complementarias la llamada a solucionar este tipo de impactos. Usualmente en países desarrollados, esta clase de soluciones se aceptan mejor que otro tipo de restricciones para disminuir el flujo. Unas tarifas que reflejen la infraestructura adicional y los costes externos que se producen, actuarían como alarmas a viajeros acerca del coste social asociado con su viaje adicional. Basados en dicha tarifa, los viajeros tomarán la decisión de viajar o no y si deciden hacerlo entonces a dónde, cuándo, cómo y qué tan lejos viajarán, en otras palabras, auto regularían su demanda.

Además de permitir gestionar la movilidad de una red, la aplicación de una determinada estructura tarifaria simple o compuesta, genera una serie de impactos sobre el bienestar social. La magnitud de estos efectos depende del tipo de esquema a implantar. Evaluar, contrastar y decidir qué estructura permite maximizar la variación de bienestar social total, generar ingresos y disuadir la demanda total de una red hasta un nivel deseado, son las múltiples motivaciones que han llevado a desarrollar este trabajo de investigación.

1.2 Objetivos

La presencia de congestión en las diversas actividades humanas es un resultado natural de patrones de movilidad no uniforme interaccionando con una oferta de servicios rígida e indivisible (supermercados, bancos, restaurantes, vías, aeropuertos, espectáculos, etc). En el caso de las autopistas, es difícil satisfacer la demanda de bienes y servicios durante las horas punta debido a las limitaciones de la capacidad viaria. Por consiguiente, se generan demoras en los movimientos de pasajeros y mercancías que conllevan a que la sociedad tenga que afrontar grandes pérdidas económicas. Por

ejemplo, en Europa los costes asociados con este fenómeno corresponden a 70 billones (1.000 M) de euros aproximadamente el 1% de todo su PIB, Nash y Matthews (2005). Mientras que en las 85 zonas urbanas más grandes Estados Unidos, la congestión causó 3,7 billones de horas de retraso en los viajes y 2,3 billones de combustible desperdiciado, generando un coste total de \$63 billones, DeCourla-Souza (2006).

Para mitigar estos costes de congestión, muchos países están aplicando el cobro de una tarifa para regular la movilidad. Con esta medida económica se corrige el comportamiento indeseable de los conductores que así lo ameriten y se compensa a los potenciales perdedores al poder reinvertir los ingresos que se perciben bien sea en disminución de impuestos, inversión en carreteras o en transporte público.

Teniendo en cuenta que el diseño de un esquema de tarifación para maximizar ingresos es muy diferente del concebido para maximizar eficiencia económica, se instaure este último como estrategia para reducir la congestión y otras externalidades negativas relacionadas directamente con el flujo de tráfico. Para ello se concretaron los siguientes objetivos para esta investigación:

- Aplicar la teoría económica basada en el *coste marginal social* bajo el enfoque *second-best* (sub-óptimo condicionado por restricciones de implementabilidad) para lograr la eficiencia económica y social de una red de carreteras metropolitanas de gran capacidad.
 - Analizar y determinar para *diversas estructuras tarifarias* la magnitud de la tarifa óptima que permita disuadir la demanda hasta ciertos niveles de aceptabilidad.
 - Establecer una *metodología* que evalúe los efectos producidos al implantarse un determinado esquema tarifario sobre varios indicadores: operacionales (número de viajes o kilómetros recorridos), económicos y financieros (ingresos, coste generalizado, tarifa promedio y unitaria por kilómetro, porcentaje de variación) y sociales como la variación de bienestar social que incluye los cambios tanto del excedente de usuario como del productor.
 - Evaluar la *sensibilidad* en la cuantificación de estos indicadores al variar la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado y la valoración del tiempo de viaje.
 - Emplear un *análisis multicriterio* fundado en un proceso analítico de jerarquización, para seleccionar la estructura tarifaria (entre varias alternativas posibles) que permita alcanzar la máxima variación del bienestar social en una red de carreteras.
 - Usar la metodología desarrollada sobre la red de vías de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona.
-

1.3 Estructura de la tesis

El documento de la tesis se ha estructurado en tres partes sin contar con la actual introducción y el capítulo final de conclusiones e investigaciones futuras.

En la primera parte, compuesta por los capítulos 2 y 3 se reconoce el problema y las diversas formas de solucionarlo, haciendo énfasis en la tarificación como el instrumento eficaz y eficiente. En el capítulo 2 se identifican los problemas generados por el incremento permanente del flujo vehicular en áreas urbanas y metropolitanas. Estos problemas se traducen en costes externos, los cuales hacen parte de los costes sociales del transporte por carretera. Para la cuantificación de algunas de estas externalidades negativas (daños a la infraestructura, polución, ruido, accidentes, congestión) se presentan metodologías variadas.

Centrándonos en el problema de la congestión en carreteras, se identifican las diferentes formas de tarifar cada uno de los elementos que conforman este medio, agrupadas en el concepto de *value pricing*. También se muestra cada una de las tipologías de *value pricing*, la tecnología actualmente disponible para su aplicación, las experiencias en Europa y Estados Unidos, así como sus efectos. En un futuro cercano, este concepto tarifario evolucionará hacia el pago por un servicio "*service pricing*" en donde los usuarios aceptarán el pago de una tarifa con base en el servicio que reciben realmente y en el valor social que se genera para la sociedad. Este valor social sería cuantificado a través de indicadores de calidad.

Dado que nuestro principal objetivo es gestionar la demanda en una red de carreteras se estudian y analizan estructuras de tarificación en un punto, continua y de tipo complejo, estas últimas buscan favorecer a los *commuters* y ajustarse a la topología de la red en estudio. Además, se establecen algunos criterios de diseño de los esquemas tarifarios los cuales deben ir acompañados de una serie de medidas complementarias básicamente para reducir las barreras de aceptabilidad pública que genera esta clase de soluciones.

El capítulo 3 ilustra los principios generales para la tarificación de carreteras. Desde el punto de vista del gobierno, el objetivo fundamental al implantar una política tarifaria que regule la movilidad es lograr la *maximización del bienestar social* disuadiendo el exceso de viajes o veh-km que son los generadores del coste externo. En este sentido, el principio tarifario escogido es el basado en el *coste marginal social* el cual se puede fijar a corto o a largo plazo. La teoría económica del coste marginal social puede darse desde las nociones de *first-best* y *second-best*, que constituyen los conceptos centrales en una política de eficiencia y análisis de bienestar.

La segunda parte del documento consta de los capítulos 4 y 5, los cuales se destinan a presentar analíticamente el desarrollo de la tesis. El capítulo 4 muestra la metodología que permite analizar y seleccionar un único esquema tarifario. En ella se define el escenario base tanto a nivel de la oferta de la red de carreteras como la modelación de la demanda expresada en la matriz de viajes totales entre los diversos pares origen-destino que conforman la red. Las magnitudes de los elementos que forman el coste generalizado inicial del viaje son cuantificados.

La configuración del modelo tarifario se origina de la definición de la variación del bienestar social y la introducción de un modelo de demanda. A partir de esta fusión, se estructura el modelo para varios esquemas tarifarios valorando diversos indicadores operacionales, económicos y sociales. La contrastación de estos indicadores a través de un análisis multicriterio dará paso a la selección de la alternativa tarifaria a implantar.

A partir de la metodología anterior, en el capítulo 5 se estudian diferentes estructuras tarifarias simples y complejas. Para cada esquema tarifario se modelan cada uno de los indicadores que permitirán comparar y seleccionar el esquema definitivo.

La situación práctica y de aplicación de la tesis se representa en la tercera parte del documento. En el capítulo 6 se detalla el empleo de la metodología sobre la red de autopistas del Área Metropolitana de Barcelona. Inicialmente, se define la situación problemática de la congestión durante las horas punta de mañana y tarde sobre las rondas y accesos. Caracterizado el escenario base, se modeliza el escenario futuro (empleando TransCAD) y estableciendo como parámetro de comparación entre los distintos esquemas tarifarios, la reducción en la matriz total del número de veh-km. Se contemplan tres niveles de disuasión de la demanda: bajo (5%), medio (10%) y alto (15%). La cuantificación de la(s) tarifa(s) que logra(n) la disminución de demanda en cada porcentaje se realiza para cada estructura tarifaria. El cambio que se produce en la magnitud de los indicadores establecidos en la metodología se comprueba con base en estas tarifas. El análisis de estos efectos para cada porcentaje de reducción de tráfico, permite establecer correlaciones que originan la tarifa óptima que maximiza la variación del bienestar social.

Cuantificados los indicadores establecidos para cada esquema, se procede a analizar dichos resultados y su respectiva sensibilidad ante los cambios en los valores de la elasticidad y del valor del tiempo. A partir de esta valoración y empleando una técnica de evaluación de alternativas (proceso de jerarquización analítica), se selecciona el esquema tarifario a implantar en el Área Metropolitana de Barcelona.

El resumen de las conclusiones obtenidas se presenta en el capítulo 7 junto con las futuras líneas de investigación que quedan abiertas. La bibliografía y páginas web consultadas junto con los anexos cierran el documento.

1.4 Contribuciones de la tesis

Estudiadas las tipologías tarifarias que se emplean para gestionar la movilidad y generar ingresos, a continuación se resumen las principales aportaciones de la tesis:

- Se han identificado los diferentes enfoques utilizados para la cuantificación del coste marginal producido por algunas externalidades negativas del flujo vehicular.
 - Se han detallado los múltiples instrumentos desarrollados para reducir la congestión en las carreteras, agrupados en la definición de *value pricing*. Además, se describe la tendencia hacia el pago por un servicio representado a través de indicadores de calidad.
-

- Además de estudiar y analizar los esquemas tarifarios convencionales que se emplean para gestionar la movilidad en una red de carreteras, se han propuesto estructuras tarifarias complejas que compensan las debilidades y fortalezas de los esquemas simples, favorecen a los viajeros frecuentes que recorren grandes distancias y se ajustan a la topología viaria existente.
 - Se propone a nivel cualitativo algunos criterios de diseño de esquemas tarifarios que administren la congestión que unidos a medidas complementarias, permitirían aminorar la aversión pública que ocasiona este tipo de soluciones.
 - Se han recopilado y analizado los principios económicos para la tarificación de infraestructuras. Se hace énfasis en la teoría económica del coste marginal social bajo los puntos de vista del *firs-best* y *second-best* que emplea el gobierno o la entidad reguladora como política de eficiencia y bienestar.
 - Se ha desarrollado una metodología que posibilita el análisis de los efectos sobre indicadores operacionales, económicos y sociales que produce la implantación de un determinado esquema tarifario al querer reducir a un nivel deseado la demanda inicial.
 - Se han modelado los impactos sobre estos indicadores empleando cinco estructuras de tarificación (dos simples y tres compuestas). Dichas formulaciones facilitan la contrastación de estas alternativas tarifarias de forma sencilla;
 - Se ha propuesto para la selección de una entre múltiples alternativas tarifarias, la aplicación de un análisis multicriterio basado en un proceso analítico de jerarquización.
 - Se ha aplicado esta metodología sobre la red de vías de gran capacidad del Área Metropolitana de Barcelona. Esta experimentación muestra los beneficios (medidos en ganancia de bienestar social) que se producen al instaurarse una estrategia de tarificación combinada que se ajuste a la topología viaria existente.
-

CAPÍTULO 2

NECESIDAD DE UNA ESTRATEGIA ÓPTIMA DE TARIFACIÓN PARA EL TRANSPORTE POR CARRETERA

2.1 Introducción

Las infraestructuras de transporte actúan como medio a una clara exigencia de mayor y mejor movilidad. Desde hace años el fenómeno de la movilidad por carreteras viene incrementando su cantidad de forma permanente, con lo cual se tiende a alcanzar la capacidad limitada de las vías existentes, en particular durante las horas punta. Ante este reto, un aumento en la oferta de infraestructura tensiona el territorio y conlleva a que se realicen mayor cantidad de viajes y se recorran kilómetros adicionales. Esta demanda adicional que ejecutan los usuarios de las carreteras terminan imponiendo costes suplementarios sobre ellos mismos, sobre el proveedor de la infraestructura, sobre otros usuarios y sobre el resto de la sociedad. Dichos costes son conocidos como costes externos (resultado de los efectos externos negativos tales como: congestión, contaminación ambiental, ruido, accidentes, estrés, efectos barrera, etc.) y ocasionan grandes pérdidas económicas a la sociedad en general.

En este capítulo se estudia la implantación de una política tarifaria como respuesta de los gobiernos para reducir los efectos externos negativos que produce una mayor movilidad por carretera. Se muestra cómo el avance tecnológico para el cobro del peaje ha permitido generar diversas tipologías tarifarias y se resumen algunas experiencias internacionales de sus aplicaciones. Estas experiencias indican que para disminuir las barreras de aceptabilidad pública y política, el sistema tarifario implantado debe ir acompañado de medidas complementarias que proporcionen a los usuarios de las carreteras incentivos apropiados para modificar su conducta de viaje.

El concepto tarifario conocido como *road pricing* (que establece que los conductores deberían pagar directamente una tarifa que corresponda al coste marginal social del viaje, incluyendo los costes de congestión) permite optimizar el uso de las carreteras, captar recursos para la financiación de infraestructuras y su mejoramiento e innovar en el servicio de transporte público. *Road pricing* constituye parte de una estrategia integral para gestionar la congestión conocida como *value pricing*, donde además de disuadir el uso de la carretera, se busca disminuir el uso del vehículo y optimizar el uso de los estacionamientos.

Las medidas de *value pricing* están evolucionando hacia el concepto de *service pricing* donde los usuarios de la vía reconocen el pago de la tarifa a cambio de un “valor social” que reciben. Este valor social se cuantifica a través de un servicio de calidad que sería ofrecido por el operador de la infraestructura y se mide a través de diversos indicadores, entre ellos el mantenimiento y la conservación de las carreteras, la seguridad vial, la duración del tiempo de viaje y su fiabilidad, etc.

2.2 Deseo permanente de una mayor y mejor movilidad

Después de la segunda guerra mundial se le da mayor importancia al comercio mundial y a una orientación creciente de la producción hacia nuevos mercados, los cuales constituyen la base de la globalización de la economía. Como consecuencia de la globalización se incrementa el flujo poblacional tanto en las principales ciudades como sus entornos metropolitanos, dando como resultado un crecimiento notable de los viajes de personas y de carga en todos los modos de transporte, siendo el transporte por carretera el que predomina respecto a los demás tanto en movilidad de pasajeros como de mercancías.

De acuerdo con el Libro Blanco (2001), la movilidad de las personas ha pasado de 17 kilómetros diarios en 1970 a 35 kilómetros en 1998. En Cataluña por ejemplo, la distancia media recorrida de los desplazamientos se ha incrementado en un 35% en los últimos 20 años, afianzándose el efecto de los *commuters*. La accesibilidad se contempla como un derecho en igualdad de condiciones que otras políticas sociales de bienestar con el agravante de “bien de demanda infinita”.

Sumado a lo anterior, las grandes distancias por recorrer tanto a nivel interurbano como metropolitano y las ventajas que produce el coche particular (mayor movilidad, comodidad, libertad, status, disponibilidad, servicio puerta a puerta, etc.) han hecho que el crecimiento de este modo sea considerable y por ende el de la movilidad, tal como se ilustra en la figura 2.1.

La respuesta dada para satisfacer las expectativas crecientes de una movilidad que exige un servicio eficiente y de calidad, ha sido la de ofrecer un mayor número de infraestructuras que permitan la cohesión y capilaridad del territorio para hacerlo accesible tanto a las relaciones sociales como a la producción de bienes y servicios, además de una red de transporte integrado con conexiones cómodas entre los diferentes modos de transporte. Las zonas y regiones que han apostado por esta solución han aumentado su productividad pero a cambio están conviviendo con los problemas sociales que origina el incremento permanente del tráfico automotor.

Un aumento en la oferta de infraestructura no siempre es una buena solución. Por un lado, existe gran escasez de territorio en las grandes urbes del mundo y por otro, se ha demostrado que el aumento de más carreteras atrae más tráfico o permite que sus usuarios realicen viajes o recorran kilómetros adicionales. Este uso añadido de infraestructura origina un coste adicional sobre los mismos conductores, sobre el proveedor de la infraestructura, sobre otros usuarios y sobre el resto de la sociedad. Dichos costes son conocidos como costes externos (resultado de los efectos externos

negativos tales como: congestión, contaminación ambiental, ruido, accidentes, estrés, efectos barrera, etc.), y producen grandes pérdidas económicas a la sociedad.

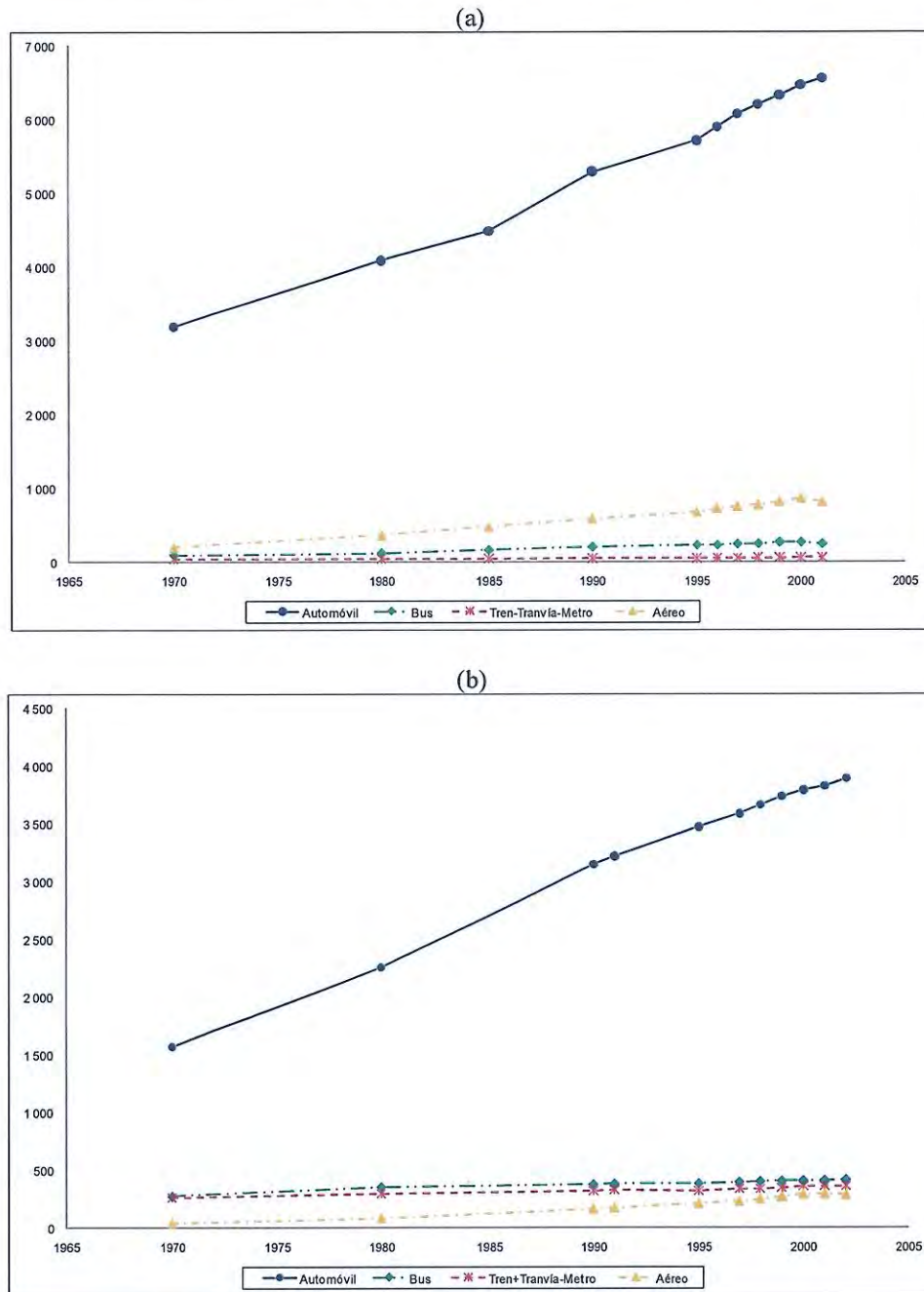


Fig. 2.1. Transporte de pasajeros por modo en 1000 millones de pasajeros-kilómetro, (a) en EE.UU y (b) en la UE. (Fuente: Datos de EUROSTAT. 2004).

Para reducir los costes externos, la respuesta es la gestión de la movilidad en las infraestructuras y para ello los gobiernos están empleando una estrategia amplia que involucra instrumentos de tipo económico (cobro de una tarifa) y otras medidas complementarias que se proporcionen a los usuarios del transporte incentivos

apropiados para modificar su conducta de viaje y de esta forma optimizar el uso de las carreteras, captar recursos para el mantenimiento de infraestructuras y mejoramiento e innovación en el servicio de transporte público.

2.3 Costes sociales del transporte por carretera

El transporte como actividad económica tiene un coste para la sociedad que está definido por el valor monetario de todos los *inputs* consumidos para trasladar viajeros o mercancías entre orígenes y destinos. Para lograr esta movilidad de viajeros o mercancías, no solamente se consumen ciertas cantidades de factores productivos tradicionales (vehículos o energía), sino que también figura el tiempo que invierten los usuarios en sus viajes y el impacto que dicho traslado ocasiona a otros, en forma de congestión, contaminación, ruido, accidentes, etc.

La preocupación a nivel mundial por encontrar una tarificación que sea justa y eficaz y que brinde eficiencia al transporte representada en la *movilidad sostenible*¹ viene desde hace muchos años, pero a finales del anterior milenio y a comienzos de este, esta necesidad se ha incrementado dando paso a la imaginación, investigación e integración de diferentes disciplinas para lograr una equidad y bienestar a la sociedad.

El Libro Verde (1995) de la CE sobre tarificación, indicó que cada modo de transporte introduce unos efectos secundarios indeseables en la sociedad que se traducen en unos costes que no se tienen en cuenta por el sistema de imputación, sino que se repercuten a terceros. Por lo tanto, surge la necesidad de internalizar dichos costes, es decir, que cada usuario debe soportar la totalidad de los costes sociales de su desplazamiento, permitiendo así reducir los problemas de transporte. Esta propuesta fue hecha desde hace varias décadas (Dupuit, 1844; Pigou, 1920; Knight 1924; Vickrey, 1963). Luego, el Libro Blanco (1998) de la CE, plantea la tarificación de los diferentes modos de transporte basada en los *costes sociales marginales*, que son una media de costes variables que reflejan el coste producido por un vehículo, o de una unidad de transporte adicional que utiliza la infraestructura. Posteriormente, el Libro Blanco (2001) de la CE, ratifica la tarificación por el uso de las infraestructuras con base en estos costes marginales, los cuales deben incluir los costes de infraestructura pero también los costes externos, incluidos los costes relacionados con los accidentes, la contaminación atmosférica, el ruido y la congestión. Este principio se aplica a todos los modos de transporte y a todas las categorías de usuarios, tanto para los vehículos privados como para los vehículos comerciales.

Para lograr que la oferta de infraestructuras sea eficiente se requiere hacer un análisis completo de los costes y beneficios sociales, tomando en consideración todos los beneficios, costes públicos y privados en sentido amplio, en otras palabras, se requiere cuantificar los *costes sociales del transporte*. Para ello es necesario razonar sobre la

¹ *Movilidad sostenible*: concepto que sirve para denominar al transporte organizado que optimiza el consumo de energía, los plazos, los trayectos y las condiciones de transporte de manera que el disfrute de un servicio hoy no hipoteque las posibilidades de disfrute de las futuras generaciones. Dentro de las consecuencias de la movilidad sostenible están: la internalización de los costes del transporte, la intermodalidad y la interoperabilidad.

estructura de los costes que soportan la oferta y el uso de las infraestructuras que según el Libro Blanco (1998), se resumen en la Tabla 2.1.

De acuerdo con de Rus et al. (2003), el coste social total C_{st} al que una sociedad debe hacer frente para disfrutar de cierto nivel de prestación de servicios e infraestructuras de transporte está dado por:

$$C_{st} = C_o + C_u + C_e \quad (2.1)$$

Donde: C_o son los costes del operador, C_u son los costes de los usuarios y C_e son los costes externos.

Tabla 2.1. Componentes del coste en relación con la oferta y el uso de la infraestructura.
(Fuente: Libro Blanco. CE. 1998).

COSTES FIJOS		COSTES VARIABLES	
Costes internos	Costes / beneficios externos	Costes internos	Otros costes externos
Costes del capital: •Reembolso de capital •Pago de intereses •Rendimiento de activos Costes fijos de funcionamiento: •Costes de mantenimiento (función de la duración y de la climatología) •Costes de explotación (iluminación, gestión del tráfico, información) •Administración	Costes: Efectos de barrera Deterioro del paisaje Intrusión visual Beneficios: Mejora de la accesibilidad Beneficios de red Aumento de la productividad	Costes de funcionamiento Variables: •Costes de explotación (gestión del tráfico, policía, servicios de apoyo) •Costes de mantenimiento relacionados con el uso (daño del firme, sustitución de vías férreas, reparaciones)	Contaminación del agua y del aire: •Agentes contaminantes locales (por ejemplo partículas) •Agentes contaminantes regionales (por ejemplo NOx) •Agentes contaminantes globales (por ejemplo CO ₂) Accidentes (en parte) Ruido y vibración Congestión (en parte)

2.3.1 Costes del operador (C_o)

Aquí se incluyen todos los gastos necesarios para construir, operar y mantener una carretera, y pueden estar representados por la siguiente igualdad:

$$C_o = C_{operacionales} + C_{capital} \quad (2.2)$$

Según el Libro Blanco (1998), en los *costes de operación o de funcionamiento*, contienen los costes de mantenimiento y explotación, es decir, son los costes necesarios para mantener un activo particular en funcionamiento, pero que no aumentan el valor del activo. En el caso de las infraestructuras viarias, los costes de funcionamiento serán los gastos anuales necesarios para garantizar que la infraestructura preste un servicio de calidad aceptable, pero sin mantener tal calidad más de un plazo de tiempo definido.

Los *costes de mantenimiento* reflejan los costes obligatorios para mantener la infraestructura existente. Se puede distinguir entre el mantenimiento corriente, por ejemplo, la limpieza y la vialidad invernal, que son independientes del uso, y el mantenimiento en función del volumen y composición del tráfico (por ejemplo, tratamiento superficial del firme).

Los *costes de explotación* son los gastos ineludibles para explotar la infraestructura existente (administración, vigilancia, señalización, limpieza).

Costes de capital, es el rendimiento que los inversores esperan obtener de su inversión dado un determinado nivel de riesgo. Comprende el consumo de capital fijo y el pago de intereses y representan a menudo una cuota elevada de los costes totales de infraestructura. El coste de capital es un valor que viene impuesto por los inversores y se considera un parámetro de entrada en la modelización, resultando como variable de ajuste en la oferta para la licitación. La estimación del coste de capital depende, además de las condiciones impuestas por los mercados de capitales, de aspectos de tipo estratégico asociados al crecimiento de las empresas.

2.3.2 Costes de los usuarios (C_u)

El movimiento de personas o mercancías dentro del esquema espacio-tiempo se logra a través del uso de infraestructuras. Este desplazamiento ocasiona unos costes a los usuarios que pueden distribuirse de forma simplificada mediante la expresión:

$$C_u = (f + v_t t) q \quad (2.3)$$

Donde: f son los costes unitarios de operación por vehículo, v_t es el valor del tiempo el cual debe diferenciarse entre usuarios homogéneos y heterogéneos, t es el tiempo de viaje, y q el número de usuarios.

Costes de operación

Son aquellos gastos que incurre el propietario de un vehículo privado por viajar en él. Estos costes aquí incluyen la depreciación anual del vehículo, financiación, interés y tarifas de *leasing*, propiedad, impuestos (adquisición, posesión, circulación), seguros, mantenimiento y reparaciones, combustible, lubricantes, neumáticos, etc., y todos los costes relacionados con el personal cualificado y los suministros requeridos para esas actividades. Dentro de estos gastos se encuentra el peaje, que consiste en el pago de una tarifa por el uso de una infraestructura en este caso una autopista, la cual tiene ofertado un nivel de calidad mínimo (estado del firme, atención a emergencias, seguridad, cuidado del paisaje, etc.) es decir, el usuario paga por el servicio (ahorro en el tiempo de viaje, incremento de la seguridad, etc.) que recibe durante su viaje. Estos costes pueden dividirse entre costos estáticos por tenencia del vehículo y los costes que implica ponerlo en movimiento, de acuerdo con las indicaciones mostradas en Robusté et al. (2000).

Tiempo y valor del tiempo

Es necesario que además del tiempo de viaje, se contabilicen los periodos correspondientes a los tiempos de acceso, espera, transbordos y desplazamientos intermedios. La inclusión del coste del tiempo permite analizar problemas como la congestión del tráfico. La valorización monetaria del tiempo invertido por el usuario en el ámbito del transporte ha sido estudiada dentro de la teoría microeconómica a través de modelos de elección discreta (elección modal) y por tanto consideran la posibilidad de consumir bienes de tipo discreto (Train y McFadden (1978); Bates y Roberts (1986); Jara-Díaz y Farah (1987); Jara-Díaz (1998)). El tiempo es un recurso económico que no se puede acumular y donde todas las personas disponen de la misma cantidad por período (24 horas al día, 168 horas a la semana, etc.). Los consumidores distribuyen su tiempo en trabajar y ejecutar otras actividades, entendiendo que la realización de una actividad determinada lleva implícito el consumo de varios bienes de mercado y de tiempo, Espino (2003).

Train y McFadden (1978), plantearon un modelo de intercambio entre bienes y ocio donde tratan de analizar cuál es el papel del salario en las decisiones de los consumidores cuando se enfrentan a un problema de elección de modo de transporte y cómo éste varía al considerar distintas formas prácticas en la función de utilidad que representa las preferencias individuales.

La función objetivo a la que se enfrenta el consumidor depende del consumo de bienes B y del tiempo de ocio disponible O sujeto a dos restricciones: la primera establece que el gasto total en bienes consumidos (incluido el gasto en transporte) debe ser igual al total de renta disponible y la segunda, que el tiempo de ocio debe ser igual al total de tiempo disponible una vez descontado el tiempo dedicado al viaje y al trabajo. El problema de optimización del tiempo del consumidor es el expresado en la ecuación 2.4, donde, R es la renta no salarial, s_h es el salario por hora de trabajo, H las horas de trabajo, T tiempo total disponible, t_j y c_j representan el tiempo y coste de viaje, respectivamente, del modo de transporte j .

$$\max U(B, O) \quad (2.4)$$

Sujeto a:

$$B = R + s_h H - c_j \quad (2.4a)$$

$$O = T - H - t_j \quad (2.4b)$$

Al sustituir B y O se obtiene que la función de utilidad depende de las horas de trabajo H y el problema se transforma en:

$$\text{Max}_j \left\{ \text{Max}_H U \left[(R + s_h H - c_j), (T - H - t_j) \right] \right\} \quad (2.5)$$

Al maximizar en H y sustituir en la función objetivo se tiene que la función de utilidad indirecta condicional sea:

$$U_j = U[B(H^*(c_j, t_j), c_j), O(H^*(c_j, t_j), t_j)] \quad (2.6)$$

En este modelo, la renta del individuo se determina de forma endógena ya que él elige el número de horas que dedica a trabajar por un salario dado. La forma en que se introduce la variable renta en la función de utilidad va a estar definida por el mapa de curvas de indiferencia entre bienes y ocio del consumidor. Considerando una función de utilidad tipo Cobb-Douglas se obtiene que la tasa salarial puede especificarse bien sea multiplicando al tiempo o bien dividiendo el coste. En el primer caso, se supone implícitamente que, las personas con mayor nivel de renta (tasas salariales más altas) perciben más las pérdidas de tiempo en su viaje al trabajo que las personas con menor nivel de renta (tasas salariales más bajas); mientras que en el segundo caso, implícitamente se supone que el trabajador con alto nivel de renta es menos consciente del coste del viaje al trabajo que las personas con bajo nivel de renta. Una consecuencia que se deriva de esta formulación es que tanto la utilidad marginal de la renta como el valor subjetivo del tiempo de viaje son valores constantes, coincidiendo este último con la tasa salarial, Espino (2003).

Según González (1997), en el modelo propuesto por Jara-Díaz (1994), se indica que el tiempo gastado en diferentes actividades (trabajo, ocio) es la fuente básica de utilidad y considera que el tiempo asignado a cada actividad está relacionado de dos formas con otras actividades: a través de la dependencia directa entre los tiempos gastados para efectuar actividades variadas y a través del uso compartido de bienes. De acuerdo con estas consideraciones y estableciendo que la escogencia del modo de viaje puede verse como un problema de distribución del tiempo, Jara-Díaz (1994), formula el modelo que se muestra en la expresión 2.7; donde, T es el vector de tiempos T_i dedicados a las distintas actividades en el periodo ρ , H_f y H_v representan el número de horas de trabajo, los subíndices v y f indican “variable” y “fijo” respectivamente, t es el vector de tiempos de viaje t_{ij} en el periodo ρ , Y es el número de trayectos en el periodo, δ_{ij} es 1 si el modo i se usa en el trayecto j y 0 en otros casos, F es una función de transformación entre bienes y tiempos, X_{id} es la cantidad de bien i comprado en la zona d en el periodo, P_{id} es el precio del bien i en la zona d , M_j es el conjunto de modos disponibles para el trayecto j , I_f representa los ingresos fijos y s_h es el salario por hora de trabajo.

$$\max_{T, H_v, Y} U(T, H_f, H_v, t) \quad (2.7)$$

Sujeto a:

$$\sum_i T_i + H_v + H_f + \sum_{j=1}^Y \sum_{i \in M_j} \delta_{ij} t_{ij} = \rho \quad (2.7a)$$

$$F(X, T) \geq 0 \quad (2.7b)$$

$$\sum_i \sum_d P_{id} X_{id} + \sum_{j=1}^Y \sum_{i \in M_j} \delta_{ij} C_{ij} = I_f + s_h H_v \quad (2.7c)$$

$$Y = Y(X) \quad (2.7d)$$

En este modelo todas las actividades, incluso las necesidades individuales que el consumidor no desea ejecutarlas, tienen un impacto directo sobre la utilidad; además, acepta que el tiempo es la fuente principal de utilidad y postula que los bienes deberían ser considerados más como un medio que como un fin. Hasta cierto punto este modelo va más allá que los anteriores al considerar que cualquier minuto debe tenerse en cuenta sin importar el uso que se haga de él, lo cual es sin duda, una importante contribución a la formalización de la conducta de los viajeros.

De forma general se puede indicar que el tiempo que se gasta en un viaje o los ahorros en tiempo de viaje, se pueden cuantificar por diversos procedimientos. Sin embargo, se debe distinguir entre el tiempo de trabajo y el tiempo de ocio que se invierte en un desplazamiento. El tiempo de trabajo está muy relacionado con el nivel de renta de los individuos, mientras que el tiempo de ocio que se destina a un traslado está relacionado con la voluntad a pagar por ese tiempo. El valor para una hora de trabajo puede llegar a 9,92€/persona-hora, y para horas de no trabajo 1,44€/persona-hora, mientras que si se considera el tiempo de viaje con propósito de trabajo y no trabajo teniendo en cuenta la tasa respectiva de ocupación del vehículo, este valor pueden llegar a 5,52€/coche-hora para días laborables, Doll y Jansson (2005).

Tabla 2.2. Comparación de valores del tiempo de viaje (VTV) según diversos estudios -en Euros de 1998-. (Fuente: Doll y Jansson, 2005).

Segmento de Transporte	HCG ^(a) 1994 U.K. 1994	HCG ^(b) 1998 NL 1997	SIKA ^(c) SE 1996	EUNET ^(d) UE 1995	UNITE UE 1998
Transporte de pasajeros – VTV por persona-hora					
Coche/moto		6,70	9,31		
Negocios	21,23	21,00	11,95		21,00
Commuter/particular	5,53	6,37	3,91		6,00
Ocio/vacaciones	3,79	5,08	3,10		4,00
Coche/Interurbano			7,47		
Negocios	21,23				21,00
Commuter/particular	5,95		5,40		6,00
Ocio/vacaciones	3,08		4,37		4,00
Bus Urbano			5,75		
Negocios	21,23				21,00
Commuter/particular	5,95		4,94		6,00
Ocio/vacaciones	3,08		3,22		3,20
Transporte de mercancías – VTV por vehículo/ton-hora					
Transporte por carretera	36,00				32,60
Vehículo ligero	45,00		39,68	30,75	40,76
Vehículo pesado	48,00		39,68	30,75	43,47

(a), (b) HCG: Hague Consult Group. Estudios para el Reino Unido y Países Bajos.

(c) SIKA: Swedish Institute for Transport and Communication Analysis.

(d) EUNET: Socio-Economic and Spatial Impacts of Transport Infrastructure Investments and Transport System Improvements.

En el proyecto UNITE (*UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency*) se tuvieron en cuenta diversos estudios sobre la valoración del tiempo de viaje según el modo de transporte y tipo de vehículo. La tabla 2.2 resume dichos valores para el modo carretera.

2.3.3 Costes externos (C_e)

Resultan de la cuantificación de los efectos externos generados por el transporte, los cuales pueden ser positivos (aumento de productividad y bienestar, ahorros de tiempo, comunicación entre zonas aisladas, etc.) y negativos (congestión, accidentes, efectos medioambientales, daños en la infraestructura, efectos barrera, estrés, etc.), y según el libro Blanco (1998) de la CE, son costes no pagados por el usuario de un bien o servicio (en este caso una infraestructura). No reconocer tales costes conlleva al uso excesivo del bien o servicio. Para una revisión metodológica para la estimación de los costes externos y sus escenarios de internalización consultar Van Essen et al. (2007).

Tabla 2.3. Principales externalidades en los distintos modos de transporte. (Fuente: De Rus, et al. 2003).

	Ferrocarril	Carretera	Aéreo	Marítimo y fluvial
Atmósfera	Contaminación en generación electricidad	Emisión contaminantes locales y globales	Contaminación zonas aeropuertos y polución global en atmósfera	Contaminación global en la quema de residuos fósiles
Utilización del territorio	Efectos barrera para la fauna	Efectos barrera y movimiento tierras para construcción	Efectos barrera de aeropuertos para la fauna	Modificación costas y cauces fluviales
Residuos sólidos	Cierre líneas, equipos obsoletos	Desguace vehículos viejos. Aceites usados. Materiales construcción carreteras	Aeronaves obsoletas	Buques obsoletos
Agua	Desvío de cursos naturales para construcción infraestructuras	Contaminación aguas superficiales y subterráneas por residuos de pavimentos	Desvío de cursos naturales para construcción infraestructuras. Drenaje pistas	Desvío de cursos naturales para construcción de canales. Efecto barrera en costas y modificación playas
Ruido	Problemas en entornos de estaciones y vías	Problemas en grandes ciudades y entornos de carreteras	Problemas en entornos de aeropuertos y zonas de aproximación de aeronaves	—
Accidentes	Descarrilamientos y choques. Posibilidad de vertidos de sustancias contaminantes	Elevado número de víctimas mortales y heridos. Vertidos de sustancias contaminantes	Accidentes de elevada gravedad en términos de víctimas mortales	Vertidos al mar de petróleo y otras sustancias contaminantes
Otros impactos	—	Congestión en vías urbanas o tramos determinados de carreteras	Congestión en aeropuertos. Retrasos para viajeros y costes para compañías	—

En su momento, el Libro Verde (1995) de la CE, cuantificó los costes producidos por las externalidades negativas en 250.000 millones de euros, el 90% de los cuales estaba vinculado al tráfico por carretera. La internalización de dichas externalidades, permitiría economizar entre 28.000 y 78.000 millones de euros al reducir la congestión del tráfico y el número de accidentes y al disminuir las emisiones de CO₂ en un 12% como media.

Cuantificar en términos monetarios los efectos externos del transporte no es nada fácil y resulta complejo en la práctica, por ende es necesario determinar para cada modo si los niveles de producción y los precios son los apropiados, o si el reparto modal es el conveniente socialmente cuando se introducen dichos efectos. Como se indicó, cada modo de transporte introduce unos efectos externos negativos, cuyos problemas principales pueden resumirse en la tabla 2.3. Una descripción detallada de los costes externos negativos relevantes que ocasiona el transporte por carretera se presenta en el Anexo 1.

En cuanto a los costes relacionados con la congestión se incluyen los costes ocasionados por los retrasos y su incidencia sobre los costes de operación (por ejemplo, mayor consumo de combustible por las velocidades lentas o sobre el salario horario adicional que un operador tiene que pagar a sus conductores empleados en caso de congestión).

Tabla 2.4. Elementos considerados para medir cada categoría de costes externos. (Fuente: Van Essen et al. 2006).

Categoría de costes	Indicador considerado
Costes de congestión	Costes por vehículo Costes por veh-km Tipo de infraestructura (Interurbana, urbana, metropolitana) Hora punta - Hora valle
Costes de Accidentes	Costes por accidente Costes por veh-km Tipo de infraestructura (Interurbana, urbana)
Costes por ruido	Costes por veh-km Tipo de infraestructura (Interurbana, urbana) Día - noche
Costes por contaminación atmosférica	Costes por veh-km Tipo de infraestructura (Interurbana, urbana, metropolitana) Hora punta - Hora valle
Costes por cambio climático	Costes por veh-km Tipo de infraestructura (Interurbana, urbana, metropolitana) Hora punta - Hora valle

Respecto a los impactos medioambientales referentes al flujo de tráfico tales como el ruido, las emisiones de monóxido de carbono y la contribución urbana a la producción de dióxido de carbono, se encuentra que disminuyen si se ataca directamente a la congestión. En consecuencia, al tomar la tarifación como una estrategia integral en la que se contribuya a disuadir el uso del coche o modificar la conducta del viaje, proporcionaría una reducción directa de la congestión, las alteraciones

medioambientales, y proporcionaría recursos suficientes para la financiación de infraestructuras y alternativas al uso del vehículo. La tabla 2.4 señala los elementos considerados para cuantificar los costes externos negativos del transporte por carretera.

2.4 Value pricing

2.4.1 Definición y objetivos

El término “*value pricing*” fue propuesto por el Departamento de Transporte de Estados Unidos y autorizado por TEA-21 (*Transportation Equity Act for the 21st Century*) de 1998, para promocionar el uso de estrategias de tarificación y enfatizar en los beneficios positivos de estas medidas para reducir la congestión, DeCorla-Souza (2004).

El concepto de *value pricing* o *congestion pricing* es que cada viajero pague un peaje que refleje el coste social marginal en el corto plazo por el uso de la carretera y de ahí que varíe de acuerdo al nivel predominante de congestión. Dado el avance tecnológico para el cobro de los peajes (ETC, *Electronic Toll Collection*, o EFC, *Electronic Fee Collection*), es posible hacer una recaudación de forma transparente y eficiente de este pago y así eliminar las demoras asociadas con la recolección manual. Los peajes que varían con el nivel de congestión proveen incentivos adecuados sobre las decisiones de viaje, que incluyen la escogencia de la destinación, el tiempo de viaje, el modo de transporte, la ruta o el no viajar.

La reducción de la congestión empleando peajes más altos por viajar durante períodos de horas punta, es similar en muchos aspectos a aquellos utilizados en diversos sectores de la economía para responder a las demandas en periodo punta, por ejemplo, en los tiquetes de las aerolíneas, tarifas de los teléfonos móviles, tarifas de la electricidad y durante las estaciones con alta presencia de turistas.

2.4.2 Tipos de *value pricing*

Se han propuesto diferentes estrategias de tarificación y restricción (prohibir el uso del vehículo en ciertos días de la semana según el último número de la matrícula sea par o impar) para gestionar la congestión en carreteras. El uso de la tarificación se aplica sobre una infraestructura específica (puente, túnel), o a toda una red de carreteras. La figura 2.2 muestra diversas medidas de tarificación que involucran los elementos que hacen parte de la ejecución de un viaje (vía, vehículo y estacionamiento). El objetivo es modificar el comportamiento de los usuarios de vehículos para lograr un uso eficiente de la actual capacidad viaria y optimizar el parqueo. A continuación se describen las características de estas estrategias de tarificación.

Tarificación por uso de la carretera (*Road Pricing*)

La tarificación de carreteras o *road pricing* hace alusión al pago que realizan los usuarios para internalizar las externalidades generadas por el uso excesivo de la vía (siendo este un recurso escaso y valioso, lo cual se debe racionar y optimizar su uso). Los principales objetivos de *road pricing* son: el control de la congestión y la generación de

ingresos para ser reinvertidos en mejoras de la infraestructura o del servicio de transporte público.

Las alternativas tarifarias pueden aplicarse a una infraestructura específica (un tramo de carretera, un puente o un túnel), o sobre una red de carreteras. Los sistemas de tarificación en una red abarcarían aspectos como las entradas y salidas de los accesos, los límites del área de influencia del esquema, la localización de los puntos de recolección y su distribución en la red, la topología viaria real, el diseño de esquemas tarifarios y posteriores desarrollos de la red.

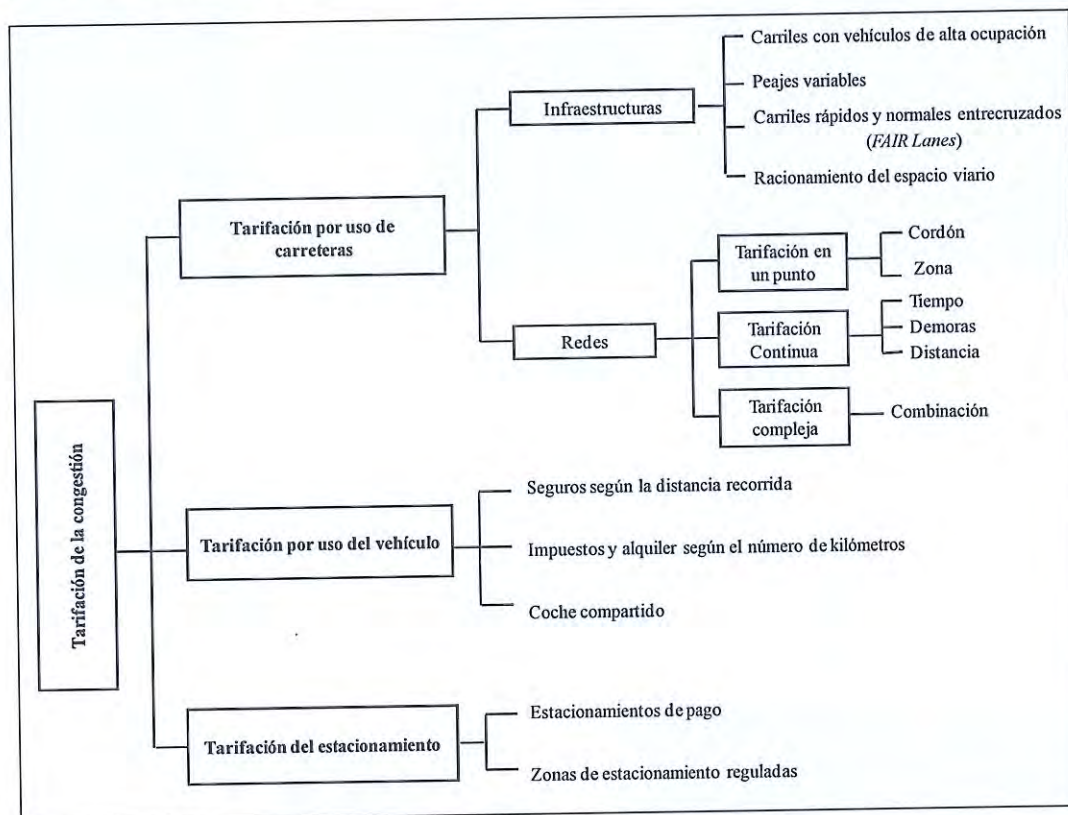


Fig. 2.2. Estrategias de tarificación para reducir congestión.

– Infraestructura específica

Carriles con vehículos de alta ocupación (VAO) con peaje (HOT)

Como estrategia para administrar la congestión en una autopista se reservan algunos carriles para vehículos con alta ocupación (superior a 2 o 3 personas, señalizados como 2+, 3+ o 4+) llamados HOV “*High Occupancy Vehicle*”, quienes pueden circular por dichos carriles de forma gratuita o pagando una tarifa que es descontada de forma automática. La figura 2.3 ilustra la detección automática del número de ocupantes en un vehículo. Por lo tanto, los carriles HOT “*High Occupancy Toll*” son carriles HOV que permiten circular vehículos con baja ocupación pero pagando una tarifa superior, análogamente estos vehículos deben disponer de un *transponder*, también llamado OBU “*On Board Unit*” o en España Vía T para permitir el pago automático.

Los carriles VAO con peaje (HOT) utilizan sofisticada recolección electrónica del peaje y los sistemas de información del tráfico también hacen variable el cobro del peaje en tiempo real. A los viajeros se les informa sobre las tarifas y las condiciones del viaje a través de señales con mensajes variables, localizadas cerca de los puntos de entrada, facilitando a los posibles viajeros decidir si usan o no los carriles HOT o los carriles para todo tipo de propósitos de viaje y que pueden estar congestionados durante las horas punta. La figura 2.4 indica una sección típica de los carriles HOT.



Fig. 2.3. Detección automática de la alta ocupación vehicular y señalización de los carriles VAO. (Fuente: Bautista, 2007 y WSDOT, 2003).

Un carril HOT usa la técnica de gestión de carriles para mantener un nivel superior de servicio durante los períodos de horas punta y animar a aquellos vehículos a contribuir a la reducción de los efectos *spill-over* (desbordamiento) de la congestión. La administración de carriles estimula el uso de vehículos tipo: *car-sharing* y transporte público (para fomentar una mayor ocupación), vehículos con baja emisión de gases (para mejorar la calidad del aire), vehículos equipados para la recolección electrónica del peaje (para mejorar la eficiencia del funcionamiento).

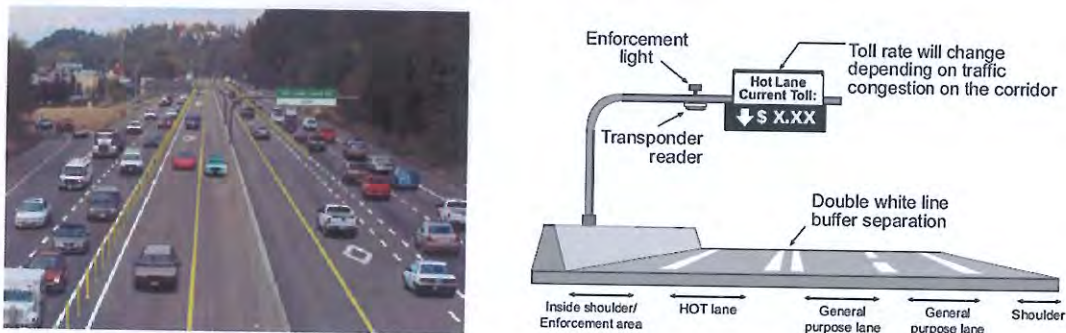


Fig. 2.4. Sección típica e información en tiempo real del coste del peaje de los carriles VAO. (Fuente: WSDOT, 2003).

El acceso a los carriles HOT puede darse en puntos intermitentes, pero en muchos casos solo existen puntos de entrada y salida únicos. Barreras de separación (físicas o por líneas de señalización vial) y el número limitado de puntos de acceso son herramientas importantes para administrar el flujo de tráfico en este tipo de carriles. La tabla 2.5 muestra algunos proyectos de los carriles HOT implantados en Estados Unidos.

Tabla 2.5. Síntesis de los Programas en funcionamiento de carriles VAO con peaje en Estados Unidos. (Fuente: Enlaces Web correspondientes).

Estado	Localidad/Implementación	Proyecto
California	San Diego/1996	Carriles HOT en la I-15: Los peajes cambian dinámicamente desde 50 centavos hasta \$4 de acuerdo al nivel de flujo de tráfico en los carriles. Los ingresos por el peaje de la I-15 están comprendidos entre \$1,3 a \$2,2 millones por año fiscal. http://ops.fhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/projty pes/hovhotlanes.htm
California	Alameda County	Carriles HOT en la I-880 y la I-680: La Interestatal 880 tiene el volumen más elevado de tráfico de camiones en Alameda. http://www.accma.ca.gov/pages/Projects.aspx
California	Orange County. En funcionamiento desde 1995	Carriles HOT en la SR-91: Los peajes se recolectan con <i>transponders</i> llamados AVI (Automated Vehicle Identification) y varían con la hora del día del viaje y la ocupación del vehículo. Todos los automóviles y motocicletas que están equipados con un AVI y posean una cuenta pre-pago son idóneos para usar los carriles. Los acuerdos de Interoperabilidad se establecen entre todas las infraestructuras de peaje de California ofreciendo opciones electrónicas/AVI de pago de `peaje bajo una única marca, "FasTrak*". http://www.91expresslanes.com/
Colorado	Denver, en funcionamiento desde 2006	Carriles HOT en la I-25: Los viajeros usualmente pagan entre \$0,50 y \$3,25 por viaje, dependiendo de la hora del día para este recorrido de 7 millas. El servicio de buses es uno de los mejores ya que alcanzan su límite de velocidad total. http://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/vpqrtr/sec1.htm
Florida	Miami-Dade County	Carriles HOT en la I-95: Todos los proyectos incluyen algunas mejoras (rampas nuevas, etc.) para los carriles con flujos combinados, los cuales proveen un 20% de incremento de la capacidad en horas punta, sin tener que ampliar la I-95. Los beneficios del proyecto se estiman en \$3,77 billones (ahorros en el tiempo de viaje y reducción de los costes de operación del vehículo). http://ops.fhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/projty pes/hovhotlanes.htm
Minnesota	Minneapolis, en funcionamiento desde 2005	Carriles HOT en la I-394: Los datos del desempeño preliminar del I-394 durante los primeros seis meses de operación indican que los viajes tarifados por semana (prom/máx) serían 15.918/19.493, y sus ingresos por semana \$12.484/\$15.613. http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/OtherHOTlanesProjects.htm

* FasTrak es un sistema de recolección usado en carreteras de peaje en California que permite a los conductores conducir por carriles designados "FasTrak Only" sin detenerse. El peaje se deduce automáticamente de una cuenta prepago.

Tabla 2.5. (Continuación). Síntesis proyectos de Programas en funcionamiento de carriles VAO con peaje en Estados Unidos. (Fuente: Enlaces Web correspondientes).

Texas	Houston/1998 "QuickRide" pricing program. Se implantó sobre carriles HOV existentes de la I-10 en Noviembre 2000	Carriles HOT en dos corredores radiales (I-10) Vehículos con un solo ocupante no se les permite usarlos. Los vehículos con dos ocupantes pueden usarlos durante las horas punta pero pagando \$2,00 por viaje, mientras que los vehículos con más ocupantes continúan viajando gratis. http://ops.fhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/projty pes/hovhotlanes.htm
Washington	Puget Sound Region	Carriles HOT en la SR-167: Los detectores del tráfico bajo el pavimento envían a un computador los datos en tiempo real y automáticamente se ajusta el precio en las señales para mantener la demanda en movimiento. Las tarifas de peaje mínimas y máximas para el 2005 se estimaron en \$0,60 y \$1,20, respectivamente. Los peajes se incrementan durante congestión severa. http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/Othe rHOTlanesProjects.htm

Peajes variables

Se paga una tarifa variable en función de la hora del día con la intención de animar a los viajeros que utilicen la autopista (puente o túnel) en las horas de menor congestión, o que usen otros modos u otras rutas. Cualquier cambio en los viajeros beneficia a los conductores que utilizan la autopista en periodos de hora punta, ya que disminuye las demoras. Una forma óptima de aplicar este concepto es incrementar la tarifa en un valor considerable durante el periodo de mayor congestión y no el de ampliar el periodo punta.

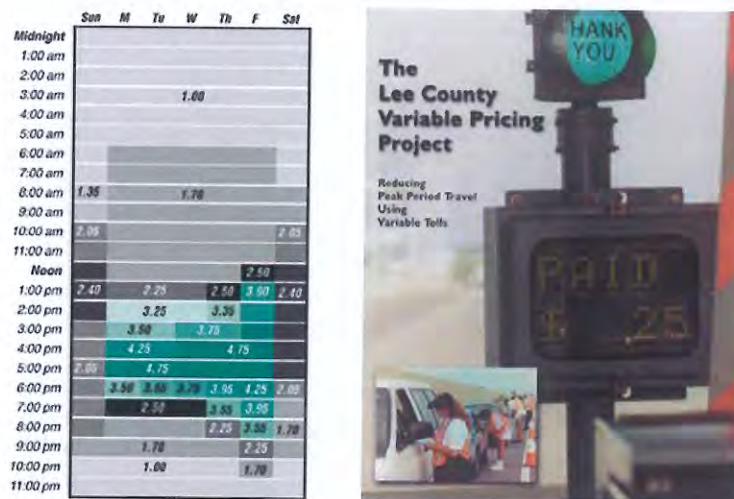


Fig. 2.5. Peaje variable en función de la hora del día. (Fuente: Sullivan, 2002).

En el condado Lee, en la Florida, desde 1998 a los viajeros frecuentes se les ofrecieron peajes reducidos en dos puentes durante los períodos valle e inmediatamente antes y

después de las horas de mayor demanda (ver figura 2.5). Este proyecto se aceptó fácilmente por los residentes afectados. Para obtener una reducción en los peajes durante los períodos punta, los motoristas debían usar un *transponder* electrónico con una cuenta prepago. El proyecto redujo con éxito el tráfico en los períodos de congestión, ofreciendo mejoras en el servicio para los usuarios de los puentes.

Los gestores de las múltiples infraestructuras con peaje en USA (puentes, túneles y más de 8.000 km de autopistas), están ofreciendo reducir las tarifas de los peajes durante los periodos de menor congestión como una forma de incentivar a aquellos motoristas para que sean flexibles y tomen ventaja de la oportunidad de cambiar la hora de uso de la infraestructura. Otra posibilidad de variar los peajes es diferenciándolos por día de la semana o por época del año, especialmente cuando el destino es más de tipo vacacional.

Recientes investigaciones realizadas sobre los carriles expresos de la SR-91 en USA indicaban que sus usuarios regulares (*commuters*) asignaban demasiadas horas al viaje entre sus hogares y el trabajo. Aproximadamente el 85% de sus clientes son casados, y más de la mitad educan a sus hijos. Muchos de los clientes escogen el peaje solamente en días con mayor necesidad y emplean los carriles libres en los demás días. Dichos usuarios enfatizan que ellos valoran un viaje rápido, seguro y confiable y que la estrategia del peaje está diseñada para brindar esta valoración.

En este momento, los cambios en las tarifas de los peajes son notificados a los usuarios en tiempo real mediante señales con mensajes variables sobre la carretera, o a través de correos electrónicos. La figura 2.6 muestra el horario de los peajes variables sobre los carriles rápidos de la SR-91 en USA.

91 Express Lanes Toll Schedule Eastbound Effective April 1, 2007 SR-91 to Riverside Co. Line							
	Sun	M	Tu	W	Th	F	Sat
Midnight	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
2:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
3:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
4:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
5:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
6:00 am	1.15	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.15
7:00 am	1.15	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.15
8:00 am	1.50	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
9:00 am	1.50	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
10:00 am	2.30	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30
11:00 am	2.30	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30
Noon	2.70	1.85	1.85	1.85	1.85	2.60	2.70
1:00 pm	2.70	2.55	2.55	2.55	2.60	4.35	2.70
2:00 pm	2.70	3.70	3.70	3.70	3.60	4.35	2.70
3:00 pm	2.30	3.95	3.95	4.95	4.95	9.25	2.70
4:00 pm	2.30	6.65	8.00	8.50	9.25	9.50	2.70
5:00 pm	2.30	6.65	8.50	9.50	9.25	8.00	2.70
6:00 pm	2.30	1.85	5.45	4.95	5.75	4.75	2.30
7:00 pm	2.30	2.60	2.60	2.60	4.00	4.40	1.85
8:00 pm	2.30	1.85	1.85	1.85	2.55	4.00	1.85
9:00 pm	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.55	1.85
10:00 pm	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.85	1.15
11:00 pm	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15

91 Express Lanes Toll Schedule Westbound Effective April 1, 2007 Riverside Co. Line to SR-91							
	Sun	M	Tu	W	Th	F	Sat
Midnight	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
2:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
3:00 am	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
4:00 am	1.15	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	1.15
5:00 am	1.15	3.60	3.60	3.60	3.60	3.45	1.15
6:00 am	1.15	3.70	3.70	3.70	3.70	3.60	1.15
7:00 am	1.15	4.05	4.05	4.05	4.05	3.95	1.60
8:00 am	1.60	3.70	3.70	3.70	3.70	3.60	1.85
9:00 am	1.60	2.95	2.95	2.95	2.95	2.95	2.30
10:00 am	2.30	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30
11:00 am	2.30	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.60
Noon	2.30	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.60
1:00 pm	2.60	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.60
2:00 pm	2.60	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	2.60
3:00 pm	2.60	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30	2.60
4:00 pm	2.75	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30	2.75
5:00 pm	2.75	1.85	1.85	1.85	1.85	2.30	2.75
6:00 pm	2.75	1.85	1.85	1.85	1.85	2.70	2.30
7:00 pm	2.30	1.15	1.15	1.15	1.15	1.85	1.85
8:00 pm	2.30	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
9:00 pm	2.30	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
10:00 pm	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
11:00 pm	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15

Fig. 2.6. Peajes variables sobre los carriles rápidos de la SR-91 en USA. (Fuente: <http://www.91expresslanes.com>).

Otro ejemplo de peajes variables en USA, se presenta en el puente Golden Gate donde los peajes solo se cobran en la dirección hacia el interior de San Francisco. Las tarifas para los vehículos de dos ejes y motocicletas son \$5 y \$4 si emplean FasTrak. Para vehículos con más de dos ejes, la tarifa corresponde a \$2.50 por eje. Los vehículos con tres o más personas (*carpool*), motocicletas y buses están exentos de pago todos los días entre las 5 am y 9 am y entre las 4 pm y 6 pm, excepto en festivos. A los vehículos híbridos se les permite el uso de los carriles de alta ocupación (VAO) aún si el vehículo es ocupado por una sola persona y el peaje puede pagarse de forma manual o con FasTrak, (http://goldengatebridge.org/tolls_traffic/).

Carriles rápidos y normales entrecruzados (FAIR lanes)

Los carriles FAIR “*Fast And Intertwined Regular*” es un concepto innovador de *value pricing* y busca tarifar una autopista de forma dinámica, permitiendo que algunos carriles de la autopista se conviertan (utilizando tiras y pilones de plástico) en carriles de alta velocidad mediante el pago de un peaje mientras abandonan los carriles libres de pago.

El peaje se paga de forma automática en los carriles rápidos y se fija en tiempo real para limitar al máximo el tráfico y así poder circular a velocidad de flujo libre. Los conductores son advertidos a la entrada de los carriles rápidos del cambio en la tarifa del peaje a través de mensajes electrónicos que se ubican en los bordes de la vía. Tan pronto el volumen de tráfico en los carriles rápidos se acerca al máximo que puede ser acomodado a velocidades cercanas a las de flujo libre, los peajes se incrementan para disuadir la entrada adicional de vehículos a los carriles rápidos. Esto asegura que los carriles ofrezcan un viaje más rápido y más confiable que en los carriles regulares. Los conductores que viajan en los carriles sin pago reciben abonos que son pagados por los ingresos que se reciben de los carriles con peaje, estos abonos pueden ser usados para viajar posteriormente en los carriles rápidos (siempre y cuando posean el OBU para descontar de forma automática el valor del peaje) o para otros propósitos (parking, tráfico, etc.). La figura 2.7 muestra la formación de los *FAIR lanes* en la autopista SR-91 en el Condado de Orange, California implementado desde 1995.



Fig. 2.7. Carriles FAIR sobre la SR-91 en California. (Fuente: Flores y Egan, 2005).

Entre los beneficios que proporcionan los carriles FAIR se encuentran el uso eficiente de la carretera y mejora de la velocidad y frecuencia del servicio de transporte público, además, generan ingresos para financiar vías y subsidiar el uso de carriles regulares. Los carriles FAIR proveen más de un carril rápido y de ese modo permite que vehículos rápidos adelanten a los que van más lentos, evitando la formación de colas de vehículos.

Racionamiento del espacio viario (Road Space Rationing)

Una variación de tarifación viaria es racionar los viajes en vehículo durante las horas punta a través de un sistema de créditos de recaudo neutro. Kockelman y Kalmanje (2005), propusieron una política de tarifación basada en créditos por congestión (*Credit Base Congestion Pricing* - CBCP), donde los conductores reciben mensualmente una asignación de créditos monetarios de viaje “bolsa de crédito”, para ser usado en las vías. Según la hora del día y el tipo de vía, las tarifas fluctúan según la demanda variable y sus externalidades negativas asociadas. Los usuarios no pagan dinero de su bolsillo a menos que ellos excedan dicha asignación. Los conductores que gastan menos del límite pueden usar créditos más adelante o intercambiarlos por efectivo. Para conductores con necesidades de desplazamiento especiales, se les pueden asignar créditos extras. CBCP tiene el potencial de ser una política de tarifación por congestión equitativa y efectiva, ya que los conductores pueden escoger si ahorrar créditos o gastar dicha asignación basado en sus necesidades de viaje. CBCP, también es un ingreso neutral con ingresos mensuales (después de descontar los costes administrativos) que retorna como subsidio de los ingresos del mes siguiente. CBCP puede implementarse con facilidad, considerando las nuevas tecnologías que ETC. Kockelman y Kalmanje han hecho ensayos para su posible aplicación en las carreteras de Texas.

– Redes de carreteras

Varios sistemas de tarifación se han propuesto para reducir la congestión en las redes de carreteras cobrando un peaje al pasar por puntos específicos (por ejemplo, en los peajes de cordón), o empleando una tarifación continua, (por ejemplo, basado en distancia recorrida, tiempo invertido en el viaje y tiempo gastado en congestión) y tarifación compleja (mediante combinación de estructuras tarifarias).

Dada la relevancia de esta tesis en las diferentes formas de tarifar la congestión en una red de carreteras, estos tipos de *value pricing* se explican en detalle más adelante en el epígrafe 2.6.

Tarifación por uso del vehículo (*Vehicle Use Pricing*)

Otro de los objetivos de *value pricing* es estimular el uso limitado o medido del vehículo particular “*vehicle use pricing*”, de tal forma que se contribuya a la reducción de accidentes, congestión, contaminación y consumo de combustible; entre otros podemos distinguir los siguientes tipos:

Seguro para automóviles en función de lo que se conduzca (*Pay-As-You-Drive Automotive Insurance*)

Conocido como PAYD "*Pay As You Drive*", y permite a las compañías de seguros proporcionar un incentivo para que los conductores utilicen poco el coche haciendo que la prima del seguro se pague en función de la cantidad de kilómetros recorridos. Esta opción se extiende cada vez más, dada la posibilidad de instalar una unidad de GPS "*Global Position System*" en los vehículos. Algunos estudios estiman que la reducción del número de kilómetros de viaje está entre un 10% y 20%, lo que significa un ahorro en accidentes, contaminación; con respecto a la congestión será superior a los \$40 billones (1.000 M) en los próximos 20 años, suponiendo que cada kilómetro se cuantifique en \$0,06 por costes de congestión.

England's Norwich Union Insurance inició ofreciendo seguros PAYD a los conductores en una base limitada en el 2003, y en el 2005, el Congreso de los EU autorizó el Proyecto Federal para el transporte llamado SAFETEA-LU, el cual incluye otros U\$3 millones anuales para incentivar los proyectos que involucren los seguros PAYD. Muchos Estados (Oregon, Minnesota, Texas, Washington, California) están aplicando políticas de seguridad PAYD, VTPI (2007).

Impuestos y leasing de automóviles en función del número de kilómetros (*Distance-Based Automotive Leasing and Vehicle Taxation*)

Más del 80% de los costes de propiedad y operación son fijos. Este tipo de *value pricing* facilita utilizar las bases de PAYD para admitir que el *leasing* (alquiler con opción de compra) y los impuestos se paguen en función de la cantidad de kilómetros que se recorran desincentivando el uso del coche. En USA el 30% de los vehículos nuevos que se adquieren son a través de *leasing*. Una vez una persona ha decidido adquirir un vehículo, generalmente hay pocos incentivos financieros por usarlo extensivamente.

Similar a PAYD, éste es una variante de la tarificación basada en la distancia, cuyos costes de alquilar un vehículo se fundamentan en el número de kilómetros recorridos y la depreciación del vehículo, por lo tanto, cuanto más conduzca su vehículo, más tendrá que pagar y a menor conducción, mayor ahorro. Dichas tarifas tienden a ser más eficientes y justas a nivel económico.

Coche compartido (*Carsharing*)

Coche compartido o "*Carsharing*" es un novedoso y voluntario concepto de movilidad que promueve el uso racional del coche sin necesidad de ser propietario, convirtiendo los costes fijos de propiedad en variables. El *carsharing* contribuye a encarar las deficiencias de las zonas de parqueo urbanas. Actualmente se está expandiendo su uso aplicando diferentes estrategias: sistema de *carsharing* a mitad de precio haciendo reserva, tarificación de *carsharing* en hora punta, uso de vehículos particulares en determinados momentos como *carsharing* y compensación a sus propietarios, etc. la figura 2.8 ilustra algunos ejemplos de *carsharing*.



Fig. 2.8. Carsharing en Atlanta y Barcelona.

Carsharing requiere algunas características:

- Accesibilidad (por ejemplo, localizado en o cerca de barrios residenciales);
- Asequibilidad (tarifas razonables, convenientes para viajes cortos);
- Conveniencia (los vehículos *check in* y *check out* con facilidad en cualquier momento);
- Fiabilidad (usualmente, los vehículos están disponibles y tienen fallas mecánicas mínimas).

Carsharing tiende a incrementar la equidad mejorando las opciones de movilidad de aquellas personas quienes no son favorecidas con el transporte, y permitiendo a los conductores con niveles de ingreso bajos, ahorros financieros significativos comparados con los de la propiedad de vehículo, VTPI (2007). La red de *carsharing* (www.carsharing.net) identifica las distintas organizaciones establecidas en Europa y estados Unidos.

Cuando *carsharing* se combina con conceptos de tarificación tales como, carriles HOT, carriles FAIR y períodos tarifados en horas punta en infraestructuras tarifadas, estos originales conceptos podrían tener un efecto sinérgico en la reducción de la congestión y ofrecer oportunidades excepcionales para demostrar la efectividad del *road pricing* y mejorar las políticas de aceptabilidad.

Tarificación por aparcamiento (*parking pricing*)

Parking Cash-Out

En muchos lugares donde se trabaja, los empresarios proporcionan la posibilidad de parqueo gratis a sus empleados. Una alternativa es pagar al empleado ya sea en dinero, pases de tráfico u otras alternativas por dejar libre el parking, de tal forma que pueda ser utilizado por otro tipo de personas que carecen del mismo. Otra medida consiste en aumentar el precio del parking, donde la efectividad de recibir un dinero extra varía con la red de carreteras y la distribución de los viajes. Como empleado se contribuye a disminuir congestión y a cambio se recibe un dinero extra.

Parking Cash Out, trabaja mejor en áreas donde el tránsito es accesible o, donde los empleados deseen hacer uso de *car-sharing*, bicicleta/caminar, DeCourla-Souza (2004).

Zonas de Aparcamiento Reguladas (Regulated Parking Zones)

Zonas azules y verdes de parking

A raíz de los problemas de movilidad y déficit de aparcamientos en muchas ciudades del mundo existen las zonas azules creadas para controlar el tiempo que permanecen los coches estacionados sobre la vía pública.

Las zonas verdes (caso práctico en Barcelona) permiten regular las plazas de aparcamiento en determinadas zonas de la ciudad favoreciendo a los residentes de la misma, mientras que para los visitantes las tarifas son más altas y el tiempo de permanencia es controlado (máximo 2 horas). El pago en cualquiera de las zonas, se hace directamente en los parquímetros que se colocan en las aceras como se muestra en la figura 2.9.



Fig. 2.9. Parquímetros para el cobro en las zonas verdes y azules de Barcelona.

Las zonas reguladas de aparcamientos en la vía pública que facilitan ordenar el aparcamiento, controlar la indisciplina y facilitar a los residentes de la zona lugares para estacionar el vehículo.



Fig. 2.10. (a) Distintivo de residente y (b) Señalización del área verde.

A los vecinos y vecinas de la zona se les asigna una tarjeta de residente o distintivo (figura 2.10a), la cual les da el derecho de aparcar en una zona concreta del área verde. El distintivo tiene una medida similar a la de una tarjeta de crédito, e indica la zona a la cual pertenece la persona, dónde puede aparcar con tarifa de residente, y el número de matrícula del vehículo. El Ayuntamiento ha distribuido más de 186.000 distintivos. El área verde funciona cada día laborable de 8 a 20 horas exceptuando una zona específica que también se aplica los sábados. Hay que verificar siempre la información que consta en la señal específica (figura 2.10b) que regula el tramo de estacionamiento.

Ahora, todas las plazas de aparcamiento en las 18 zonas reguladas de la ciudad son de pago, con tarifas diferentes para vecinos y visitantes. El pago de las tarifas se efectúa a través de parquímetros señalizados. Se han fijado tarifas y límites de tiempos adecuados a cada tipo de demanda. La tarifa a pagar para vecinos es de 20 céntimos/día, 1€/semana (tiempo máximo de estacionamiento permitido) y para el resto de usuarios es de 2,80€/hora con un máximo permitido de 1 o 2 horas según la zona.

2.4.3 Tecnología para el cobro

A medida que evolucionan las carreteras de pago, el sistema de cobro también evoluciona insertando la tecnología necesaria para hacer más eficiente el servicio y que la demora por el pago sea la menor posible, además se puede obtener un mayor control financiero y sobre todo, una mayor eficiencia en determinar el tipo de vehículo y la cantidad de kilómetros recorridos sobre una carretera. Con base en la tecnología existente, se puede decir que hay una continuidad y mejora de los diversos sistemas tarifarios en cuanto a su clasificación y a sus objetivos. Para empezar, éstos se pueden dividir en sistemas no electrónicos y sistemas electrónicos, siendo los primeros los menos evolucionados. La figura 2.11 muestra la evolución tecnológica para el cobro del peaje en las carreteras.

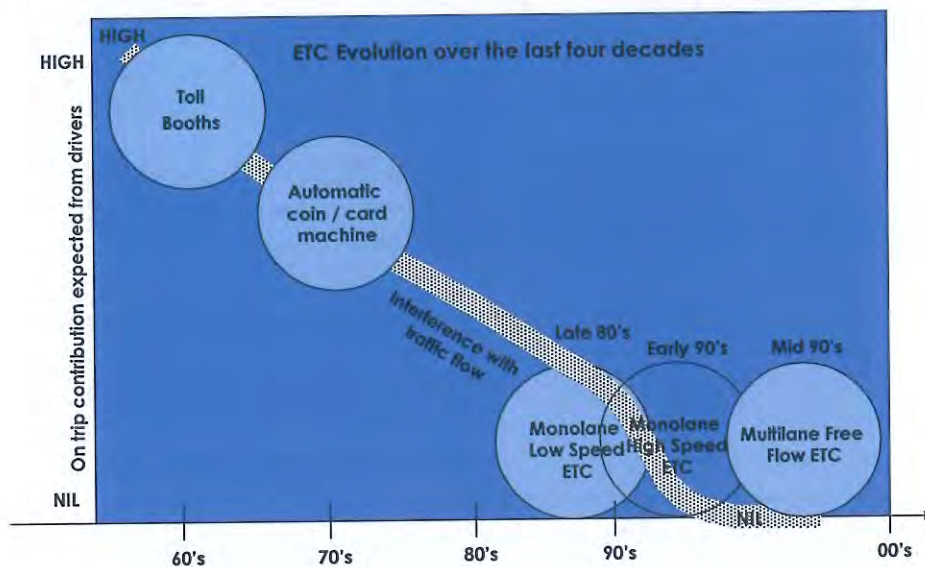


Fig. 2.11. Evolución tecnológica del cobro del peaje. (Fuente: ALG, Bangkok, 2004).

Sistemas no electrónicos

El sistema más elemental es el pago manual o en metálico utilizado en las autopistas con las tradicionales casetas de peaje, posee los inconvenientes de que el conductor debe disponer de dinero en efectivo y debe detener su vehículo para realizar el pago correspondiente al personal allí ubicado, que sumado a la limitada capacidad de cobro (350 veh/carril/hora con operario y 400 veh/carril/hora con máquina de monedas), perjudica la circulación normal del tráfico ocasionando congestión y demoras en su viaje.

Sistemas electrónicos de pago

Dentro de la tecnología de las tarjetas con bandas magnéticas que aún funcionan en muchas autopistas del mundo se encuentran las tarjetas de débito y crédito, que poseen la ventaja que el conductor no necesita disponer de dinero en efectivo para realizar el pago, pero siguen ocasionando congestión pues se debe detener el vehículo para poder pasar la tarjeta.

Los concesionarios de autopistas introdujeron los sistemas de peaje electrónico sin detención (conocido como telepeaje, peaje dinámico o ETC -*Electronic Toll Collection*) a principios de los años noventa en las autopistas para reducir el tiempo de paso por las áreas de peaje y aumentar así su capacidad. Debido a que los sistemas introducidos a nivel local y posteriormente a nivel nacional son distintos e incompatibles entre sí (Italia, Portugal, Francia, Suiza, Eslovenia y Noruega presentan este tipo de incompatibilidades), existen organismos internacionales como la ISO (*International Organization for Standardization*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) y en Europa la CEN (*Comité Européen de Normalisation*) que propenden por la estandarización de sistemas en el mundo que sean compatibles desde el punto de los usuarios, operadores y productores. En el caso de la UE ya han tomado cartas para solucionar este tipo de dificultades a través de la Directiva 2004/52/EC (sobre la interoperabilidad de los sistemas de peaje electrónico en la Comunidad), que establece el marco regulatorio para la utilización de un servicio único Europeo de ETC.

De acuerdo con Sorensen y Taylor (2005), para la implementación de *road pricing* o un sistema de tarificación que pretenda determinados objetivos se requiere para el cobro de la tarifa de un conjunto de tecnologías que permitan:

- Detectar la entrada, salida o presencia dentro de determinada área geográfica.
- Detectar la entrada, salida o presencia a lo largo de un tramo específico de carretera.
- Determinar la ubicación del vehículo en una red de carreteras.
- Determinar la distancia recorrida.
- Determinar el tiempo de viaje.
- Reconocer el vehículo a través de cierta información, tal como tipo, peso, configuración, etc.
- Guardar los datos del trayecto y calcular el precio a pagar.

- Transmitir al centro de información tanto los datos del viaje como la factura a pagar.
- Mantener la privacidad del usuario para vehículos ligeros (esto es menos importante para los vehículos comerciales).
- Prevenir la evasión del pago de peaje.

Para la consecución de estos propósitos, actualmente se emplea la siguiente tecnología:

Unidad a bordo (OBU -On Board Unit-), también se le conoce como OBE - *On Board Equipment* -, IVU - *In Vehicle Unit* -, *Transponder* o TAG, es un módulo de ordenador (de variada complejidad) que se instala en el vehículo para almacenar en la memoria datos como tiempos de entrada y salida o lugares de entrada y salida del área restringida, hace cálculos de la tarifa a pagar, y también almacena información específica del vehículo como su identificación, tipo, peso y configuración. Posee una estructura que permite integrarse con otras tecnologías como GPS, comunicación a través de móviles -GSM- y DRSC.

Smart Card, es una tarjeta con un chip electrónico que permite almacenar datos los cuales pueden ser removidos desde el OBU para ser insertados en lectores de tarjetas ubicados en puntos de recolección de pagos (estaciones de servicio, un centro de cómputo, etc.) y posteriormente enviados a las autoridades competentes. Con esta opción el usuario tiene pleno control de transferir los datos, por lo que las *smart cards* no facilitan una facturación totalmente electrónica.

DSRC (Dedicated Short-Range Communications): es un medio de comunicación simultáneo a través de microondas de corto alcance (menor a 30 metros) entre vehículos y receptores (ubicados al borde o encima de la carretera). DSRC se emplea específicamente para comprobar cuándo un vehículo entra o sale de un segmento delimitado de la vía o determinada área geográfica, presenta la desventaja que el vehículo debe reducir la velocidad (entre 30 y 40 km/h) para ser detectado. DSRC también se usa para el control del pago, por ejemplo, verificando si el vehículo que pasa tiene un OBU activo que registre los precios o que comunique los datos de viaje o facturas. La figura 2.12 ilustra el proceso de telepeaje usando DSRC.

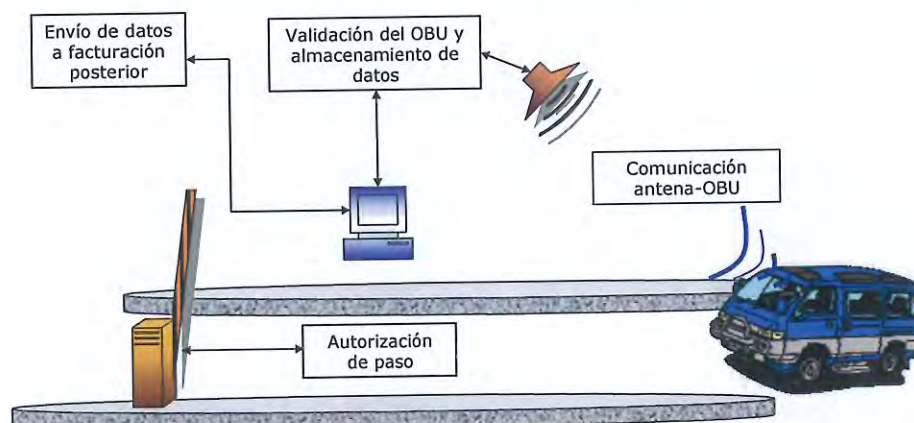


Fig. 2.12. Telepeaje con comunicación DSRC.

GSM (Global System for Mobile communications): es otra alternativa para DSRC, el GSM también se utiliza para comunicar tanto los datos del viaje como los datos del precio a pagar. Aunque, normalmente son más costosos que DSRC, GSM no requiere la instalación de dispositivos de comunicación en las carreteras ya que permite comunicaciones en tiempo real desde cualquier punto de la red (particularmente útiles en rutas guiadas, gestión de flotas de vehículos y momentos de emergencia).

GPS (Global Positioning System): emplea la tecnología de radiolocalización por satélite. Los satélites del GPS (integrados al OBU) se usan para precisar la ubicación del vehículo dentro de la red de carreteras, obtener la velocidad, tiempo y distancia de viaje. Presenta la desventaja que algunas veces especialmente en regiones urbanas o montañosas se pierde temporalmente la señal del GPS, lo que ocasiona una implementación poco práctica a escala natural. Suiza (que combina DSRC y GPS) junto con Alemania, han optado por utilizar la localización por satélite asociada a las comunicaciones móviles (GNSS/CN, *Global Navigation Satellite Systems/Cellular Networks*), inicialmente GPS y posteriormente GALILEO. Este tipo de medidas son la única solución que permite aplicar sin problemas el “peaje por zonas”, es decir, tarifar los vehículos que entran o salen de una determinada zona geográfica. La figura 2.13 ilustra el proceso de pago actual para los camiones en Alemania.



Fig. 2.13. Sistema de cobro en Alemania empleando GPS/GSM para camiones. (Fuente: Toll Collect. Alemania 2005).

El precio a pagar se calcula dependiendo de la forma como se estipula la tarifa, la cual puede ser *fija* si se quiere ingresar a un área determinada o recorrer una determinada cantidad de kilómetros o *variable* calculada en tiempo real según la hora del día en que se utilice la infraestructura, en cualquiera de las dos formas puede aplicarse una política de descuentos.

Para hacer efectivo el pago por el uso de la infraestructura, éste se puede hacer de forma prepago, postpago y pago inmediato. La forma prepago se puede realizar a través de la compra de una tarjeta *smart card* que se mantendrá en el vehículo o a través de una suscripción por un periodo de tiempo determinado o autorizando para que se descuenta

de forma automática de una cuenta bancaria exclusiva cada vez que se usa el sistema; en cualquiera de las dos formas el vehículo debe disponer de un OBU para ser identificado.

Para la forma postpago, el propietario del vehículo (previa instalación del OBU) suscribe una cuenta bancaria con la solvencia necesaria (calculada sobre la base del kilometraje mensual o el número de veces al mes que ingresa al área restringida) más un suplemento por razones de seguridad, para que le sea descontado el importe que figura en la lista detallada de la factura a pagar.

Para el cobro instantáneo desde una cuenta bancaria se hace mediante transmisión electrónica de datos desde el OBU a un ordenador central.

Para ayudar a prevenir la evasión de pago de peajes se han formulado diversas estrategias complementarias:

OBUs a prueba de alteraciones: con este sistema se busca asegurarse de que el usuario no desactive o inhabilite temporalmente el OBU durante algunos períodos del viaje. Algunas sugerencias incluyen sellos a prueba de alteraciones del OBU, inutilizando el motor si el OBU no funciona; además, comparar el OBU con el odómetro (tacómetro) para asegurar que el kilometraje recorrido sea coherente.

Control externo: bajo esta estrategia, se instalan *transponders* DSRC en varios lugares en toda la red, tal que al pasar los coches se envíen señales para garantizar que el equipo a bordo del vehículo funciona de forma adecuada.

Reconocimiento automático de matrículas – ANPR- (Automated Number Plate Recognition): ANPR utiliza la fotografía digital y el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) de algoritmos para identificar a los vehículos que pasan por un lugar en particular. Esta tecnología se aprovecha para propósitos que faciliten el cumplimiento de la ley, en esquemas como el *cordon pricing* en Londres y estructuras tarifarias basadas en la distancia.

Internet y facturación On-Line: con frecuencia, estas tecnologías se aplican para automatizar la facturación y el proceso de recolección de pagos.

Para proteger la privacidad del usuario (una de las grandes dificultades de implementación de esta tecnología de cobro), los gobiernos deben asegurar que el acceso a las grabaciones detalladas del viaje de los conductores será limitado (sobre todo para vehículos ligeros más que para los camiones). Para lograr este objetivo se han planteado dos enfoques, el primero que para propósitos de tipo operacional, la información total del viaje se agrupe y el OBU determine el precio total a pagar, de esta forma el gobierno nunca verá cualquiera de los detalles del historial del viaje, solamente la cantidad a pagar. El segundo enfoque es que el OBU comunique la información detallada del viaje a un tercer agente, quién agrupa los datos y presenta solamente la factura definitiva al gobierno. Como sucede en el sector de telefonía, este tercer agente está legalmente obligado a mantener la privacidad de estos datos excepto en casos de citaciones hechas por la ley.