

**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](http://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](http://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](http://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

#### 2.4.4 Experiencias internacionales

Diversos países y ciudades del mundo en su intento de acercarse al concepto de *road pricing* como mecanismo para optimizar el uso de las carreteras, captar recursos para la financiación de infraestructuras e implementar otra serie de medidas para disminuir los efectos del tráfico, han estudiado, modelado y ensayado la forma de tarifar sus carreteras basados en sus propios problemas (de tráfico, deficiencia de recursos, transporte público ineficiente, alta polución, congestión, ruido, deficiencia de parkings, infraestructuras saturadas, etc.), de tal manera que actualmente se cuenta con los resultados de sus implementaciones y sus diferentes transformaciones. Sumado a lo anterior, los avances tecnológicos realizados para recaudar el pago de la tarifa permiten administrar de forma óptima dichos ingresos y además admiten que el vehículo circule al menos, con la velocidad que traía inicialmente antes del pago. La tecnología aplicada es variada y la configuración topológica del esquema tarifario empleado depende de los objetivos a alcanzar. Nótese que, antes de la implementación de la mayoría de los esquemas existía un alto porcentaje de oposición por parte del público, pero dadas las mejoras en calidad de vida y la puesta en marcha de las medidas complementarias al esquema este porcentaje disminuyó de forma significativa.

Las siguientes tablas resumen brevemente los estudios y aplicaciones que se han hecho alrededor del mundo a nivel metropolitano y urbano para implementar un tipo de tarificación que gestione la movilidad y reduzca los efectos de la congestión.

*Tabla 2.6. Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing en zonas urbanas y metropolitanas.*









Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Estocolmo (Suecia)</b></p> <p>Zona del centro de la ciudad cargada con peaje. Tarifa variable en hora punta entre 10-20SEK, (9,17 SEK ≈ 1 €), Otras horas del día, fines de semana y festivos, no se cobra.</p> <p>Máximo 60 SEK por vehículo/día. Vehículos especiales no pagan.</p> <p>Financiación del ensayo entre el Gobierno y la ciudad de Estocolmo.</p> <p>Prueba puesta en práctica desde enero de 2006 y en septiembre se decidió que continuaba mediante votaciones.</p> <p>Los resultados mostraron la disuasión del tráfico en un 22% que representa 100.000 coches que no entraron al centro de la ciudad durante el periodo de tarificación (24h).</p> <p>Se favorece el transporte público como medida complementaria.</p>	 <p>Cordón con 18 puntos de control</p>
<p><b>Gotemburgo (Suecia)</b></p> <p>- Se plantean dos escenarios para el cobro de tarifas</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tasa kilométrica por Congestión: activo durante horas punta</li> <li>2. Tasa por efectos medio ambientales con tres anillos concéntricos</li> </ol> <p>-Ingresos destinados al sistema de tráfico.</p> <p>Activo durante las 24 horas del día</p> <p>Precio aumenta a medida que se acerca al centro de la ciudad</p> <p>Tarifas bajas aplicadas a todas las vías dentro de los cordones.</p>	 <p>Tres cordones concéntricos</p>





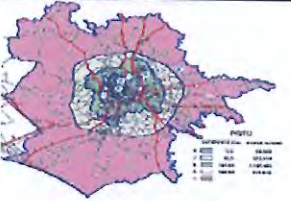



Tabla 2.6. (Continuación) Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing en zonas urbanas y metropolitanas.

Ciudad y características del urban road pricing	Topología tarifaria
<p><b>Singapur</b></p> <p>1975 inicia primera vez en el mundo de <i>Area Licensing Scheme</i> (ALS). Además de un paquete de medidas se instauró una tarifa por congestión. Restricción de vehículos al CBD (área 5,6 km<sup>2</sup>), con acceso por un número de puntos distintos.</p> <p>Inicialmente pago manual. En 1998 automático con instalación de OBU en los coches.</p> <p>Autos particulares SGD\$ 3/día, o SGD\$ 0,60/día por pago mensual. Vehículos comerciales pago doble. Taxis y vehículos con alta ocupación (&gt; 4 pasajeros) libres de pago. Pago con <i>Smart Card</i> en bancos, estaciones de combustible, puntos de venta.</p>	 <p>Topología tarifaria basada en un área</p>
<p><b>Hong Kong</b></p> <p>Peaje urbano con ERP (<i>Electronic Road Pricing</i>) Mejora de la infraestructura Privatización de estacionamientos en la ciudad. Introducción de <i>Park &amp; Ride</i> Altos costos en la propiedad de vehículos. Información en tiempo o real para viajeros con GPS.</p>	
<p><b>Copenhague (Dinamarca)</b></p> <p>Variación de fases semafóricas para trasladar congestión a las autopistas y carreteras.</p> <p>Regular flujos (planes de movilidad, restricción de parking, altas inversiones en transporte público, (TP) y <i>road pricing</i> (RP)).</p> <p>1997: Plan de Tráfico y Medioambiente: regular demanda creciente de desplazamientos.</p> <p>1999: aceptada propuesta de esquema RP.</p> <p>2001-2003: Se ensaya con 500 veh. usando tecnología GPS.</p>	 <p>Topología tarifaria basada en cordones y tarifa kilométrica</p>
<p><b>Bergen (Noruega)</b></p> <p>El anillo de peaje (área ≈ 18 km<sup>2</sup>) en Bergen tuvo una gran aceptación del público dado los altos niveles de congestión. Se cobra a visitantes por aparcar en el centro ciudad.</p> <p>Inicialmente se pagaban 5 NOK y ahora por entrar a la ciudad los vehículos ligeros pagan 15NOK (≈ 2€) y pesados 30NOK (≈ 4€). El periodo de operación inicial era de lunes a viernes de 6:00 am. - 10:00 pm. Actualmente es 24 horas de lunes a sábado. Desde 2004 se cobra de forma automática (Autopass).</p>	 <p>Vías de acceso al centro de la ciudad cargadas con peaje en 7 puntos de cobro</p>
<p><b>Oslo (Noruega)</b></p> <p>1990: inicio de peaje urbano en las vías de acceso a la ciudad. 81% público en contra de la implantación. El anillo de peaje cubre un área de 64 km<sup>2</sup>.</p> <p>1992: personas en contra del peaje se redujo al 59%.</p> <p>Se paga por entrar a la ciudad 13NOK (1€ ≈ 7,5 NOK) por vehículo ligero y 26 NOK por vehículo pesado. Sistema de cobro por anticipado que garantiza anonimato del usuario.</p> <p>Actualmente los usuarios usan AutoPASS-TAG.</p> <p>El periodo de operación son las 24 horas de todos los días.</p>	 <p>Anillo de peaje con 19 puntos de cobro</p>
<p><b>Trondheim (Noruega)</b></p> <p>El área inicial del anillo era de 20 km<sup>2</sup> hoy es de 50 km<sup>2</sup>.</p> <p>Tarifa variable siendo mayor en hora punta, fines de semana y festivos, no se paga. Tarifa por ingresar al área central 15 NOK (≈ 2€), de lunes a viernes de 6 am a 6 pm.</p> <p>Ingresos para transporte público, infraestructuras, seguridad vial y ambiental</p> <p>Disminución de congestión y mejorar accesibilidad.</p> <p>Se puede pagar de forma manual o de forma automática con AutoPASS.</p>	 <p>Cordón de peaje: 22 puntos de cobro</p>



**Tabla 2.6. (Continuación) Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing en zonas urbanas y metropolitanas.**

Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Helsinki (Finlandia)</b></p> <p>Congestión en HP de mañana y tarde.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte público sensible a la congestión y clima.</li> <li>- Inadecuada infraestructura de carreteras.</li> </ul> <p>Peaje metropolitano tipo con diversos esquemas tarifarios, cordón en la parte urbana, con varios anillos y división por zonas.</p> <p>Integrar el sistema de peajes a la tarifa Integrada del TP, para favorecer desplazamientos multimodales.</p>	 <p>Sistema tarifario metropolitano zonal y kilométrico</p>
<p><b>Edimburgo (Escocia)</b></p> <p>Problemas de congestión, aparcamiento y contaminación del aire.</p> <p>Las carreteras siguen una estructura radial hacia el centro de la ciudad.</p> <p>Implementar <i>road pricing</i> con un paquete de medidas.</p> <p>Implantar tres líneas de tranvías</p> <p>Funcionamiento de <i>Park &amp; Ride</i> - Mejorar servicio de autobuses e información en tiempo real a los viajeros, etc.</p>	 <p>Doble cordón</p>
<p><b>Bristol (UK)</b></p> <p>Cordón simple con sistema TAG (aparato electrónico que permite el flujo libre)</p> <p><i>Road pricing</i> como parte de medidas para mejorar movilidad en la ciudad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+Tren ligero, +Controlar tráfico y zonas de parqueo, +Crear Park &amp; Ride,</li> <li>+Nuevas líneas de autobuses, +Facilidades a ciclistas, +Información en tiempo real de los pasajeros</li> </ul>	 <p>Topología tipo cordón</p>
<p><b>Londres (UK)</b></p> <p>Después de varios estudios, en febrero de 2003 se implanta una tarifa de £5 por congestión en un área que cubre el corazón de Londres (22 km<sup>2</sup>), el cual está limitado por una carretera que forma un anillo interior. Sólo se cobra a las personas que cruzan el anillo, no para los que están en el anillo.</p> <p>Se incrementa la tarifa actual a £8 (julio -2005)</p> <p>Aprovecha la experiencia e implementa la actual tecnología para tarifar la zona a ampliar.</p> <p>La tarifa se aplica de lunes a viernes desde las 7:00 am hasta las 6:30 pm y no aplica los días festivos. Se puede pagar por correo, teléfono, SMS o Internet. Base de datos registra la placa del vehículo que hizo el pago.</p> <p>Existen dos rutas libres de tarifa para evitar el efecto barrera.</p>	 <p>Topología tipo cordón</p> <p>Zona a ampliar</p>
<p><b>Roma (Italia)</b></p> <p>Zona de acceso restringido área central histórica 4,6 Km<sup>2</sup>. 23 entradas</p> <p>Centro de control complejo. Días laborables 6:30 – 18:00, Sábados 14:00 – 18:00</p> <p>Tecnología TELEPASS: Cámaras de video con infrarrojos, Transmisión de datos por micro-ondas, Sistema OBE (<i>On Board Equipment</i>) con <i>Smart Card</i></p>	
<p><b>Génova (Italia)</b></p> <p>Alta congestión y contaminación</p> <p>Uso deficiente del TP</p> <p>Problemas de parking.</p> <p>Inadecuada red de infraestructuras</p> <p><i>Condon pricing</i>, área de 2,5 Km<sup>2</sup>.</p> <p>Aplicación de tecnología de punta.</p> <p>Los vehículos no necesitan implementar ningún dispositivo</p>	 <p>Topología tipo cordón</p>



#### 2.4.5 Efectos del value pricing

La implantación de un sistema de tarificación requiere que los diversos sectores económico, social, político, ambiental, etc., estén sintonizados con los objetivos que se esperan alcanzar con dicho sistema.

Actualmente en el transporte por carretera tanto a nivel metropolitano como interurbano de diferentes países del mundo y sin ir muy lejos en la misma UE, se conjugan impuestos al combustible, impuestos a los vehículos, peajes, viñetas, etc. (cada uno de ellos con determinado objetivo –desarrollar infraestructuras, disminuir congestión y los efectos nocivos para el medio ambiente, disminuir la accidentalidad, fomentar el transporte público, etc.-), lo cual lleva a considerar que dicho sector está excesivamente gravado y por lo tanto, desde hace más de 10 años se intenta reformar la tarificación de carreteras, de tal forma que se busque un sistema de tarificación eficiente y equitativo basado en la internalización de los costes externos que produce el transporte por carretera. A nivel mundial se están haciendo intentos por alcanzar un sistema tarifario integral que abarque todas las vías y se cobre un precio que equivalga al coste marginal social de un viaje (que incluya tanto las externalidades como los costes de infraestructura). En el caso de la UE, la Comisión ha publicado varios documentos relativos a la tarificación del transporte entre los que se destacan: el Libro Verde (COM/95/691), “Hacia una tarificación justa y eficiente del transporte”, el Libro Blanco (COM/98/466), “Pago justo por el uso de la infraestructura” y el Libro Blanco (COM/2001/370), “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”.

Dentro del Libro Blanco (COM/2001/370), se indica que *los usuarios del transporte tienen derecho a saber lo que pagan y por qué lo pagan*, y se manifiesta el objetivo de buscar la armonización entre tarifas e impuestos como medio de integración y competitividad europea, describiendo que *“La paradoja es que se aplican demasiados impuestos en el transporte... Se considera que el transporte está excesivamente gravado, pero la verdad es que se grava de forma incorrecta y desigual. Se trata a los usuarios sin distinciones, independientemente del deterioro de las infraestructuras, de los atascos o de la contaminación que provoquen. Esta distribución inadecuada de las cargas entre los explotadores de la infraestructura, los contribuyentes y los usuarios genera un falseamiento considerable de la competencia entre operadores y entre modos de transporte”*.

Cuando se plantea la necesidad de reformar la tarificación de carreteras, la situación es muy diferente tanto para el transporte a nivel metropolitano (los principales usuarios son el vehículo privado y transporte público) como a nivel interurbano (camiones los que más las usan). Al hacerse esta distinción, el Libro Blanco (2001), enfatiza que el principal problema no es el conjunto de impuestos y tasas/peajes, sino más bien su estructura es la que necesita ser modificada y que al mismo tiempo sea aceptada ampliamente.

De acuerdo con Marler et al. (2003), la implementación de la tarificación basada en costes marginales (*road pricing*) para el transporte por carretera en Europa, ha sido investigada en el proyecto MC-ICAM (*Implementation of Marginal Cost Pricing in Transport –*



*Integrated Conceptual and Applied Model Analysis*), cuyos resultados identifican tres tipos de obstáculos o barreras que pueden afectar a nivel nacional, local y regional la consumación de este tipo de tarificación:

- Barreras tecnológicas y prácticas para desarrollar e instalar ETC y las dificultades de computar la tarifa óptima y la forma de transferirlo a los usuarios;
- Barreras legales e institucionales como la libertad de movilidad, derechos de privacidad y la presión en tarifas de las carreteras que ejercen los operadores privados;
- Barreras de aceptabilidad. El público y los políticos se han opuesto al *road pricing* como una forma de doble tarificación, inequitativa para las personas de bajos recursos y para otros sectores.

Dichas barreras al *road pricing* imponen restricciones como por ejemplo, cuáles y cómo deben ser tarifadas las carreteras, el grado de diferenciación de las tarifas por grupo de usuarios, la forma de invertir esos ingresos y medidas complementarias de no tarificación.

### **Barreras tecnológicas y prácticas**

Tanto a nivel metropolitano como interurbano del transporte por carretera, el coste y la fiabilidad de la tecnología, unido a la confianza con la que trabajaría es mucho más importante que la disponibilidad tecnológica. La disponibilidad de un OBU en el vehículo, bien sea para navegación o tarificación, ocasionará un gran impacto y probablemente cambiará radicalmente las condiciones (incluyendo la actitud de los conductores) en el futuro. Para el transporte urbano, la tecnología con *smart card* está eliminando rápidamente las barreras tecnológicas para la implementación de *road pricing*.

El otro gran reto tecnológico para la tarificación interurbana lo constituye la interoperabilidad, donde los distintos países están utilizando diversas soluciones tecnológicas y dado el movimiento internacional de los camiones, es necesario que la interoperabilidad sea un objetivo fundamental, tal como se mencionó en el apartado 2.2.3, sobre la Directiva 2004/52/EC (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.

### **Barreras legales e institucionales**

Los problemas fundamentales de tipo institucional se presentan en la relación que establecen los diversos entes gubernamentales. La legislación tanto a nivel de la UE como en muchos países no está regulada para aplicar un precio igual al coste marginal social, lo cual constituye la principal barrera institucional. Tal es el caso de la actual *euroviñeta* (Directiva 1999/62/EC), que exige que las tasas cobradas a los camiones se relacionen con los costes de infraestructura y no con los costes externos. De la misma forma existen problemas de coordinación con otras políticas (fiscal, regional, social, uso del suelo, etc.) y sus alcances.



Las barreras de tipo legal e institucional relacionadas con la implementación de *road pricing* pueden relacionarse con los siguientes temas:

- Marco y soporte legislativo insuficiente a nivel político en la UE;
- Objetivos contradictorios y soporte legislativo insuficiente a nivel nacional;
- Insuficiente coordinación/cooperación e ineficaz estructura organizacional;
- Legislación y políticas contradictorias en otras áreas y sectores, y;
- Oposición entre grupos y personas a favor y en contra.

### Barreras de aceptabilidad

Esta barrera de aceptabilidad de los usuarios y de los políticos constituye el principal obstáculo para la aplicación del *road pricing* tanto en el transporte metropolitano como interurbano. Diversos estudios muestran que la aceptación pública para la adopción de este tipo de medidas tarifarias es muy baja. En el informe del proyecto MC-ICAM, se indica que las tarifas por estacionamiento y las tarifas por el uso de las carreteras (basadas en la distancia) son las menos aceptadas, mientras que medidas de mejoramiento del transporte público y restricciones por ingresar al centro de la ciudad son las que se eligen. La figura 2.14 ilustra medidas de aceptación pública para la gestión de la demanda.

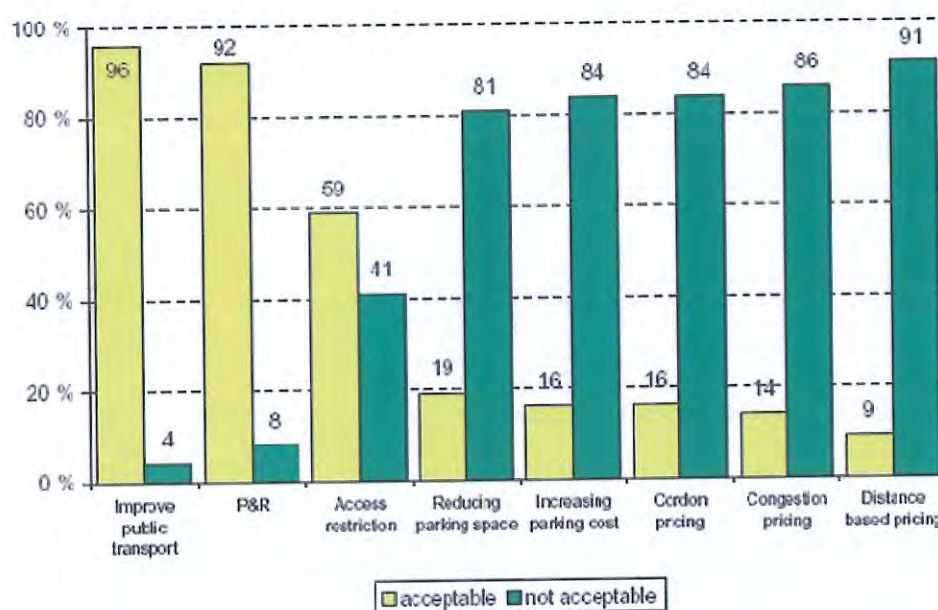


Fig. 2.14. Varias medidas de aceptación pública para la gestión de la demanda. (Fuente: Proyecto MC-ICAM, Marler et al. 2003).

La fuerte resistencia que el público impone para no aceptar la implementación se basa en los siguientes factores:

- *Problemas de percepción*: se refieren a reconocer que las dificultades relacionadas con el tráfico y sus posibles soluciones, les concierne. Algunas encuestas han mostrado que la concienciación se manifiesta cuando surgen los



problemas relacionados con la movilidad, sobre todo en regiones densamente pobladas. Por ejemplo, antes de implementar la tasa por congestión en Londres, la Fundación RAC del UK, indicaba que el 75% (encuesta hecha a 500 conductores en marzo de 2002) de los encuestados estaba de acuerdo con la imposición de dicha tasa. Otros estudios argumentan que habría aceptación de una tasa a la congestión, si ésta viene acompañada de un paquete de medidas, tales como disminución de impuestos, mejoramiento del transporte público, etc. La figura 2.15 ilustra dos puntos de vista para la fijación de una tarifa por congestión.

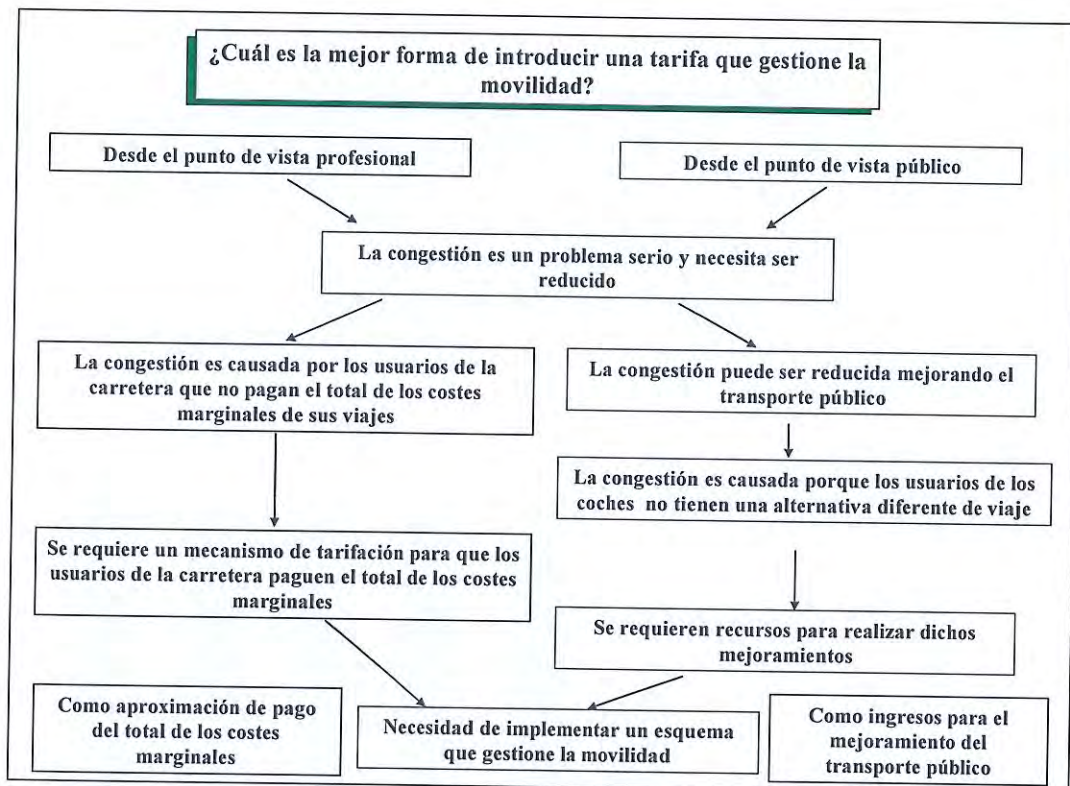


Fig. 2.15. Reconocimiento de la congestión como problema público. (Fuente: MacAulay y Cain, 2004).

- *Equidad*: la implantación del *road pricing* crea inequidades entre grupos de diferentes ingresos. La equidad como concepto económico se refiere a la distribución real de beneficios y costes dentro de la sociedad, por lo tanto, los impactos en dichos costes y beneficios puede diferir respecto a la posición social o económica, a la ubicación geográfica, al valor que se le dé al tiempo, etc. Ante la introducción de una tarifa, los usuarios tendrán que tomar decisiones que pueden modificar su comportamiento (cambiar de ruta para realizar el viaje, cambiar de modo o de índice de ocupación, cambiar el destino y la hora del viaje, cambiar la generación de viajes, cambiar el uso del suelo a medio o largo plazo, etc.) o no modificarlo (incrementando el porcentaje del presupuesto dedicado al transporte, conseguir que la empresa asuma el coste de la tarifa del trabajador, etc.).



La distribución de los ingresos que se produzcan del sistema tarifario, también afecta la equidad. Diversas investigaciones muestran que la asignación de estos ingresos juega un papel crucial para alcanzar la aceptabilidad, ya que las consideraciones de equidad pueden influenciar la distribución de los impactos en la dirección deseada.

- *Características del sistema:* las características del esquema de *road pricing* (método de tarifar, área tarifada y los tiempos de tarificación) tiene también un impacto en la aceptación del público. Sistemas de tarificación complejos (como por ejemplo, los basados en el tiempo de permanencia o en las demoras) no son aceptados, así como sistemas tarifarios demasiados complejos no se aceptan tan fácilmente como los conocidos. En la misma línea, las expectativas de ahorrar tiempo no mejora tanto la aceptabilidad, como sí la tiene, la disminución de los efectos ambientales.

**Tabla 2.7. Barreras para la implementación de costos marginales de tarificación en vías metropolitanas.** (Fuente: Proyecto MC-ICAM, Marler et al., 2003).

Tipo de barrera	Transporte en vías metropolitanas e interurbanas
Barreras tecnológicas y prácticas	1. La tecnología para la tarificación de peajes, aunque en principio existe, aún no ha sido evaluada ampliamente y es probable que se la considere bastante riesgosa para justificar una implementación a escala real en el corto plazo. 2. Los problemas de interoperabilidad en transporte en vías interurbanas (en el caso de camiones cuando cruzan las fronteras). 3. Estructura espacial compleja de la red vial metropolitana y definición de las características físicas de las áreas urbanas. 4. Disponibilidad del coste real, otros datos y transferencia de costes marginales.
Barreras legales e institucionales	5. Principio de subsidiariedad en transporte urbano. 6. Carencia de una estrategia Europea común o de un esquema para vías interurbanas. 7. Carencia de leyes Europeas para respaldar la imposición de una tarifa kilométrica a los camiones en las vías interurbanas. 8. Superioridad de políticas que son contrarias a la eficiencia económica y al principio de tarificación por costes marginales. 9. Falta de leyes nacionales que permitan o faciliten la tarificación de las carreteras basada en costes marginales como enfoque político general. 10. Deficiencia de leyes nacionales que posibiliten la diferenciación de precios (sobre los vehículos, el tiempo y espacio). 11. Carencia de coordinación/cooperación entre ciudades y comunidades vecinas. 12. Vínculo deficiente entre la toma de decisiones y los procesos para el transporte metropolitano y vías interurbanas. 13. Niveles de administración múltiple involucrados en la formulación e implementación de políticas de tarificación con responsabilidades y poderes incompletos o poco óptimos. 14. Oferta y operación de <i>parking</i> privados no residenciales y adjudicados o regulados sin el control directo del gobierno por los servicios públicos de transporte. 15. Asociaciones Público-Privadas (PPP) para financiar, producir y operar infraestructuras. 16. Legislación para evitar la tarificación directa por uso de la vía referente a la libertad de acceso y movimiento y ciertas libertades civiles y necesidades de privacidad. 17. Legislación contradictoria relacionada con el impuesto fiscal. 18. Oposición de grupos contrarios al gobierno y a los partidos políticos que lideran la implementación.
Barreras de aceptación	19. Baja aceptación pública. 20. Baja aceptación del sector comercial e industrial. 21. Baja aceptación política.

El sector industrial y comercial también tiene baja aceptabilidad a la implementación de *road pricing*, ya que se podrían presentar efectos (debido a las expectativas de costes-



beneficios) en las compañías que tienen una gran dependencia del transporte por carretera. Los problemas de aceptabilidad en este sector se incrementa en zonas urbanas, donde las zonas tarifadas pueden excluir a muchos clientes y donde los minoristas pueden ver disminuidas sus ventas. La tabla 2.7 resume los diferentes tipos de barreras y sus puntos a debatir.

Para la introducción de cualquier esquema de *road pricing* se debe contar con la decisión política, ya que dichas decisiones se respaldan en los intereses y opiniones de los diferentes grupos sociales, económicos y de los mismos políticos, cuyas relaciones son bastante complejas y dinámicas. En el caso de Londres, el alcalde Ken Livingstone en el año 2000, dentro de su programa político estaba la implantación de *congestion pricing*, el cual fue aceptado por la mayoría de votantes.

## 2.5 Tarificación según el servicio (*service pricing*)

La necesidad de establecer el peaje en autopistas como un pago por el servicio diferencial que ofrecen respecto a su alternativa libre de peaje es un concepto relativamente novedoso. De hecho, hasta el momento los peajes de carretera han sido analizados básicamente desde dos puntos de vista. Por un lado, se ha considerado su uso como una herramienta de financiación que permite la construcción de determinados tramos de la red de carreteras; o bien, como se ha visto en apartados anteriores, el peaje como mecanismo para la internalización de los costes externos y el control de la congestión en una red.

### 2.5.1 Definición

El pago del peaje como precio por un servicio “*service pricing*” es propuesto inicialmente por Robusté (2002), en el cual se indica que el concesionario debe considerarse como un operador de transporte que presta unos servicios de cierta calidad, en este caso diferenciada y superior a los que ofrecen otras vías alternativas gratuitas. Esta idea rompe con la actual situación que la sociedad tiene acerca de la visión del pago por circular en una carretera como mecanismo financiero, puesto que rutas de características similares situadas en lugares distintos pueden estar, o no, tarifadas. Consecuentemente, si los peajes se basan en el nivel de calidad que ofrece la vía en comparación con su alternativa libre de coste, la aceptación social crecerá.

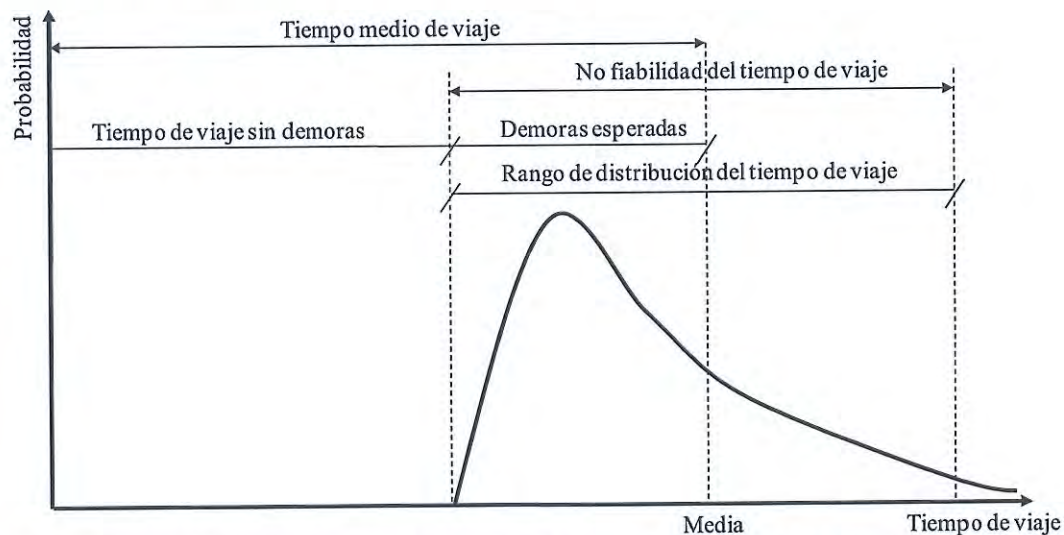
A partir de estos conceptos, se establece el objetivo principal de formular matemáticamente un peaje en función de la calidad ofrecida por la autopista que maximice el beneficio social obtenido por los usuarios de la vía de pago. Esta formulación no puede dejar de lado el hecho de que el peaje seguirá siendo un mecanismo de financiación. Por ello, a la vez que se intenta lograr la formulación óptima se deberá garantizar la obtención de un beneficio por parte de la empresa concesionaria, Saurí et al. (2008).



### 2.5.2 Indicadores de calidad

Dentro de los aspectos de la calidad de servicio en carreteras, Sánchez et al. (2006), evalúan el interés que tienen los diferentes agentes (usuarios, concesionarios y Administración) sobre estos aspectos y quién debería hacerse cargo de los posibles costes de su mejora. Además, plantean que el *estado de la infraestructura, la seguridad vial, el tiempo de viaje y su fiabilidad, y la gestión y operación de la infraestructura* son los indicadores adecuados para el diseño de un sistema de gestión de la calidad al servicio de las carreteras.

La fiabilidad en la duración del tiempo de viaje es uno de los factores más relevantes en una política de tarifación para gestionar la movilidad. De acuerdo con Warffemius et al. (2005), generalmente la confianza en la duración del tiempo de viaje no es incorporado en las valoraciones normales de un proyecto de infraestructura ni en las políticas de transporte de muchos países. Los valores de la fiabilidad en el tiempo de viaje y otros indicadores no son incorporados en los análisis de coste-beneficio. Pero en varios países (Reino Unido, Países bajos y Suecia) se ha investigado y encontrado que ignorar la variabilidad del tiempo de viaje en el análisis de beneficios de una autopista produce una subestimación entre 5-50% de tales beneficios.



Nota: En el rango de distribución del tiempo de viaje, está considerada la mayor desconfianza en la duración del tiempo de viaje.

**Fig. 2.16.** Distribución del tiempo de viaje. (Fuente: Warffemius et al. 2005).

En la guía alemana sobre análisis coste-beneficio para proyectos de infraestructura (llamada guías OEI-2000), los valores actuales del tiempo solamente están relacionados con el tiempo medio de viaje. El tiempo medio de viaje incluye un margen de seguridad para las demoras esperadas. Sin embargo, las demoras inesperadas son menos sistemáticas y conducen a una variación de los tiempos de viaje. Las demoras inesperadas son causadas por la congestión (demanda excede la capacidad) y otros factores tales como el mal tiempo, accidentes, interrupciones de tráfico (trabajos en la vía, eventos especiales, etc.). Se distinguen dos tipos demoras inesperadas: (i) la que se presenta día a día, la cual es variable y aleatoria y afecta el tiempo de viaje de los



trayectos que se hacen regularmente a la misma hora cada día. (ii) las demoras ocasionales producidas por incidentes. Por consiguiente, el conductor debe considerar además del tiempo medio del viaje su variabilidad, la cual puede cuantificarse como la desviación estándar de la distribución del tiempo de viaje, cómo se muestra en la figura 2.16. Si el conductor desea reducir el riesgo de llegar tarde a su destino, debería considerar algo más que el tiempo medio de viaje.

Los valores monetarios de la fiabilidad del tiempo de viaje se relacionan con la reducción de las demoras inesperadas. En el corto plazo es difícil que una reducción de las demoras se produzca, dados los grandes cambios que se requieren para la ampliación de la capacidad. Mientras que en el largo plazo hay muchas más opciones disponibles que pueden asegurar que una capacidad adecuada puede proveerse para mejorar la relación velocidad/flujo y de esta forma reducir el tiempo de viaje esperado y eliminar la ocurrencia de no fiabilidad.

Respecto a la fiabilidad, a lo que más se le presta atención es a llegar tarde. Las demoras inesperadas sobre los vehículos livianos generan unos costes debidos a: prolongados tiempos de espera, estrés entre viajeros, pérdidas de conexiones, pérdidas de compromisos, efectos negativos sobre la eficiencia en los negocios. Para disminuir la probabilidad de llegar tarde, las personas asignan un tiempo extra para el trayecto (tiempo de seguridad). En el transporte de mercancías las demoras inesperadas conducen a pérdidas de conexiones, grandes periodos de espera, pérdida de oportunidades de aplicar el “justo a tiempo” en la distribución, producción y administración de existencias.

En un futuro cercano, la valoración del beneficio no estaría enfocada solamente en las reducciones del tiempo de viaje, sino también en incrementar la fiabilidad del tiempo de viaje. Se espera que los beneficios de mejorar la fiabilidad sean de sustancial importancia en comparación a los beneficios de la reducción del tiempo de viaje. Por ello es importante encontrar los valores monetarios de la fiabilidad del tiempo de viaje para que puedan usarse en los análisis de coste-beneficio en los proyectos de transporte.

Existen varios enfoques para medir el valor de la fiabilidad ( $VdF$ ) de los vehículos ligeros. Warffemius et al. (2005), indica que: (i) los valores monetarios para el mejoramiento de la fiabilidad en el tiempo de viaje están relacionados con la disminución de la variabilidad del tiempo de viaje y las reducciones de las demoras inesperadas, (ii) el  $VdF$  es expresado como el valor de un minuto de la desviación estándar de la distribución del tiempo de viaje, y (iii) el ratio de fiabilidad se puede expresar como:

$$RF = \frac{VdF}{VdT} \quad (2.8)$$

Donde:  $VdF$  es el valor de un minuto de la desviación estándar,  $VdT$  es el valor de un minuto del tiempo medio de viaje y  $RF$  es el ratio de fiabilidad.



Dependiendo del tipo de viaje en vehículo ligero, se encuentra que el ratio de fiabilidad es 0,8 para *commuters*, entre 1,6 y 2,4 para negocios y para otros tipos de viajes entre 0,4 y 0,6.

Dentro de las medidas encontradas para mejorar la fiabilidad del tiempo de viaje se encuentra la implantación de un esquema de *road pricing* bien sea en una infraestructura específica o en una red de carreteras. Empleando la tarificación se ofrece un “eficiente” nivel de fiabilidad el cual será normalmente un tanto inferior al 100% (puesto que los costes que implica eliminar las fuentes de demoras inesperadas pueden exceder los beneficios de una mayor fiabilidad). Por un lado, los operadores de la infraestructura informarían a los usuarios de los costes de ofrecer una fiabilidad determinada, mientras que por el lado de los usuarios (demanda) se manifestaría qué tanto valoran esa fiabilidad y en consecuencia se estructuraría el uso de la red.

Para alcanzar este “eficiente” nivel de fiabilidad, la tarificación sería la mediadora entre el coste de proveer servicios fiables y la demanda para estos servicios – permitiendo a los usuarios compensar la tarifa pagada por la fiabilidad.

## 2.6 Esquemas tarifarios para gestionar una red de carreteras

Se plantea un esquema de *road pricing* en una red cuando el principal objetivo es la modificación de la matriz de viajes en las diversas autopistas que la conforman. La configuración real de la red sería sensible a la implantación de dicha estrategia tarifaria.

Dependiendo del objetivo que busque la estrategia de tarificación (maximizar el bienestar social neto, mejorar la equidad, minimizar el tiempo total de viaje, maximizar ingresos, etc.) se determina cuál es el esquema tarifario que encaja dentro de las restricciones reales de la red y sujeto a una asignación dinámica del tráfico para determinar la tarifa óptima en la totalidad o parte del conjunto de arcos de la red.

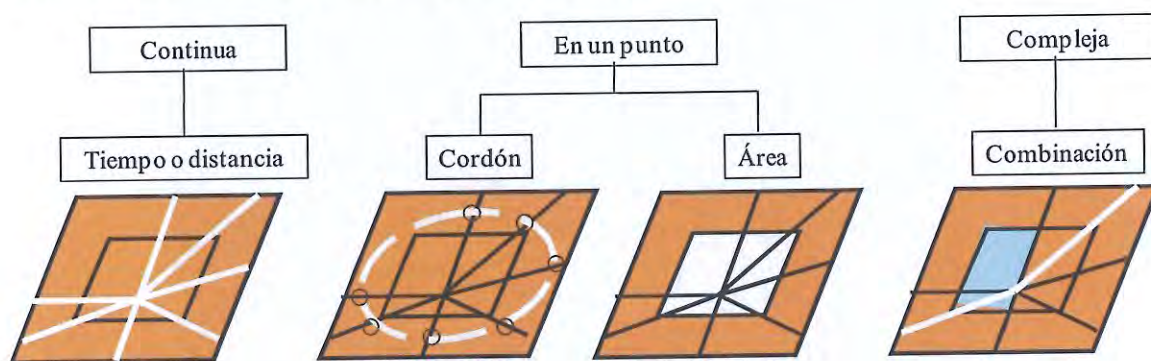


Fig. 2.17. Opciones topológicas para tarifar una red de carreteras.

Dados los altos costes económicos debidos a la congestión en las principales ciudades del mundo y sus entornos metropolitanos, la implantación de un esquema de *road pricing* para gestionar la movilidad y reducir así este fenómeno, presenta una tendencia creciente, en la que se establecen una serie de factores, los cuales se evalúan para configurar un esquema tarifario en una red de carreteras, como las entradas y salidas de



los accesos, la delimitación del área de influencia del esquema, la ubicación de los puntos de cobro y su distribución en la red, topología existente, desarrollos futuros de la red y por supuesto, los objetivos que busque dicha estructura tarifaria. La figura 2.17 ilustra las configuraciones tarifarias que más se utilizan para una red de carreteras.

### 2.6.1 Tarifación en un punto

Este tipo de tarifación es fácil de explicar al público y relativamente sencilla su implantación empleando tecnología ETC (*Electronic Toll Collection*), porque el mecanismo de tarifación es requerido para operar en un punto solamente. Estos puntos de cobro pueden estar aislados o agrupados (formando un cordón o anillo) alrededor de áreas definidas.

#### Cordón

El esquema tipo cordón consiste en cobrar una tarifa plana a un vehículo por ingresar o abandonar una determinada zona de la ciudad durante algunas o todas las horas del día. La tarifa se fija en diversos puntos de la red y no depende del tiempo que permanezca o la distancia que recorra dentro del área o de los niveles de congestión que prevalezcan. La configuración del esquema tarifario tipo *cordón* como la hecha en Estocolmo 2006, Londres 2003, Trondheim 1991, Oslo 1990, Bergen 1986, etc., se aplica cuando el objetivo principal es gestionar el tráfico que entra o sale (en caso de cordones bidireccionales) de la zona limitada por el cordón.



*Fig. 2.18. Diseño inicial del esquema de tarifación para Londres. (Fuente: May et al., 2002).*

A raíz de los estudios hechos para Londres, se conoce que un solo cordón intercepta pocos viajes y excluye a viajeros que contribuyen con la congestión e impone la misma tarifa a todos los trayectos que lo cruzan, restringiendo los trayectos cortos y subvalorando los largos, además, permite que muchos viajeros escapen de la tarifa



reubicándose alrededor del cordón. En el caso de Londres, la peor congestión se localizaba fuera del área central y el impacto de un solo cordón alivió la congestión sobre los trayectos radiales, pero se agravó a través de la desviación del tráfico hacia las orbitales. La figura 2.18 muestra el diseño inicial para el esquema de tarifación en Londres que incluía tres cordones y arcos de enlace entre ellos para controlar los movimientos orbitales.

La localización de sensores al lado de la carretera posibilita delimitar la frontera del área tarifada y definir el cordón. La ubicación de la frontera del cordón puede basarse en dos consideraciones: primero, la identificación del área más congestionada de la ciudad y segundo, del tipo de cordón tal que no permita caminos alternativos, ya que si quedan rutas alternas disponibles para los conductores, la congestión se traslada hacia dichas carreteras y el problema no se resuelve. Es necesario contar con el respaldo de las autoridades locales para definir tanto las carreteras que van a quedar en el interior como en el exterior del cordón.

Los cordones bidireccionales buscan solucionar lo que ocasionan algunos *commuters* que viajan durante las horas pico desde la zona interior del cordón hacia la zona exterior causando congestión, y cruzan la frontera del anillo durante los periodos no congestionados de tal forma que realmente no pagan el problema que ocasionan. Se resalta que generalmente, las carreteras que están dentro del cordón se congestionan durante las horas de la mañana y en la noche se congestionan las carreteras que están fuera del anillo, Santos et al. (2001). El diseño de doble cordón (un cordón exterior unido a un cordón interior alrededor del CBD de la ciudad) permite incrementar el bienestar social mucho más que un cordón simple, Santos (2002).

**Tabla 2.8.** Criterios para el diseño de cordones tarifarios. (Fuente: May et al. 2002).

**Evitar impactos adversos**

- El diseño debe asegurar la provisión de suficientes rutas alternativas para los conductores que deseen evitar el área tarifada;
- El diseño debe evitar la dispersión de los problemas de congestión y medioambiente a otras áreas;
- El diseño debe permitir las facilidades de intercambio fuera del cordón (ejemplo: *parking ride* o zonas de parking);
- El diseño debe asegurar que todos los puntos de entrada al área tarifada estén trabajando igual, tarifando o sin tarifár;
- La frontera del cordón debe estar asociada con la zona de control del parking para evitar la dispersión de la demanda de parking alrededor de la periferia del cordón.

**Aceptación del público**

- La estructura del cordón debe ser simple y fácil de entender;
- La estructura tarifaria debe ser simple y fácil de entender;
- La tarifa debe ser aceptable para el público;
- La tarifa debe ser percibida como justa por el público.

**Ser práctico**

- El número de puntos de cobro debe ser minimizado para reducir los costos de capital;
- El cordón debe estar localizado totalmente dentro del área de la ciudad.



Aunque en muchos estudios de *road pricing* se ha propuesto y puesto en práctica el uso del cordón para tarifar determinada área del centro de la ciudad, pocos han especificado las bases para el diseño de los mismos. May et al. (2002), identifican un número determinado de criterios para el diseño del cordón, los cuales se agrupan bajo tres consideraciones: evitar los impactos adversos, la aceptación del público y su puesta en práctica. A través de encuestas realizadas a responsables de la planificación del transporte en 6 ciudades del Reino Unido, se estructura la propuesta del esquema, sus objetivos y el proceso detallado para el diseño del cordón. La tabla 2.8 enumera los resultados de la encuesta con los criterios de diseño y a partir de los mismos se han elaborado modelos matemáticos para establecer comparaciones.

Los métodos para especificar las tarifas óptimas en todos los arcos de la red de carreteras se elaboraron a partir del mejor óptimo “*first-best*”, sin embargo, los que aprueban el cobro en un número limitado de puntos, por ejemplo, los puntos donde se cruza el cordón, están menos desarrollados.

El problema del diseño óptimo de cordones implica escoger la ubicación de los puntos de cobro y la cantidad óptima a pagar que maximice el bienestar social, definido como el beneficio total menos el coste total. Al usar la función de la demanda Marshalliana para medir los beneficios, la función de bienestar social total  $B_{S_T}$  (o excedente social) se puede definir como:

$$B_{S_T}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\tau}) = \sum_i \int_0^{N_i} D_i(x) dx - \sum_j \sum_p \delta_{jp} F_p c_j \quad (2.9)$$

El primer y segundo términos son el beneficio del consumidor y el coste del consumidor, respectivamente. Donde,  $\mathbf{F}$  es el vector de trayectoria de flujos,  $\boldsymbol{\tau}$  es el vector de arcos tarifados,  $D_i$  es la función inversa de la demanda,  $N_i$  es la demanda de viajes entre un par  $i$  de origen y destino (O-D) con  $N_i \geq 0$ ,  $F_p$  es la trayectoria del flujo en el camino  $p$ ,  $c_j$  es el coste del viaje sobre el arco  $j$  (excluyendo la tarifa), y  $\delta_{jp}$  es la variable binaria auxiliar de lógica que toma el valor de 1 si el arco  $j$  se encuentra en el camino  $p$  y 0 en caso contrario. Este objetivo de maximización constituye un problema de optimización bi-nivel, donde el regulador maximiza una finalidad, dado que los usuarios de las carreteras maximizan su propio objetivo. Al implementarse la tarifa, los usuarios responden a ella bien sea cambiando su ruta o decidiendo no viajar. Esta respuesta se estima asumiendo que los usuarios se comportan de acuerdo con el concepto de equilibrio de Wardrop<sup>2</sup>, el cual se incluye en el programa de optimización como una restricción que impone una especial estructura y complejidad sobre el problema.

<sup>2</sup> Wardrop (1952), introdujo el concepto de equilibrio para la selección de itinerarios utilizando el postulado de comportamiento alternativo de minimización de los costes totales, en forma de dos principios: 1. “Los tiempos de viaje de todas las rutas realmente utilizadas son iguales y menores que los que experimentaría un vehículo en cualquiera de las rutas no utilizadas”. 2. “El tiempo medio de desplazamiento es mínimo”.



Existen varios enfoques para solucionar el problema de maximización del bienestar social que se indica en la ecuación 2.9. Verhoef (2002), presenta un algoritmo heurístico para encontrar a través de un análisis de “*second-best*” el valor de la tarifa óptima y la ubicación eficiente de los puntos de tarifación para una red general estática y así identificar cuáles arcos deben ser tarifados. La solución presentada es válida para cualquier grafo de la red y para cualquier sistema de puntos de tarifación en la red. La tarifa por congestión que da el análisis de “*first-best*” con peajes en todos los arcos es un caso general de este problema de “*second-best*”.

También se puede solucionar empleando la teoría de juegos no cooperativos con equilibrio de Stackelberg, en el que el regulador es el líder y todos los usuarios son los seguidores. La formulación matemática de los juegos de Stackelberg se denomina Programas Matemáticos con Restricciones de Equilibrio (MPEC- *Mathematical Program with Equilibrium Constraints*). Entre los trabajos que aplican MPEC para resolver este problema de optimización del cordón, se encuentran el de Hearn y Ramana (1998), quienes determinan el número mínimo de arcos con peaje para alcanzar el óptimo del sistema, Zhang y Yang (2004), proponen un algoritmo genético binario para resolver simultáneamente la tarifa y ubicación del cordón en las redes y Sumalee (2004), propone un algoritmo genético a través de un esquema de optimización heurístico “*branch-tree*” para diseñar el cordón.

Otras formas de solucionar el diseño óptimo de ubicación del cordón y su respectiva tarifa son las que proponen Ho et al. (2005), mediante la aplicación de un modelo de tráfico en un sistema en equilibrio continuo para la tarifación de la congestión usando el cálculo de variaciones y métodos de elementos finitos. También, Mun et al. (2003), presentan un modelo espacial simple de congestión de tráfico para una ciudad mono-céntrica e investigan los efectos de la tarifación al usar el cordón en la generación de viajes y el nivel de congestión en cada ubicación, asimismo plantean la maximización del bienestar social utilizando condiciones de *second best* a través de la expresión 2.10, para determinar la ubicación de los puntos de cobro y la tarifa óptima a pagar.

$$B_S = \int_0^{x_m} \left[ \int_0^{q_e(x)} p(q) dq - C(x)q_e(x) \right] dx + \int_{x_m}^B \left[ \int_0^{q_s(x)} p(q) dq - C(x)q_s(x) \right] dx \quad (2.10)$$

Donde:  $x_m$  representa la distancia desde el *Central Business District* (CBD) hasta el cordón,  $q_e(x)$  y  $q_s(x)$  son el número de viajes que ingresan y salen de la zona tarifada, respectivamente,  $p(q)$  es la función de la demanda,  $C(x)$  es el coste generalizado de un viaje por unidad de distancia y  $B$  es la frontera de la zona urbana.

Para solucionar el problema de optimización de la expresión 2.9 se han empleado los algoritmos genéticos (AG). La idea básica de los AG es codificar las variables de decisión del problema como un cordón finito, llamado “cromosoma” y calcular el bienestar neto (función objetivo) de cada cordón. Los cromosomas con un alto nivel de bienestar tienen una alta probabilidad de sobrevivir. El cromosoma superviviente luego se reproduce y forma los cromosomas de la próxima generación a través de los procesos de “cruce” y “mutación”. Tanto para la tarifa y ubicación óptima de los puntos de cobro como, para los problemas del diseño del cordón, los cromosomas de los AG representan



una combinación de posibles niveles de tarifa, combinación de arcos a tarifar, combinación de puntos a tarifar para determinado cordón respectivamente, May et al. (2004).

Para emplear los AG, se han desarrollado diversos tipos de software (GA-CHARGE, GA-LOCATE, GA-AS) y así poder solucionar los criterios de diseño de los cordones. GA-CHARGE resuelve el problema de la tarifa óptima generando aleatoriamente un conjunto de cromosomas que representan las posibles combinaciones de tarifas sobre un conjunto de arcos predefinidos, donde la tarifa correspondiente a cada enlace se representa por un número binario (siguiendo el enfoque tradicional de los AG). De este modo, un cromosoma que representa los niveles de las tarifas para un conjunto dado de puntos de pago es una matriz binaria. Empleando la teoría de grafos se constituyen los arcos a tarifar y los nodos representan los puntos de cobro, formándose una matriz como la que se muestra en la figura 2.19, en donde el número binario en cada columna constituye el nivel de tarifa para cada punto de cobro el cual se muestra en la fila base,  $t$  (columnas) es el número predefinido de arcos tarifados y las  $k$  (filas) determinan el número de dígitos requerido para representar el máximo peaje en formato binario.

Los beneficios en términos del mejoramiento de bienestar social se evalúan para cada nivel de tarifa al correr SATURN. Seguidamente, GA-CHARGE selecciona el cromosoma padre para la próxima generación basado en el desempeño de cada cromosoma. Los operadores genéticos, el “cruce” y la “mutación”, son aleatoriamente aplicados a los padres para producir la cría.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{k \times t}$$

13 14 12 11

Fig. 2.19. Estructura del cromosoma para el software GA-CHARGE. (Fuente: May et al., 2004).

GA-LOCATE utiliza índices de ubicación (dichos índices se obtienen haciendo un análisis de *second-best*), como sugiere Verhoeff (2002) basados en predicciones de ganancia de bienestar al colocar las tarifas óptimas en puntos particulares de cobro, para cada cromosoma se asigna un indicador de bienestar. En esta aplicación cada cromosoma representa el número de puntos de cobro requerido, y el número en cada *bit* identifica el arco a ser tarifado. La lista de arcos candidatos a tarifar tiene que ser preparada por adelantado asignando un número a cada uno.

El algoritmo GA-AS, desarrollado por Sumalee (2004), permite encontrar: (i) la ubicación óptima heurística de un cordón cerrado, (ii) su correspondiente tarifa óptima uniforme y (iii) el número óptimo de puntos de cobro. Donde, el cordón cerrado en el contexto de la teoría de grafos, indica que todas las trayectorias desde todas las zonas externas al cordón que se conectan a los nodos internos deben ser tarifadas al menos, una vez sobre el arco que relaciona dicha trayectoria. En otras palabras, se tarifican a todos los usuarios del coche que conducen dentro o que pasan al área designada.



## Tarifación en un área

En el *Area licensing* (permiso de área) se cobra una tarifa por usar la red de carreteras dentro del área tarifada y dentro del periodo de asignación de la tarifa. Con esta estructura todos los vehículos que están dentro de la zona se tarifican en el momento en que inicia el periodo de cobro, al igual que los vehículos que quieran ingresar al área. La desventaja del *area licensing* es que el pago no depende de la cantidad de viaje (tiempo o distancia) que realice dentro del área. Este tipo de estructura se puede aplicar para todos los vehículos que usen la red de carreteras bien sea que (a) estén en movimiento o parquados, o (b) solamente para los que estén en movimiento.

El precio del viaje dentro del periodo de tiempo tarifado puede variar según la hora del día en que se realice, ya que las tarifas varían si el viaje se hace en periodos punta o en periodos valle. Singapur en 1975, fue la primera ciudad en poner en práctica la aplicación de esta tipología tarifaria.

Las críticas que se le hacen a este tipo de estructuras tarifarias es que: (i) son inflexibles, ya que la tarifa se fija en los puntos tarifados y no puede ser fácilmente relocalizados si las condiciones cambian; (ii) son inequitativos, porque imponen la misma tarifa tanto a los viajes largos como a los cortos y (iii) pueden ser perjudiciales, ya que contribuyen a la formación de congestión en las rutas frontera inmediatamente fuera del cordón, May y Milne (2000).

### 2.6.2 Tarifación continua

Como respuesta a las anteriores críticas se han desarrollado otros sistemas de *road pricing* aplicando una tarifación continua sobre un área y una red definida. Este tipo de esquemas tienen en cuenta la distancia recorrida, el tiempo de viaje y el tiempo que gasta en congestión.

### Tarifación basada en la distancia recorrida

Con este sistema de tarifación continuo definido en un área determinada, se busca que cada vehículo pague una tarifa según el número de kilómetros recorridos. Este esquema desanima al tráfico de paso a usar el área tarifada y estimula a la demanda que se origina en la zona de tarifación a usar las vías orbitales de mayor longitud pero sin tarifas. Si las tarifas son muy altas y las rutas orbitales no son atrayentes, la congestión aumenta en las distancias cortas, Salas y Robusté (2007), Salas et al. (2008).

Para la implantación de este tipo de esquema tarifario en Cambridge, Smith et al. (1994), adicionan una penalización en peniques por kilómetro recorrido al coste generalizado por atravesar cada carretera dentro de la ciudad en los procesos de simulación con los programas SATURN<sup>3</sup> y CONTRAM (*Continuous Traffic*

---

<sup>3</sup> El programa SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks*), creado en el Instituto de Estudios de Transporte de la Universidad de Leeds por Dirck Van Vliet en 1982, predice la ruta escogida y el flujo de tráfico en una red de carreteras basado en el coste generalizado del viaje, teniendo en cuenta las demoras debido a las restricciones de capacidad, Santos et al., (2001).



*Assignment Model*). El desempeño de este esquema se mejora si se considera que la demanda es elástica. May y Milne (2000), también aplicaron este esquema para esta misma ciudad.

O'Mahony et al. (2000), indican que dentro del proyecto EUROPRICE la función de costes ensayada en Atenas con este tipo de esquema tarifario obedece a un régimen de "zanahoria y garrote". Cada viaje tiene una tarifa inicial y se aplica en el periodo horario entre las 7:00 am y 11:00 am. La tarifa kilométrica se incrementa por cada día consecutivo de uso del vehículo y decrece por cada día que no se use, lo que implica que el coste del viaje depende de la historia reciente de los viajes del vehículo.

$$\tau = \tau_i + (\tau_u + nP)x \quad (2.11)$$

Donde:  $\tau$  es la tarifa a cobrar,  $\tau_i$  la tarifa inicial,  $\tau_u$  la tarifa unitaria por kilómetro,  $n$  el número de veces que se imputa la penalización,  $P$  la tarifa de penalización (se aplica por cada día adicional que se use el vehículo, es decir, si se usa el coche dos días consecutivos para el tercer día de uso se asignará una penalización de  $2P$ . Si el vehículo no se usa por un día, se recupera una unidad de penalización),  $x$  indican los kilómetros recorridos.

Para la aplicación de este esquema, cada vehículo debe tener instalado un OBU, tal que en cada viaje almacene la siguiente información: hora y fecha de inicio del viaje, duración, distancia recorrida, cálculo del coste y el número de paradas durante el viaje. Cada viaje se almacena en orden cronológico para que luego dichos datos sean vistos y analizados por el investigador. Los valores de cada uno de los parámetros se programan con el software Tier II.

La desventaja de este tipo de estructuras tarifarias es que fomenta los viajes cortos y obliga a que se aplique un peaje cerrado en toda la red.

### **Tarificación basada en el tiempo de viaje**

Con este esquema cada vehículo se tarifa de forma proporcional al tiempo que gasta viajando dentro de la red de carreteras a tarifar, independientemente si el tiempo se invierte en demoras o circulando a velocidad libre. Bajo este sistema los conductores se animan a escoger las rutas que minimicen su propio tiempo de viaje, esto tiene la desventaja que al presentarse dos trayectorias con el mismo tiempo de travesía, de las cuales una está más congestionada que la otra (en promedio), las dos se tarifican de la misma manera, así que el sistema se aparta significativamente de la tarificación según el coste marginal.

Al igual que la estructura anterior, Smith et al. (1994), lo modelan para Cambridge y añaden una penalización en peniques por minuto de tiempo de viaje al coste generalizado por cruzar cada carretera dentro de la ciudad. Este sistema produce alguna ganancia en el tiempo de viaje total, la demora total y la distancia total del viaje cuando



la demanda es inelástica, sin embargo, es mucho más efectivo cuando la demanda es elástica.

$$g = \tau_u x + v_t t \quad (2.12)$$

O'Mahony et al. (2000), indican que dentro del proyecto EUROPRICE la función de costes propuesta para Dublín involucra tanto el tiempo como la distancia del viaje, a través de la ecuación 2.12, donde:  $g$  es el coste generalizado,  $\tau_u$  tarifa unitaria por kilómetro,  $x$  indican los kilómetros recorridos,  $v_t$  el valor del tiempo y  $t$  el tiempo de viaje.

### Tarifación basada en las demoras o el tiempo que se gasta en congestión

Al implantar una tarifa basada en la congestión o en demoras, cada vehículo se tarifa de acuerdo con la estimación del componente del tiempo de viaje, es decir, según las demoras por colas en los arcos en determinada hora del día. Este sistema es lo más cercano posible a una verdadera medición de la congestión. Para alcanzar un nivel determinado de reducción de viajes o veh-km se requiere imponer tarifas altas, puesto que es relativamente fácil desviarse para evitarlas. Esta tipología de tarifación ha sido analizada por May y Milne (2000) y Smith et al. (1994), para la ciudad de Cambridge.

Este sistema resultó el más eficiente en términos de aumento de la velocidad ya que reduce la congestión sustancialmente con bajas tarifas, dado que estas se aproximan al coste marginal. Los resultados que produce son excelentes tanto con demanda inelástica, como con demanda elástica.

Estos dos últimos esquemas tienen el inconveniente del coste en tecnología y su relativa complejidad para ser aceptado por los usuarios, porque aunque matemáticamente las soluciones pueden estar bien aplicadas, en la realidad, es difícil implantar un sistema que pueda medir la demora de cada vehículo y aplicar una tarifa acorde a las demoras que éste causa localmente en cada arco. La incertidumbre para los usuarios acerca de las demoras que están causando al resto de viajeros y de lo que tendrán que pagar, produciría un comportamiento muy diferente al de este modelo. Además, los conductores estarán menos dispuestos a modificar o a reducir su viaje debido a que las tarifas son variables e impredecibles.

Para cada uno de estos esquemas tarifarios May y Milne (2000) y Smith et al. (1994), utilizaron una elasticidad constante de -0,5 con respecto al coste generalizado para la demanda elástica. Posteriormente, May y Milne (2004a), para los mismos esquemas tarifarios introdujeron dos parámetros para modelar y simular las redes de Leeds, York y Cambridge. Inicialmente, emplearon una relación entre la demanda exponencial elástica acerca de los cambios en los costes, es decir, que el impacto de las tarifas varió el movimiento entre los orígenes y destinos con respecto al cambio proporcional en el coste generalizado y posteriormente determinaron un factor "valor de tarifa" para cada sistema tarifario (cordón 0,85; distancia 0,85; tiempo 0,46 y demoras 0,30), el cual representa el comportamiento de una unidad de tarifa dada comparada con otros elementos del coste generalizado.



La función elástica exponencial en SATURN, adquiere la forma de la ecuación 2.13, en la que es más consistente para entender cómo las tarifas afectan a los usuarios en su escogencia del viaje, mucho más que una elasticidad constante.

$$q_{ij} = q_{ij}^0 e^{-\beta \left( \frac{g_{ij}^1 - g_{ij}^0}{g_{ij}^0} \right)} \quad (2.13)$$

Donde:  $q_{ij}$  es la demanda después de aplicar el esquema de tarifación,  $g_{ij}^1$  es el coste generalizado del viaje después de aplicar la tarifa del nuevo esquema,  $q_{ij}^0$  y  $g_{ij}^0$  demanda y coste generalizado del viaje, respectivamente, antes de aplicar el esquema tarifario, y  $\beta$  es el coeficiente de sensibilidad de la demanda,  $ij$  es el par origen-destino dentro de la red.

De acuerdo con May y Milne (2004a), los resultados de las simulaciones para las redes de Leeds, York y Cambridge indican que el esquema cordón impone tarifas relativamente altas en puntos discretos de la red. Dicho esquema fue el menos efectivo (para el diseño particular adoptando 3 cordones y 6 enlaces entre cordones) para reducir el número de viajes, distancia y tiempo de viaje, y el coste generalizado comparado con los otros esquemas. Lo más probable es que las discontinuidades en la tarifación que producen los cordones y su inducida desviación de los trayectos sean la causa para que sean los menos efectivos.

El esquema por demoras necesita imponer tarifas altas para alcanzar un nivel dado de reducción de viajes, puesto que es relativamente fácil desviarse para evitarlas. Los conductores estarán menos dispuestos a modificar o a reducir su viaje en respuesta a la tarifación por tiempo y por demoras ya que las tarifas son variables e impredecibles.

El esquema basado en la distancia es el más efectivo para reducir los tiempos y la distancia de viaje (lo que conlleva a una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>) dentro del área tarifada, así como el total del coste generalizado. Sin embargo, tiene los impactos más extremos en la reorganización de los trayectos, y esto requiere un cuidado especial en el momento de seleccionar los límites de la zona tarifada.

Los esquemas basados en el tiempo y las demoras tienen un impacto tenue en la desviación y generación de viajes, pero alientan a los conductores a tomar riesgos para reducir su tiempo de viaje y a conducir con menos seguridad. Por este motivo son los más rechazados, pero si estos fueran los seleccionados, el más efectivo es el basado en el tiempo con respecto al relacionado con las demoras.

### 2.6.3 Tarifación mixta

Cuando existe una combinación de los esquemas tarifarios anteriores, la nueva estructura tarifaria recibe el nombre de configuración compleja. Este tipo de configuraciones aún no han sido explotadas y se encuentran en fase de estudio sobre todo en ambientes metropolitanos para alcanzar una visión global que se ajuste con las

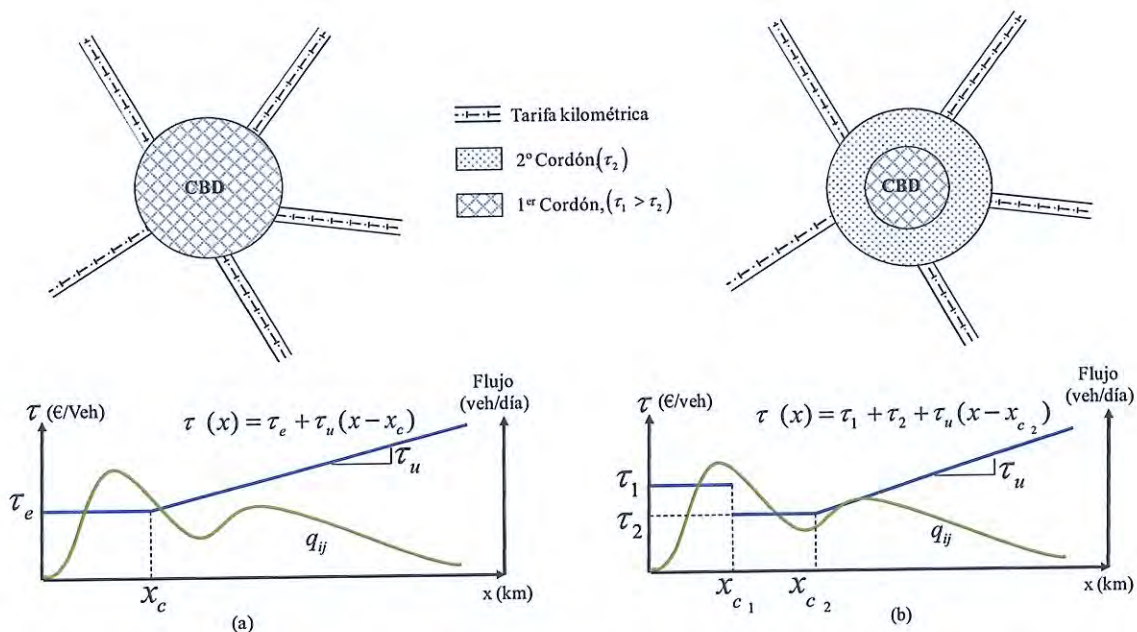


actuales dinámicas de crecimiento urbanas, Salas y Robusté (2006). Según la topología de la red se pueden proponer estructuras de tarificación como las que se muestran en la figura 2.20 que provienen de la combinación de los esquemas tipo cordón y kilométrica de tal forma que se compensen las debilidades que presenta el cordón con las fortalezas del kilométrico y viceversa, Salas et al. (2008).

La tarificación tipo *complex* se puede establecer de maneras diversas: Por ejemplo (i) estableciendo una estructura cóncava cuya tarifa unitaria varíe en función de la distancia para favorecer a los *commuters* que recorren grandes distancias, (ii) cobrar una tarifa plana por acceder a una zona que está limitada con un cordón o un área de la ciudad generalmente el *Central Business District* –CBD y una tarifa de tipo kilométrica fuera del cordón por uso de la autopista. Para la aplicación de esta estructura tarifaria se requiere diferenciar precios según los sentidos de los flujos de circulación (centro y periferia) y según las distancias de recorrido.

Este tipo de modelos presentan las siguientes ventajas:

- Es escalable a posibles extensiones de la red.
- Es simple y similar al modelo de “tarifa plana”.
- Se adapta fácilmente a los patrones de movilidad inicial.
- Es fácil de entender para los usuarios.
- Reduce la generación de viajes cortos en la zona del cordón.
- Extiende el área de influencia de la tarificación que busque gestionar movilidad.
- El precio a pagar depende de la distancia recorrida fuera del cordón.
- Controla el tráfico tanto dentro de la zona centro ciudad, como en su parte exterior.



**Fig. 2.20.** Estructuras tarifarias combinadas (a) cordón simple en área urbana y kilométrica en la zona exterior, (b) de doble cordón en área urbana y kilométrica en la zona exterior.



El inconveniente que presentan es que dependen de la configuración topológica de la red, lo cual puede desequilibrar algunos tramos y generar congestión en algunos sectores.

## 2.7 Criterios de diseño de esquemas tarifarios para gestionar la movilidad

El objetivo fundamental de cualquier estrategia tarifaria es obtener un sistema de gestión del tráfico y optimizar la tarifa de modo que los usuarios se vean incentivados a utilizar mucho más el transporte público o reducir el uso del vehículo privado sobre todo en el centro de negocios de las ciudades o en sus zonas históricas. Sin embargo, la brecha entre la teoría de *road pricing* y su aplicación en el mundo real es bastante amplia debido a las barreras de aceptación pública y política, posibilidad técnica y sus altos costes de implantación que conciernen con este tipo de medidas.

Al hacer una revisión de los sistemas tarifarios para la gestión del tráfico se encuentra que, en el *Smeed Report (Ministry of Transport, 1964)*, identificaron nueve criterios para diseñarlos, los cuales ayudarían a determinar si la estructura tarifaria proyectada es viable y eficaz. Dichos criterios que aún hoy permanecen vigentes, indican que:

- Las tarifas deben estar relacionadas según el uso que se haga en la carretera.
- De ser posible, las tarifas deben variar según el área, hora del día, semana, año y tipo de vehículo.
- Las tarifas deben ser estables y conocidas con anterioridad por los usuarios antes de realizar el trayecto.
- Los pagos por adelantado deberán ser posibles, junto con las facilidades de crédito.
- La incidencia del sistema sobre los usuarios particulares de las carreteras debe considerarse como justo.
- El método de tarifación debe ser fácil de entender para los usuarios.
- Cualquier equipo a emplear debe poseer un alto grado de confiabilidad.
- La tecnología debe ser razonablemente libre de posibles fraudes o evasión; tanto deliberado como no.
- Esta tarifación debe aplicarse, si es necesario a todo un país y a un parque automotor que supere los 30 millones.

A raíz de la puesta en práctica de este tipo de soluciones para la administración de la demanda, han surgido otros criterios de diseño que apuntan a la eficiencia y el logro de la operación, como por ejemplo que:

- El sistema debe permitir que tanto visitantes como usuarios ocasionales sean equipados rápidamente y a bajo coste;
- El equipo que grabe el recorrido detallado del viaje debe diseñarse para proteger la privacidad de los usuarios y permitir verificar el equilibrio entre el recorrido hecho y el precio a cobrar y;
- El sistema debe facilitar la integración con otras tecnologías (interoperabilidad) y particularmente asociado con el sistema de información del conductor.



La mayoría de estos criterios de diseño contemplan tres factores esenciales que cualquier estrategia tarifaria debe tener para gestionar la movilidad en carreteras en entornos metropolitanos, los cuales son:

- Evitar impactos adversos;
- Aceptación pública del sistema;
- Implantación práctica.

### 2.7.1 Evitar impactos adversos

Adaptando lo propuesto por Sumalee (2001) para el diseño de cordones, se tiene que para evitar impactos adversos en la aplicación de un esquema tarifario, se debe tener en cuenta los siguientes criterios de diseño:

*El diseño debe evitar impactos en la economía y en el uso del suelo*

Resulta extremadamente difícil aislar los efectos que este tipo de medidas conlleva sobre la economía y uso del suelo, sin embargo, se sugiere que para disminuir su impacto se tenga en cuenta:

- Localizar la frontera tarifaria entre diferentes usos del suelo: En la práctica esto resulta apropiado si existen fronteras geográficas como ríos, canales, vías férreas, montañas, anillos viales o rondas, etc. que se pueden establecer como límites del esquema tarifario.
- Intentar minimizar la interrupción de los viajes básicos que se hacen entre las áreas residenciales, por ejemplo, los viajes a la escuela, al hospital o cualquier servicio público. Esto significa que es mejor tarifar los viajes de negocios que los viajes residenciales. Si se hace lo anterior, el cambio en el uso del suelo es mínimo y la economía en la zona se mantiene.

*El diseño debe evitar la propagación (el traslado) de los problemas ambientales y de congestión a otras áreas*

En el momento que se empiecen a tarifar las carreteras existe la gran preocupación de que el tráfico se desvíe hacia otras zonas o rutas, causando congestión y contaminación en estas otras áreas. La otra posibilidad, es que el tráfico se disperse en periodos sin tarifa, tal como se presentó en el *Area Licensing Scheme (ALS)* de Singapur durante los periodos no tarifados. Este problema tiene dos facetas: una es que tiene el efecto positivo de distribuir el tráfico sobre varias partes de la red o en distintos periodos de tiempo reduciendo así los problemas de congestión y contaminación en los periodos punta; y dos, es que la tarifa distribuye el problema en las diferentes horas del día y en toda la ciudad, donde además de incrementar los problemas de congestión y contaminación también aumenta el problema de la inseguridad viaria al desviar el tráfico hacia las zonas residenciales y calles locales, las cuales no están diseñadas para soportar el alto volumen de tráfico producido.

Para evitar la dispersión del tráfico en un área mayor, el diseño del esquema tarifario debe capturar la mayor cantidad de tráfico con el objetivo principal de suprimirlo y no



desviarlo, esto se logra diseñando estructuras tarifarias tipo mixta (cordones múltiples o combinación entre cordón y tarifa kilométrica).

El estudio previo de la demanda es fundamental para detectar los arcos con mayores flujos y los posibles arcos a los cuales se les trasladaría el problema. La obtención de la tarifa óptima a pagar y la definición del esquema son elementos necesarios para disminuir los efectos de re-enrutamiento de los conductores que siempre intentarán disminuir sus costes.

Para evitar que el tráfico se disperse en periodos sin tarifa, en el ALS de Singapur se amplió el periodo de tarificación desde las 9:30 am hasta las 10:15 am (el periodo de restricción inicial operaba desde las 7:30 am hasta las 9:30 am, después de la implementación, la congestión se desarrolló después de las 9:30 am). En Hong Kong se previno el problema variando la tarifa por periodos de tiempo. En Londres, la tarifa plana se aplica en la mayor parte del día en lugar de periodos de tiempo especiales. Mientras que, en los anillos de peaje de Noruega, la dispersión del tráfico no es visto como un problema, ya que se aplica una tarifa inferior durante todo el día.

*El diseño debe asegurar la existencia de suficientes rutas alternas para los conductores que deseen atravesar el área tarifada*

En zonas urbanas se debe evitar que los vehículos de paso entren a la ciudad a congestionar, por lo tanto deben existir rutas alternativas con las características de los carriles HOT “*High Occupancy Toll*”, o los FAIR “*Fast And Intertwined Regular*” lanes para impedir la formación de congestión sobre estas vías. Obviamente, el pago del peaje debe garantizar un nivel de servicio (indicador de calidad) superior a la alternativa libre de pago.

*El diseño debe cubrir solamente el área que posea un buen servicio de transporte público en el área tarifada*

Dentro de la zona urbana la oferta de transporte público da una mayor accesibilidad y los recursos que se perciban por concepto de peajes y deben redistribuirse en una mejora permanente y en medidas innovadoras que conduzcan al fortalecimiento del transporte público.

Fuera de la zona urbana el servicio de transporte público generalmente es limitado y deficiente ya que su oferta decrece a medida que se aleja de la zona urbana. En consecuencia, es necesario promover medidas como *carsharing* y/o *carpooling*, u otros modos alternativos a la carretera. Además, los ingresos deben estar destinados a mejorar la frecuencia del transporte público sobre todo en periodos punta. También para los residentes externos a la zona urbana y que son viajeros frecuentes (*commuters*), la estructura tarifaria a establecer debe estar basada en descuentos (como se ilustra en la figura 2.21, por ejemplo, para un esquema tipo kilométrico) para favorecerlos, con posibilidades de intercambiar a otros modos de transporte y facilidades de aparcamientos tipo *Park & Ride*.



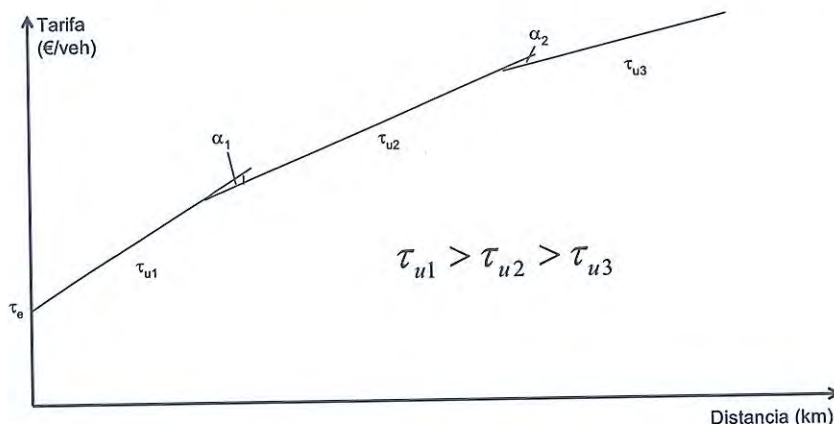


Fig. 2.21. Estructura tarifaria kilométrica tipo cóncava para favorecer a commuters.

El diseño de los puntos de entrada a la zona tarifada deben ser visualmente atractivos

Crear una señalización adecuada para orientar a los conductores en los puntos de entrada al sistema, es como se ilustra en la figura 2.22a para el ALS de Singapur y 2.22b para la zona de *congestion charging* en Londres.



(a)



(b)

Fig. 2.22. Señalización específica en los puntos de entrada al área tarifada.

Además, se tiene que establecer un sistema de comunicación permanente en el que se indiquen los horarios de cobro y no cobro y las diferentes tarifas a pagar, para que todos los puntos trabajen de forma sincronizada.

### 2.7.2 Aceptación pública

Es indispensable promover que el público reconozca que los problemas de movilidad y medio ambiente les conciernen, de ahí que adaptando lo propuesto por Sumalee (2001), se establezcan algunos criterios de diseño para mitigar el rechazo que produce este tipo de disposiciones en el público y sectores políticos contrarios al grupo que propone como solución una medida tarifaria al problema de la congestión.

El elemento clave para mejorar la aceptación pública es la provisión de alternativas en términos de rutas y modos. La combinación entre mejoramiento del transporte público y



la estructura tarifaria para gestionar movilidad hacen parte de una estrategia integrada de transporte que disminuye la congestión y aumenta la aceptación pública.

*El diseño debe evitar el problema de inequidades (injusticias) locales*

Este tipo de medidas deben asegurar la oportunidad de desplazarse y realizar las múltiples actividades que ejecuta la población que convive en la zona. De ahí que la equidad se refiera a la distribución de los costes y beneficios entre los distintos grupos de personas a los cuales se les aplica el esquema tarifario.

La distribución del recaudo que se produzca del sistema tarifario, juega un papel importante en el mejoramiento del transporte público ya que aquellos conductores que han optado por no pagar la tarifa y por ende no usar el coche, se les debe ofrecer otras opciones para sus desplazamientos habituales, de esta forma, se reduce la inequidad.

*El esquema debe brindar la libertad de viajar*

Ante la introducción de una tarifa, el establecimiento de rutas alternativas y las medidas que disminuyan sus efectos, los usuarios tomarán decisiones que pueden modificar su comportamiento (cambiar de ruta para realizar el viaje, cambiar de modo o de índice de ocupación, cambiar el destino y la hora del viaje, cambiar la generación de viajes, cambiar el uso del suelo a mediano o largo plazo, etc.) o no modificarlo (incrementando el porcentaje del presupuesto dedicado al transporte, conseguir que la empresa asuma el coste de la tarifa del trabajador, etc.).

Igualmente, para lograr un nivel de aceptación significativo del esquema se pueden alternar días o periodos de desplazamiento, por ejemplo, en Bergen el esquema tarifario no opera sábados y domingos dando la oportunidad a las personas de desarrollar actividades en la zona central de la ciudad usando la red de forma gratuita. En Singapur también se permiten periodos de desplazamiento sin coste los fines de semana.

*La estructura tarifaria deben ser simple y fácil de entender*

Un esquema tarifario que gestione la movilidad puede interpretarse como un sistema que tarife a los vehículos de acuerdo con la congestión y contaminación ambiental que producen. Utilizando estructuras tarifarias tipo *complex* (cordones adicionales con arcos de enlace entre ellos, para controlar los movimientos orbitales) se aumenta la equidad en el esquema tarifario, ya que la tarifa se paga de acuerdo con la longitud del viaje. Sin embargo, a mayor complejidad del sistema tarifario mayores dificultades se presentarán en su implantación debido a la oposición pública. De ahí, que un esquema con estructura tarifaria simple será más atractivo políticamente; de igual manera resulta más apropiado concentrar la tarificación solamente en el área central de la ciudad por considerarse la zona de mayor congestión, tal como se aplicó en Singapur y Londres.

*El precio de la tarifa debe ser aceptado por el público*

El establecimiento de la tarifa óptima dependerá de la función objetivo que se persiga con el esquema tarifario. Si el objetivo es aumentar ingresos, no es apropiado



suministrar rutas alternativas para el desvío del tráfico, en lugar de ello se puede adoptar una tarifa más baja para satisfacer la opinión del público y abarcar las vías con mayor número de viajes o vehículos.

Dependiendo de la elasticidad de la demanda respecto al coste generalizado, a tarifas más altas los beneficios medioambientales y de seguridad aumentan (al presentarse una gran disuasión de tráfico), pero los beneficios económicos y sociales disminuyen.

*El diseño debe evitar el problema de inequidades comerciales*

Holland y Watson (1978), resaltaron que el esquema tarifario no debería separar la zona de negocios, ya que se favorecerían los negocios y tiendas que queden fuera de los límites del esquema. Un buen diseño debe evitar los efectos frontera entre establecimientos comerciales.

*El diseño debe apuntar a tarifar el tráfico que contribuye a más congestión y polución*

La tarifación se debe concentrar en el área central de la ciudad y/o en las entradas y salidas de los accesos dado que son las zonas donde se producen la mayor congestión y polución. También, al variar la tarifa a pagar según la hora del día en que se realice el viaje se contribuye a castigar el tráfico que ocasiona mayor congestión.

Estructuras tarifarias del tipo continuo restringen los viajes de gran recorrido, pero favorecen los trayectos cortos. Mientras que una tarifa plana disuade fácilmente los trayectos cortos. Una combinación de estas estructuras bien diseñada para una topología de red determinada permite equilibrar las debilidades y fortalezas de los dos esquemas tradicionales, además de evitar al tráfico que causa estos efectos.

*El diseño debe apuntar a tarifar el tráfico que menos beneficie a la zona*

A través de un estudio riguroso de la demanda, en el que se establezca la matriz de viajes origen-destino entre las diferentes zonas de la red a tarifar se identifica el tráfico de paso y aquellos viajes que pueden usar modos alternativos al del vehículo privado.

*El diseño debe evitar tarifar a los residentes de las zonas de menos ingresos de la ciudad*

En este caso se pone como ejemplo las medidas aplicadas en Londres, en donde existe un descuento del 90% para los residentes de la zona tarifada, y de una total exoneración de la tarifa para:

- Vehículos que conducen o transportan personas discapacitadas (identificados con una placa azul).
- Vehículos que transportan equipos pesados o frágiles, historial clínico de pacientes, medicamentos controlados, etc.
- Vehículos que transportan cierto tipo de pacientes que se atienden en hospitales específicos, o pacientes que requieren terapia o un tratamiento periódico o una



- intervención quirúrgica pendiente o pacientes demasiado enfermos, débiles o lisiados que necesiten viajar a una cita en transporte público.
- Vehículos de bomberos que necesiten trasladarse entre estaciones.
  - Motos y ciclomotores.
  - Carruajes tirado por caballos.
  - Vehículos especiales que están exentos de todo tipo de impuestos.
  - Vehículos de emergencia usados por la policía, bomberos y ambulancias.
  - Vehículos para discapacitados que están exentos de todo tipo de impuestos.
  - Autobuses y coches con nueve o más asientos que se clasifiquen como autobuses y minibuses.
  - Vehículos usados para el transporte de botes salvavidas, guardacostas y autoridades del Puerto de Londres para atender las emergencias sobre el río Támesis.
  - Vehículos militares usados por las fuerzas armadas.
  - Vehículos que usan combustibles limpios o biodegradables.
  - Vehículos eléctricamente propulsados.
  - Vehículos especialmente adaptados para el reciclaje o para el retiro de escombros que funcionan supervisados por organizaciones independientemente acreditadas.

### 2.7.3 Implantación práctica

Algunos criterios de diseño para que la instauración del esquema tarifario sea lo más práctica posible.

*El número de puntos de cobro debe ser minimizado para reducir los costes de implantación y operación del esquema*

Dados los altos costes de implantación, operación y mantenimiento de un esquema tarifario, se requiere buscar la optimización de los puntos de cobro mediante la minimización de la cantidad. Para ello se debe optimizar la ubicación de dichos puntos e implementar estrategias de control que eviten el fraude, en este caso, la tecnología juega un papel fundamental para disminuir costes sin perder eficiencia.

*El diseño debe evitar tarifar las carreteras que no pueden tener tarifa*

Los análisis de *second best* que establece la teoría de tarificación basada en costes marginales permiten hacer este tipo de restricciones, en el corto plazo.

Tanto la topología viaria de la red en estudio como el análisis de oferta y demanda es fundamental para decidir cuáles carreteras no van a estar sujetas a la tarifa, para contrarrestar los problemas de inequidad. Este tipo de medidas permiten crear rutas alternas que eviten que vehículos de paso entren a la zona tarifada.



*El diseño debe evitar áreas o lugares que puedan causar problemas tecnológicos o de comunicación al sistema*

Cada equipo tecnológico tiene sus propias limitaciones, dependiendo de la tecnología ETC que se vaya a emplear se determinan las zonas que pueden originar conflictos con dicha tecnología para evitar ubicar los puntos de cobro en esas áreas o simplemente buscar equipos alternativos que solucionen dichos problemas.

*El esquema tarifario debe estar localizado totalmente dentro de la autoridad competente*

El establecimiento de las fronteras entre municipios y del mismo entorno metropolitano permite definir hasta dónde puede llegar la zona tarifada con la tarifa previamente establecida. Existen también algunas poblaciones que se unen para implantar toda una estrategia tarifaria, como en el caso de Stavanger (cuarta ciudad de Noruega), su vecina Sandnes y otros municipios alrededor que desde el 2001 establecieron un esquema de *road pricing* regional. El sistema incluye 21 estaciones de pago y tarifas diferenciadas por hora del día. El 37% de los ingresos se asignan para carreteras, el resto para transporte público.

#### 2.7.4 Medidas complementarias a los esquemas tarifarios

Algunas encuestas han demostrado que cuando surgen los problemas relacionados con la movilidad, sobre todo en regiones densamente pobladas, surge una concienciación del problema entre los diversos actores que componen la sociedad tal que se manifiesta reconociendo que las dificultades originadas por el tráfico y sus posibles soluciones les atañe. Otros estudios indican que habría aceptación de una tarifa para la gestión de la movilidad, si ésta viene acompañada de un paquete de medidas, tales como:

- Reasignación de los ingresos para redistribuir los beneficios o permitir la implantación de medidas justificadas en otros campos.
- Medidas para disminuir el rechazo del público, como someter la instauración del esquema a un referéndum como sucedió en Estocolmo.
- Estructuración de los impuestos en el transporte por carretera.
- Mitigación de los efectos secundarios que produce una tarifa por congestión.
- Reasignación del espacio viario para redistribuir los beneficios provenientes de la tarifación, implementando prioridades para los servicios de bus en toda la red.
- Incrementar la frecuencia y capacidad del servicio por ferrocarril, así como el mejoramiento de la infraestructura.
- Mejora y aumento en el servicio de transporte público (bus, tren, metro, etc.) e investigación de medidas innovadoras.
- Promoción de los carriles bus o de los sistemas de *Bus Rapid Transit* -BRT.
- Implantación de medidas como el *carsharing* y seguros según el número de kilómetros para disminuir el uso del vehículo privado.
- Incremento de la seguridad: reducción del número de accidentes mejorando el tiempo de viaje (disminuyendo demoras) para todos los usuarios.



- Protección y fomento de los modos de transporte a pie y en bicicleta.
- Fomentar medidas de *value pricing* como carriles HOT y FAIR sobre las vías rápidas que conduzcan al centro de la ciudad.

Otro tipo de medidas que permiten apoyar la implementación de un esquema tarifario y a la vez, reducir los impactos en la aceptabilidad del público, consiste en establecer privilegios para ciertos grupos de vehículos: con el fin de reducir el impacto de aplicación del sistema tarifario y para proveer viajes libres de pago o más baratos en ciertos grupos de conductores. Dichos privilegios pueden presentarse a través de:

- Excepciones: vehículos de la policía, bomberos, emergencia, discapacitados, etc.
- Descuentos: vehículos de transporte público como taxis, vehículos con alta ocupación, viajeros frecuentes (*commuters*), vehículos que usen combustible biodegradable, etc.
- Bonos a conductores: con este privilegio se les da la posibilidad de realizar determinada cantidad de viajes o número de kilómetros durante un periodo establecido bien sea por día o por semana. Cuando se supere el valor del bono se pasa a la tarifa normal.

También, se pueden constituir tarifas diferenciadas según el tipo de vehículo, distancia recorrida, hora del día, ubicación, frecuencia de uso y número de ocupantes: en este caso cada vehículo requiere de la instalación de un OBU para que sea identificado de manera automática y poderle aplicar el descuento correspondiente