

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 3

DOCTRINAS ECONÓMICAS PARA LA TARIFACIÓN DE CARRETERAS

3.1 Introducción

La dificultad de reflejar los costes que imponen los usuarios del sistema de transporte en sus decisiones individuales de viaje tiene el efecto de imponer costes sobre otros, quienes están comprometidos con el viaje, sobre los gobiernos que intervienen en un esfuerzo por solucionar estos problemas y sobre toda la sociedad.

Unas tarifas que reflejen el uso de 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 tomarían la decisión de viajar o no y si deciden hacerlo entonces a dónde, cuándo, cómo y qué tan lejos viajarían, en otras palabras, regularían su demanda.

Básicamente se identifican dos tipos de instrumentos para la tarifación del transporte por carretera: los impuestos y las tarifas. Los primeros no están relacionados con el servicio, mientras que los segundos son los llamados para que se establezcan con criterios de *equidad social y eficiencia*. En este sentido y dados los múltiples principios económicos que pueden emplearse para fijar las magnitudes de las tarifas, el gobierno o la entidad reguladora se ha decantado por la aplicación de la teoría económica basada en el *coste marginal social*, para lograr la eficiencia económica y social del sistema.

Bajo el enfoque del coste marginal a corto plazo se analiza cuál es la tarifa que representa el coste adicional a la sociedad relacionado con el kilómetro recorrido o viaje realizado de forma adicional debido al hecho de que la capacidad de la red de transporte se mantiene constante en el corto plazo. El objetivo fundamental al implantar la tarifa óptima es lograr la maximización del bienestar social disuadiendo el exceso de viajes o veh-km que son los generadores del coste externo.

Lo que más preocupa con la aplicación de una política tarifaria que regule la movilidad, son los efectos en la equidad, ya que al cobrarse la misma tarifa sin distinguir los niveles de renta de los usuarios puede llegar a inducir a que sean las personas de menores ingresos las más perjudicadas. La compensación a los potenciales perdedores y la asignación apropiada del recaudo son objetivos claves para lograr una mayor aceptabilidad pública de este tipo de medidas.

3.2 Instrumentos para tarifar

Hoy por hoy los sistemas de tarificación del transporte por carretera son el resultado de un cúmulo de diferentes opciones, no siempre implantadas para los propósitos de una política de transporte. Se pueden distinguir básicamente entre: (i) *impuestos* los cuales no están relacionadas con el servicio. Por ejemplo, los impuestos anuales sobre el vehículo (por adquisición -venta, valor añadido y transferencias- y de propiedad -registro, de circulación), impuestos sobre el combustible, impuesto de valor añadido sobre el impuesto del combustible, impuestos al medioambiente, etc. (ii) *tarifas*, las cuales se pagan por un servicio que provee un ente público o privado. Por ejemplo, las tarifas por acceso a la infraestructura (peajes en puentes/túneles, ferroviarias, aeroportuarias y portuarias), tarifas por el envío de mercancías, tarifas del transporte público, tarifas por estacionamiento, tarifas por los seguros de vehículos, etc. La tabla 3.1 resume los ingresos por concepto de tarifas e impuestos tanto al vehículo como a los combustibles en la Unión Europea.

Tabla 3.1. Ingresos provenientes de peajes e impuestos al vehículo y combustibles para los Estados Miembros de la UE en millones de Euros 1998. (Fuente: Nash et al., 2003b).

PAÍS	Tarifas por uso de infraestructuras		Impuestos a los vehículos			Impuestos al combustible		TOTAL
	Fijos	Variables	Impuesto al registro	Impuesto por Circulación	Otro	Impuestos al combustible	IVA a los impuestos del combustible	
Austria	266	237	¹³⁾	834	391 ³⁾	2591	604 ⁴⁾	4923
Bélgica	95	18	284	1153	901 ⁹⁾	3297	491	6239
Dinamarca	¹³⁾	38	2439	725	179 ⁵⁾	1178	¹³⁾	4558
Finlandia	0	0	¹³⁾	1262	¹³⁾	1938	426	3626
Francia	0	4167	¹³⁾	¹³⁾	4983 ⁷⁾	18720	16146	44016
Alemania	411	0	¹³⁾	7757	¹³⁾	28983	4565	41416
Grecia	¹³⁾	1327	¹³⁾	280	741 ¹⁰⁾	2765	407	5520
Hungría	122	¹³⁾	¹³⁾	31	76	1240	413	1882 ¹²⁾
Irlanda	0	27	770	373	¹³⁾	1223	¹³⁾	2393
Italia	¹³⁾	2222	865	3325	934 ⁵⁾	21994	6845 ⁴⁾	36185
Luxemburgo	3	¹³⁾	1	24	8 ⁵⁾	327	43	406
Países Bajos	91	0	¹³⁾	1873	2425 ³⁾	5040	857	10286
Portugal	52	332	¹³⁾	1030	63 ¹¹⁾	2342	¹³⁾	3819
España	0	919	908	1266	¹³⁾	8428	1349	12870 ⁶⁾
Suecia	59	0	¹³⁾	684	30 ¹⁾	3547	887	5266
Suiza	266	0	¹³⁾	1041	125 ¹⁾	2858	192 ²⁾	4482
Reino Unido	259	0	¹³⁾	7500	¹³⁾	30770 ⁸⁾	5454	43983

¹⁾ Impuestos de importación del vehículo. - ²⁾ También incluye IVA sobre los impuestos de importación y circulación. - ³⁾ Impuestos a las ventas. - ⁴⁾ También incluye IVA sobre las tarifas de infraestructura. - ⁵⁾ Impuestos sobre el seguro. - ⁶⁾ No se incluyen en este total los pagos de los subsidios recibidos por los concesionarios privados de la autopista el valor de €197 millones por el riesgo de cambio en 1998. - ⁷⁾ Todos los impuestos al vehículo: registro, seguro, impuestos sobre las compañías de vehículos, impuestos sobre la viñeta e impuestos sobre las partes de los vehículos. - ⁸⁾ El descuento del impuesto para el combustible del autobús de €398 millón se ha deducido de este total. - ⁹⁾ Seguro e impuestos de radio. - ¹⁰⁾ Todos los otros impuestos al vehículo. - ¹¹⁾ Impuestos municipales al vehículo. - ¹²⁾ No se incluyen los subsidios otorgados para la provisión de infraestructuras, un total de €171 millones en 1998. - ¹³⁾ No hay reportes dentro de la cuenta del país.

Estos instrumentos de tarificación se han señalado para solucionar de forma apropiada y factible los problemas asociados al transporte por carretera, entre los cuales se pueden distinguir:

- *Financiación*: la necesidad de obtener recursos para la inversión en nuevas infraestructuras y su mantenimiento ha llevado a muchos países a utilizar los peajes (sobre todo para autopistas), impuestos a los contribuyentes, al combustible, IVA, etc., como mecanismo financiero.
- *Mantenimiento y operación de la red*: habitualmente se han financiado con impuestos generales (impuestos a los contribuyentes, al combustible, IVA, etc.) o tasas especiales (viñeta, tasa según número de ejes).
- *Internalización de los costes externos*: bajo este principio se busca que el usuario pague una tarifa que sea equivalente al coste social marginal de un viaje, es decir, que incluya tanto los daños a la infraestructura como los efectos externos (accidentalidad, impacto medioambiental – contaminación del aire, agua, ruido – y administración de la congestión).

Actualmente los impuestos al combustible dominan las cargas impuestas al transporte. Su implantación es sencilla y no costosa ya que se cobra directamente en los lugares de producción e importación. Aunque las tasas se han diferenciado de acuerdo al tipo de combustible (gasolina, diesel, biodiesel, gas, otros) para proveer incentivos en la reducción del daño de la carretera y la emisión de CO₂, esta diferenciación no estimula la disminución de la congestión, el ruido y la accidentalidad. Este impuesto es único en muchos aspectos, puesto que los conductores de vehículos imponen costes en la red de transporte y que en cierta medida, son proporcionales al uso del combustible.

Tabla 3.2. Precios de la gasolina y diesel para los Estados Miembros de la UE, enero 2002 en €/1000 lt. (Fuente: European Environment Agency, 2002).

Estados Miembros	Gasolina sin plomo				Diesel			
	Precio de venta	Precio real	Impuesto	IVA	Precio de venta	Precio real	Impuesto	IVA
Austria	821	270	414	137	696	290	290	116
Bélgica	946	275	507	164	721	296	305	120
Dinamarca	1040	284	548	208	796	267	370	159
Finlandia	1004	263	560	181	783	337	305	141
Francia	959	228	574	157	745	247	376	122
Alemania	985	225	624	136	809	257	440	112
Grecia	667	266	296	105	607	268	245	94
Irlanda	802	320	348	134	742	369	249	124
Italia	996	288	542	166	835	393	403	139
Luxemburgo	736	285	372	79	620	286	253	81
Países Bajos	1100	297	627	176	769	301	345	123
Portugal	859	390	344	125	648	308	246	94
España	768	266	396	106	674	287	294	93
Suecia	956	263	502	191	803	303	339	161
Reino Unido	1137	224	744	169	1214	289	744	181

Junto con el instrumento usado para el cobro de los impuestos al combustible y los ingresos que se perciben de los mismos, los hacen fundamentales para utilizarse a nivel fiscal, político y administrativo. En el aspecto fiscal, es un generoso productor de ingresos, por ejemplo, en Estados Unidos arrojó \$75,6 billones de dólares durante el año fiscal 2000 (Sorensen y Taylor, 2005). A nivel político, el impuesto se paga en incrementos relativamente pequeños (el impuesto en promedio por galón en el 2000 fue de US\$ 0,377), quedando escondido en el precio del combustible. Esta característica particular permite que la opinión pública minimice su oposición, y a nivel administrativo, desde el punto de vista de contribuyentes y del gobierno es fácil de administrar y recolectar. El impuesto a la gasolina es acopiado desde los distribuidores, más que de los minoristas o consumidores, lo que ayuda a disminuir las oportunidades de evasión y abaratar el coste de recolección. La tabla 3.2 muestra los precios y los impuestos del combustible para la UE-15.

Ya que ha habido un notable incremento de la población, del número de viajeros y en especial del uso del vehículo particular, se ha provocado que la relación entre los ingresos provenientes del impuesto al combustible y el total de los kilómetros recorridos se haya visto aminorada. Algunos factores se han combinado para evitar que los impuestos al combustible sigan creciendo y expandiendo sus necesidades: en primer lugar, la mejora tecnológica de los vehículos ha hecho que estos recorran más kilómetros por galón de combustible que hace 30 años, unido a la producción de gasolinas menos contaminantes que reducen la emisión de CO₂. También, la aparición de combustibles alternativos (biocombustibles), vehículos eléctricos e híbridos (hidrógeno y gasolina) sobre las carreteras, favorece que los ingresos por impuestos al combustible se vean disminuidos. En segundo lugar está el hecho de que los ingresos por galón de combustible no se aumenten con la inflación. Otros tipos de impuestos, como el valor agregado a las ventas, propiedad e impuestos a las rentas son capaces de mantener su productividad en medio de la inflación porque la base imponible crece con la inflación. Sin embargo, el impuesto al combustible, generalmente depende de la base por galón y por ello sus recaudos no se incrementan automáticamente en respuesta a la inflación. Es más, ya que el coste de los materiales empleados en los proyectos de carreteras y el coste del suelo para la construcción de las mismas han aumentado más rápido que la tasa general de inflación, el poder adquisitivo de los ingresos por impuestos al combustible se ha visto reducido aún más rápido de lo que indicaría el índice de inflación, Sorensen y Taylor (2005).

Lo anterior permite concluir que el método de financiar y administrar infraestructuras a través del impuesto a los combustibles empieza a mostrar signos de deterioro.

3.3 Principios generales para la tarificación

La implantación de cualquier estrategia tarifaria sobre el transporte urbano en un entorno urbano o metropolitano, puede ser aplicada en principio, por los siguientes agentes: (a) operadores de servicios y (b) operadores de infraestructuras quienes buscarán maximizar los beneficios de la empresa y (c) el gobierno/regulador que buscará internalizar los costes externos del transporte.

3.3.1 Enfoques de tarificación según servicios de transporte y operadores de infraestructura

Según Milne et al. (2000), si la tarificación es aplicada por operadores de servicios y operadores de infraestructuras, el objetivo básico de la estrategia tarifaria será obtener ingresos y por lo tanto se puede hacer a través de diversas opciones de tarificación.

Tarificación a coste marginal

Al no existir restricción presupuestaria, los precios que pagan los consumidores por los bienes o servicios deberían reflejar los costes marginales de producirlos. Una compañía altamente competitiva es una *price-taker*: ésta fija el nivel de producción de manera que el coste marginal sea igual al precio, más que escoger el precio. Por el lado de la demanda del mercado, los consumidores que maximizan utilidades exigen las unidades adicionales mientras el precio que tienen que pagar (el que ellos toman como dado) es más bajo que el que querrían pagar. En un mundo perfectamente competitivo, sin intervención del gobierno, la distribución resultante del mercado es eficaz. En un mundo así, mercancías y servicios se producen y se consumen hasta el punto de que la buena voluntad de los consumidores para pagar por la última unidad, justo cubre su coste social, Milne et al. (2000).

Sin embargo, en la práctica y en el caso del transporte urbano la regla de que el precio se iguale con el coste marginal suele incumplirse por: (a) dificultad práctica de determinar cuál es el coste marginal de producción, las características de las infraestructuras y vehículos de transporte; (b) la situación típica en los mercados de servicio de transporte como el caso de provisión de infraestructuras, corresponde a un monopolio natural, el cual tiene el poder para fijar las tarifas y cobrar por los servicios que presta en función del valor de los mismos en lugar de su coste de producción. De esta forma aumentarían los ingresos totales y los beneficios; (c) la eficiencia no es la única referencia, ni la más importante en la toma de decisiones públicas. La equidad y la aceptabilidad política son elementos decisivos en la formación de los precios del transporte, y por ello a las empresas públicas (o privadas reguladas) se les pide en muchas ocasiones que tarifen por debajo del coste marginal, De Rus et al. (2003).

El objetivo de fijar una política tarifaria fundamentada en costes marginales bien sea a corto – (CMCP) o a largo plazo – (CMLP), es buscar el uso eficiente y eficaz de las infraestructuras. En el corto plazo, aunque no se recuperan los costes de inversión, sí se logra una eficiencia en el uso de los recursos actuales y en el caso de las carreteras se optimiza la capacidad limitada existente a través de una tarifa, la cual regula la cantidad de usuarios necesarios para dicha capacidad. En el largo plazo, se plantea como objetivo recuperar los costes de inversión y a través de un análisis coste-beneficio se determina de forma simultánea la capacidad y el flujo óptimo que se desea en un tiempo futuro.

En el caso de Francia y el Reino Unido están más a favor de una política de tarificación basada en costes marginales, principalmente en forma de CMLP: el punto de vista Francés se enfoca en el temor de una conducta estratégica de los operadores (CMCP induce tarifas bajas que llevaría a incrementar el tráfico y se requeriría mayor inversión) y a consideraciones de equidad (con CMLP, los usuarios pagan por todo el conjunto de

gastos, no solamente por los que son variables); en el Reino Unido el enfoque tradicional ha sido el CMLP, sin embargo el esquema aplicado para la zona central de Londres obedece a un CMCP, Quinet (2005).

De acuerdo con el coste marginal social a corto plazo, las tarifas pueden no ser suficientes para asegurar que todos los costes ocasionados por el tráfico queden cubiertos. La principal razón es que los costes marginales no incluyen los costes fijos (aquellos costes que no cambiarían si un vehículo adicional usa la carretera), especialmente los relacionados con la construcción de infraestructura. Por ende, se requiere que el esquema tarifario basado en costes marginales sociales deba ir acompañado de otros elementos adicionales de financiación. De ahí que se busque otros principios tarifarios como:

Tarificación a coste medio

La tarificación basada en el *coste medio* – *CMe*, donde la tarifa pagada por el usuario equivale al coste medio de producción, es decir, el coste total de producción dividido por el número de unidades producidas y vendidas. Al considerar solamente los costes de operación, la tarificación del *CMe* significa que no habría ganancias ni pérdidas, ya que el ingreso recaudado (producto del número de unidades vendidas y el precio cargado) satisface exactamente el coste total de producción. El cálculo del coste medio basado en precios comparado con el concepto de precios de coste marginal, únicamente requiere información en lo que se refiere a los costes totales y a la producción total, haciéndose relativamente simple de calcular e implantar.

La aplicación de una tarifa al coste medio, tiene la finalidad de cubrir la totalidad de los costes necesarios para construir, conservar y operar una determinada infraestructura, a fin de que ésta sea financieramente viable. De acuerdo con la teoría microeconómica, el punto de equilibrio será aquél en el que se intercepten la curva de demanda y la curva de costes medios totales (construcción, mantenimiento y operación).

Tarificación monopolio

En la tarificación *monopolio* las compañías buscan maximizar sus beneficios adoptando una curva descendente de demanda para representar que el ingreso es menor que el precio. En contraste con el precio fijado por una empresa perfectamente competitiva, una compañía monopolio, más bien elige su precio y lo escoge mayor que el coste marginal. El margen de ganancia, además del coste adicional de producción de la última unidad vendida, es igual a la diferencia entre el precio y el ingreso marginal.

Tarificación en dos partes

La tarificación en *dos partes* implica cargar un precio de coste marginal para cada unidad de servicio producida más una tarifa fija adicional. Esta tarifa fija se considera como un servicio de precio de acceso: habiendo pagado una tarifa plana inicial, al usuario solamente se le cobra por el precio del coste marginal de las unidades consumidas en realidad. Bajo este enfoque, ningún déficit operativo o de explotación, incurrido por la tarificación de coste marginal se puede recuperar a través de la tarifa fija sin perder los

incentivos de los consumidores para adquirir el servicio en cantidades eficientes. Por ejemplo, las compañías de teléfono, comúnmente imponen una tarifa de servicio fijo como precio base, en la cual los suscriptores pagan adicionalmente las tarifas que están directamente relacionadas con el uso del sistema.

Tarifación Ramsey

La tarificación *Ramsey* indica que la diferencia entre la tarifa y el coste marginal es inversamente proporcional a la elasticidad de la demanda del producto en cuestión. Para los segmentos con demanda inelástica las tarifas serían superiores a los costes marginales de los segmentos con demanda elástica. El principal argumento de este elemento tarifario es el objetivo de conservar la demanda en el nivel requerido de una tarificación del coste marginal social económicamente óptimo. Este tipo de tarificación necesita de la distinción entre los diversos modos, rutas y/o tiempos de viaje.

En el caso de una infraestructura con costes fijos elevados y un bajo coste marginal, suele defenderse una estructura de tarifas tipo Ramsey como la mejor opción para cubrir los componentes del coste fijo. Con esta estructura de precios se persigue maximizar el bienestar social bajo restricciones presupuestarias, De Rus et al. (2003).

La solución planteada por Ramsey parte de la hipótesis de que las demandas de los diferentes bienes son demandas independientes. La ecuación 3.1 señala que la tarifa que es capaz de financiar la infraestructura y que da lugar a un óptimo económico es tal que el incremento hasta el precio (P_i) del bien i por encima de su coste marginal de producción (CMa_i) debe ser inversamente proporcional a la elasticidad de la demanda del bien i .

$$\frac{P_i - CMa_i}{P_i} = \frac{\lambda}{\varepsilon_i} \quad (3.1)$$

Donde: P_i es el precio del bien i , CMa_i es el coste marginal de producción del bien i , ε_i es la elasticidad de la demanda del bien i y λ es una constante.

La aplicación de esta estructura tarifaria encierra problemas complejos de equidad y aceptabilidad, ya que una elasticidad baja podría estar asociada a la ausencia de sustitutivos cercanos y a una necesidad elevada del servicio de transporte por parte de los usuarios.

3.3.2 Enfoques de tarificación según el gobierno o la entidad reguladora

Si la tarificación es aplicada por el gobierno/regulador, la tarificación a seguir es la basada en el coste marginal también llamada *coste marginal social*, ya que ésta busca corregir las distorsiones debidas a la discrepancia entre el beneficio privado marginal y el coste social. El objetivo es asegurar que cada actividad hecha por los usuarios sea extendida

hasta el punto donde el beneficio social de la última unidad iguala al coste social, Milne et al. (2000).

La condición ideal es lograr que las infraestructuras viarias tanto a nivel interurbano como metropolitano sean utilizadas de forma eficiente, para ello la estrategia tarifaria a implementar debe lograr:

- Influenciar la demanda de viajes hacia una selección más sostenible (de modo, ruta, hora de salida, etc.) y de esta forma internalizar los efectos externos;
- Gestionar la demanda de tráfico y optimizar la capacidad actual;
- Obtener un servicio diferenciado de calidad;
- Generar ingresos para ser reinvertidos y reducir la curva de costes marginales.

En el epígrafe 3.5 se estudia la tarificación del coste marginal social, cuya noción en principio, se hace en todas las categorías de costes externos: congestión, daño en infraestructuras, costes de accidentes, ruido, intromisión visual y efectos barrera, y emisiones locales y globales. Este estudio se enfoca en la tarificación del coste externo debido a la congestión a través del enfoque tarifario del coste marginal social.

3.4 Equilibrio óptimo oferta-demanda. Principio básico para gestionar la movilidad

Para estructurar el procedimiento de la tarificación del coste marginal social que el gobierno o entidad reguladora impone para internalizar el coste de congestión, se introduce algunos conceptos de modelización del comportamiento de la demanda, ya que los modelos para tarifar la congestión en carreteras se derivan de los modelos de asignación del tráfico quienes describen la interacción entre la oferta y la demanda basados en el comportamiento escogido por los viajeros. El análisis de la demanda puede dividirse en modelos estáticos y modelos dinámicos.

3.4.1 Modelización estática

Los modelos estáticos en una red general de tráfico asumen una condición estable en todo momento y de este modo la demanda de viajes como los costes no varían en el tiempo. Estos modelos utilizan algoritmos de caminos mínimos (para cada par origen-destino O-D) para la asignación del tráfico y funciones de costes en los arcos que no incluyen la variación de las horas de salida de los usuarios en el origen ni la formación de colas que pueden presentarse en cada arco de la red cuando el flujo supera la capacidad. Diversos investigadores han enfocado este tipo de modelos hacia las políticas de *road pricing* y actualmente son los más usados para evaluar distintos esquemas tarifarios. Yang y Lam (1996), consideraron un modelo bi-nivel para determinar las tarifas en un subconjunto de arcos (para la red de Hong Kong), encontrándose que el peaje óptimo no es un valor único, sino que se encuentra dentro de un rango de valores. Esta característica es un punto de partida desde la teoría convencional para tarifar según el coste marginal que impone tarifas en todos los arcos y que es igual a la diferencia entre el coste social marginal y el coste privado marginal, es decir, tarificación según el enfoque "*first-best*".

Por otro lado, los modelos dinámicos tienen en cuenta que el tráfico y los costes varían todo el tiempo en un proceso dinámico y en consecuencia, las tarifas que se apliquen por congestión deben variar también, además, consideran la importancia de las demoras por colas y las decisiones en los tiempos de salida en la modelación de la congestión para un cuello de botella, y señalan que la variación de las tarifas en el tiempo influye en los “commuters” (viajeros frecuentes) en su decisión de la hora de salida, es más, permite una eficiente reorganización de los flujos de tráfico comparada a la situación sin tarifa. Los modelos dinámicos se han aplicado a cuellos de botella o a una trayectoria determinada en una red. Wie y Tobin (1998), desarrollaron dos tipos de modelos dinámicos para una red general de tráfico, basados en la teoría de tarifación del coste marginal “first-best”. El primer modelo se desarrolla bajo el supuesto de que las capacidades en los arcos y la demanda (usuarios homogéneos) entre los orígenes y destinos son estables día a día y los commuters tienen la habilidad de aprender a escoger la mejor ruta en un tiempo fijado a través de las exploraciones diarias. El segundo modelo se lleva a cabo bajo el supuesto de que las capacidades en los arcos y la demanda fluctúan significativamente día a día y los commuters tienen la destreza de optimizar su ruta cada día usando un sistema dinámico de ruta guiada en lugar del estado de equilibrio estacionario.

Al tener en cuenta solamente los costes que produce la congestión y aplicando la teoría de tarifación basada en costes marginales, Walters en 1961 fue el primero en transformar la curva velocidad-flujo en una curva de costes, convirtiendo inicialmente la curva velocidad-flujo en la curva tiempo-flujo por su relación inversa, tal como se muestra en la figura 3.1a. Esta curva se elabora estipulando el tiempo mínimo de viaje t_{min} , que gastaría un viajero representativo en recorrer cierta distancia viajando a la velocidad máxima V_f , y a partir de este punto se obtiene una curva creciente hasta llegar al punto (t_m, q_m) , que corresponde al tiempo de viaje en condiciones de flujo máximo q_m . A partir de ese momento y dadas las condiciones de flujo inestable (rama de congestión) que se presenta, el tiempo de viaje tiende a infinito ya que la velocidad tiende a nula.

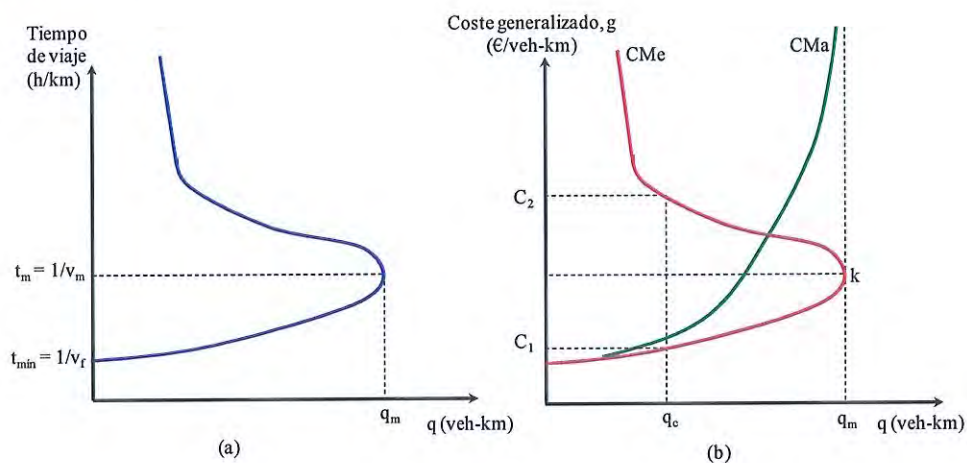


Fig. 3.1. Deducción de la relación coste-flujo. (Fuente: Button, 2004).

Elaborada la curva de la relación tiempo-flujo es posible transformarla en una curva de costes-flujo como se ilustra en la figura 3.1b, teniendo en cuenta dos consideraciones: la primera, es que en el eje de las ordenadas, la variable a tener presente es la del coste generalizado g^4 , es decir, el tiempo por unidad de distancia (kilómetro) se multiplica por el valor del tiempo y se le adicionan los costes de operación vehicular (unidad monetaria por unidad de distancia), los cuales incluyen combustible, lubricantes, costes de mantenimiento y depreciación, de esta forma se obtiene la curva de coste medio variable CMe ; la segunda, es interpretando al flujo como la cantidad de viajes ofertados por la carretera por unidad de tiempo.

La relación coste-viaje de la figura 3.1b posee una curva CMe con pendiente positiva en la porción correspondiente a la rama de congestión de la curva velocidad-flujo hasta que se alcanza la capacidad máxima q_m y posteriormente cambia a una rama con pendiente negativa doblada hacia atrás y que tiende hacia infinito⁵ en la porción correspondiente a la rama de mayor congestión. Luego, un número de viajes q_c , se pueden realizar a un coste generalizado C_1 en la porción de la pendiente positiva o a un coste alto C_2 en la porción de la pendiente negativa, resultando este último ineficiente por la alternancia entre aceleración y desaceleración a causa de la alta densidad del tráfico. Se recomienda usar otro tipo de modelo cuando se llega a la zona de congestión (después del punto k), como por ejemplo la teoría de colas, Lindsey y Verhoef (2000).

Si de la curva CMe que mide el coste generalizado en el que incurre un viajero al efectuar un viaje, se tiene en cuenta solo el coste externo de congestión⁶ (omitiendo las demás externalidades como ruido, contaminación atmosférica, accidentes, etc.), entonces CMe mide el coste medio social generalizado de un viaje. Por consiguiente, el coste social total de q viajes está dado por $CMe = (CMe)q$. Luego el coste marginal⁷ social de un viaje adicional está dado por la ecuación 3.2.

$$CMA(q) = \frac{\partial C_T}{\partial q} = CMe(q) + q \frac{\partial CMe(q)}{\partial q} \quad (3.2)$$

⁴ Según De Rus et al. (2003), el coste generalizado corresponde a la suma del valor monetario de todos los determinantes de la demanda de transporte para un individuo. Consta de todos los desembolsos que debe hacer el usuario con el fin de trasladarse (costes de operación, peajes y gastos de aparcamiento, etc.), unido al valor monetario del tiempo empleado en dicho viaje (suele asociarse al salario).

⁵ La relación $CMe = (CMe)q$ significa que el coste del tiempo depende del nivel de tráfico y no viceversa. La porción de la rama doblada hacia atrás de la curva de costes significa que el coste del tiempo continúa aumentando cuando el flujo de tráfico se reduce después de alcanzar la capacidad máxima q_m .

⁶ El coste de congestión corresponde al coste en tiempo adicional "demora" que un motorista experimenta y que simultáneamente impone a todos los demás que ya están circulando, y se calcula tomando el incremento del coste medio del tiempo causado por el viaje adicional y multiplicado por el número de vehículos en la corriente del tráfico (Hau, 1998).

⁷ De acuerdo con la teoría microeconómica el coste marginal es el coste adicional en que se incurre produciendo una unidad más, es decir: $CMA(q) = \frac{\partial C_T}{\partial q}$

Al mismo tiempo, se nota que el coste marginal aumenta asintóticamente a la capacidad máxima q_m y es indefinido por la curva $CMe(q)$ más allá del punto k (Hau, 1998). Según Robusté y Sarmiento (1999), se puede demostrar que para el flujo máximo la derivada de la curva del coste con respecto al flujo es infinito, lo que concuerda a nivel teórico con un coste marginal asintótico cuando el flujo se acerca al máximo.

Obtenida la curva $CMe(q)$ con el flujo interpretado como la cantidad de viajes “ofertados” por unidad de tiempo, se puede establecer una combinación con la curva de demanda $d(q)$ señalado al flujo como la cantidad de viajes “demandados” en la misma unidad de tiempo (hora punta, hora valle, día laborable, etc.) y como eje de las ordenadas el coste generalizado, para obtener el diagrama oferta-demanda de la teoría microeconómica (aspa marshalliana), demostrando la posibilidad de equilibrio cuando las curvas se intersectan.

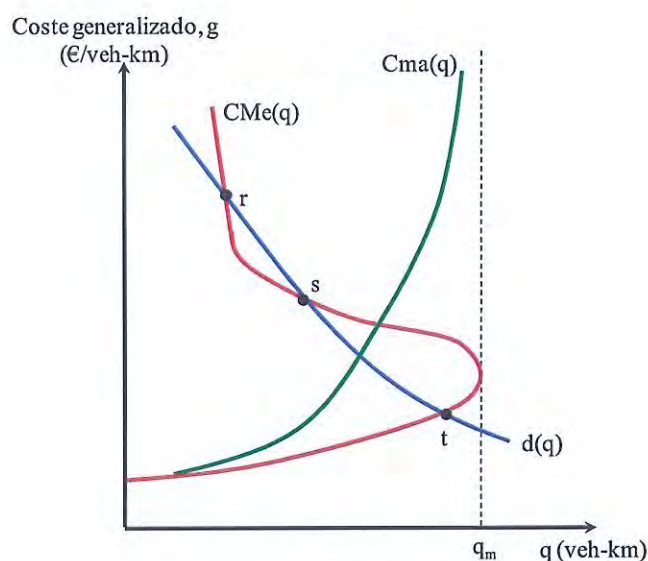


Fig. 3.2. Posibles puntos de equilibrio entre la curva de oferta $CMe(q)$ y la curva de demanda $d(q)$ para el estudio de la congestión de usuarios homogéneos. (Fuente: Lindsey y Verhoeff, 2000).

En la figura 3.2 se muestran los puntos de intersección r , s en flujo de saturación o de mayor congestión y t en la rama de formación de congestión. La intersección que se presenta en la rama de mayor congestión ha sido fuente de debate por muchos años, puesto que por un lado, se han confundido las unidades del flujo en las curvas de oferta y demanda y por el otro si el equilibrio en esta rama es estable. Resultados recientes exponen que la congestión es un fenómeno momentáneo que puede estudiarse solamente con modelos dinámicos, Lindsey y Verhoeff, (2000).

Es preciso evitar confundir las unidades del flujo, tanto para la curva de demanda $d(q)$ como para la curva de oferta $CMe(q)$, indicando que en el eje de las abscisas el flujo corresponde al número de viajes en el periodo de tiempo analizado y no a las unidades vehículos/hora-carril, excepto en condiciones homogéneas de geometría y tráfico, en donde son equivalentes.

Al elaborar un análisis económico para determinar una tarifa óptima que soporte los costes de congestión, la rama doblada hacia atrás en la curva de congestión se puede ignorar y trabajar directamente con las curvas de oferta y demanda para la rama de congestión, tal como se muestra en la figura 3.3.

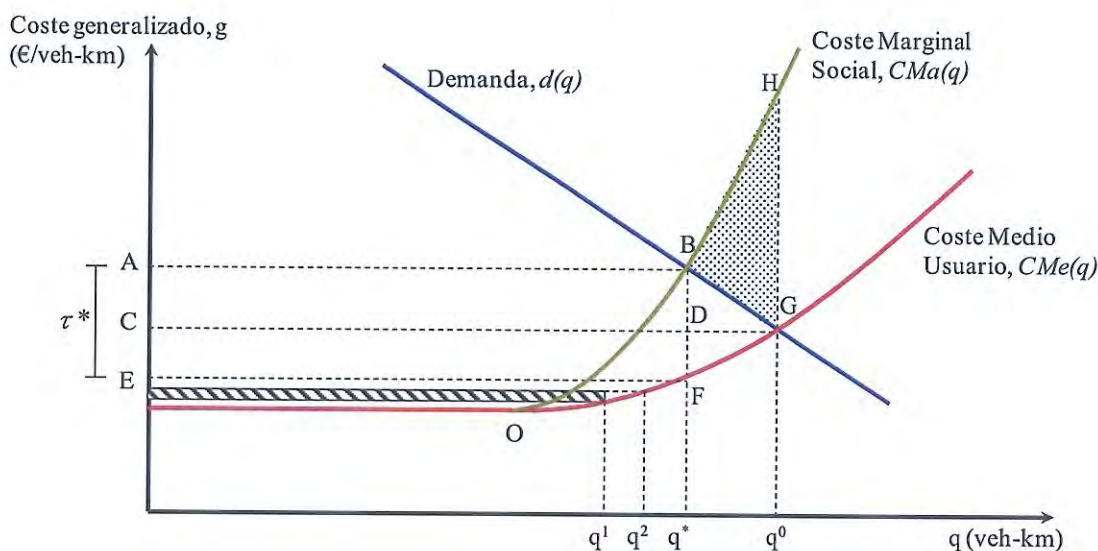


Fig. 3.3. Modelo estándar para determinar la tarifa óptima por congestión.

La curva de demanda $d(q)$ especifica el beneficio privado marginal y por simplicidad se asume igual al beneficio social marginal del viaje. El beneficio social total puede medirse por el área bajo la curva de demanda $d(q)$.

De acuerdo con la teoría microeconómica (aspa Marshaliana), cuando la curva de demanda y la curva de costes del usuario se intersectan, se determina el punto de equilibrio G , así como se muestra en la figura 3.3 y que en este caso no corresponde al óptimo para la sociedad puesto que el flujo q^0 es excesivo, ya que recibe un beneficio de q^0G , pero impone los costes de q^0H . En esta figura también se aprecia, cómo después del punto O , cada viaje adicional que se añade ocasiona un aumento en los costes de operación y tiempo para los demás usuarios de la carretera, (rectángulo sombreado). Esto es que, cada aumento del número de viajes de un valor q^1 a un valor q^2 incrementa el coste de todos los usuarios.

Button (2004), indica que el flujo adicional más allá del óptimo q^* genera los costes q^0HBq^* pero solamente disfruta del beneficio q^0GBq^* . Este resultado que en economía del transporte se llama el coste social de congestión o pérdida social de eficiencia está dado por el área del triángulo BGH . Luego, la tarifa óptima que debe aplicarse para conseguir el flujo óptimo q^* y así internalizar los costes de congestión está dada por el segmento BF .

$$BF = A - E = \tau^* = CMa(q^*) - CMe(q^*) = q^* \frac{\partial CMe(q^*)}{\partial q}$$

Donde: $q^* \frac{\partial CMe(q^*)}{\partial q}$, es el coste marginal de congestión que imponen los viajeros a otros. Esto se conoce como el beneficio social total maximizado⁸ o “first-best” primer-mejor óptimo o tasa Pigouviana (en honor a Arthur C. Pigou, quién en 1920 escribió “*The Economics of Welfare*”).

Esta tasa *BF* equipara el beneficio social marginal y el coste social marginal *C_{Ma}*, en el nivel eficiente de tráfico q^* . La tarificación por congestión (bajo el supuesto de un valor uniforme del tiempo) genera una ganancia de bienestar de *BGH*. El flujo de tráfico se reduce desde q^0 a q^* , como resultado de que algunos motoristas no usen la carretera (bien sea porque cambien de modo o renuncien al viaje) y de esta forma se libera el excedente *BDG* de los consumidores (vehículos-viajeros). En el mismo tiempo sin embargo, la autoridad de la carretera recoge ingresos *ABFE*. De estos ingresos, *ABDC* son una transferencia del excedente de los consumidores disfrutado por los usuarios hecha a la autoridad de la carretera en forma de ingresos. Estos ingresos pueden (y quizá deberían) ser devueltos a los mismos usuarios de la carretera.

3.4.2 Modelización dinámica

Lo atractivo del modelo estático discutido antes es su simplicidad: éste evita muchas de las complejidades matemáticas asociadas con los enfoques de modelización dinámica. No obstante, ya que el tráfico y la congestión son intrínsecamente fenómenos dinámicos, lo ideal sería modelarlos como tal. El sistema de transporte viario involucra un amplio rango de procesos dinámicos complejos y espacialmente diferenciados, que afectan una gran variedad de agentes heterogéneos. Para una revisión más detallada sobre los fundamentos de la asignación dinámica de tráfico remitirse a Peeta y Ziliaskopoulos (2001).

Los modelos dinámicos de tarificación de la congestión se derivan de los problemas dinámicos de asignación óptima del tráfico. Varias formulaciones y algoritmos se han propuesto para solucionar dichos modelos de asignación, presentándose el enfoque de la programación matemática (Mathematical Program Equilibrium Constraints) propuesto por Merchant y Nemhauser, 1978; Carey, 1992; Wu et al., 1998. Sin embargo, la programación matemática tiene la limitante de impedir una descripción apropiada de las interacciones y la dinámica del tráfico (naturaleza asimétrica de las funciones de costes del viaje y la interacción dependiente del tiempo del flujo de tráfico y el tiempo de viaje). Un segundo enfoque para modelar las redes dinámicas de tráfico es la teoría de control óptima propuesta por Friesz et al. (1989), Wie et al. (1990, 1995), que provee una relación explícita entre el flujo de salida y el flujo en el arco. Esta metodología presenta varias desventajas: (i) si la función del flujo de salida es cóncava, no es posible establecer un modelo de control óptimo, (ii) la tasa de salida del flujo debe ser positivo para satisfacer la función de salida del flujo (si el flujo inicial es cero, la propagación del flujo es poco realista), (iii) ningún modelo basado en el control óptimo equivalente existe si se consideran restringidas las capacidades de los arcos. Un tercer enfoque que

⁸ Mediante la maximización del bienestar social y bajo el principio de eficiencia económica se logra que la tarifa que pagarían los usuarios sea igual al coste social marginal que producen.

está ganando atención entre los investigadores para formular los problemas de la asignación dinámica del tráfico es la desigualdad variacional, la cual permite superar la asimetría de las funciones de costes, Joksimovic y Bliemer (2002).

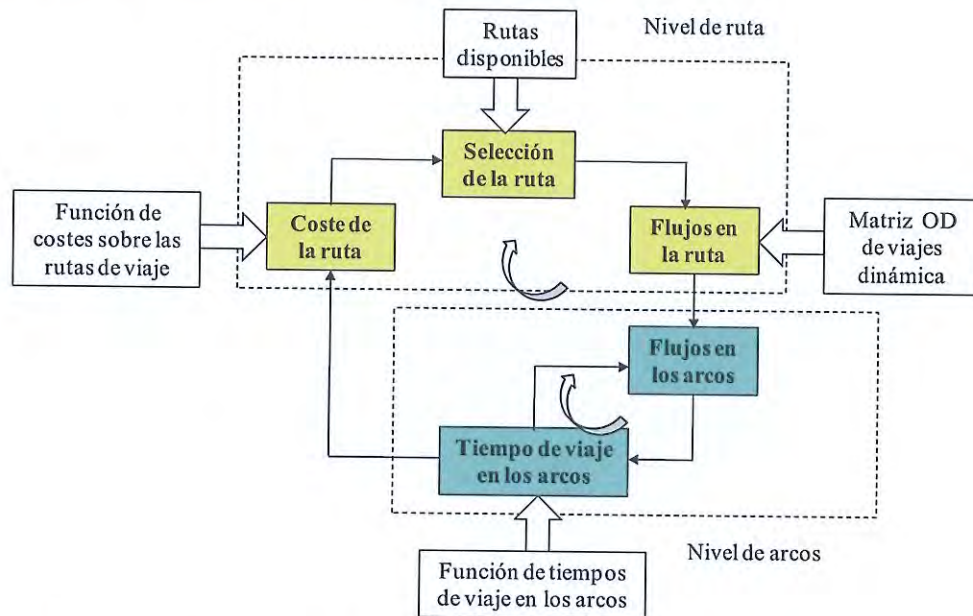


Fig. 3.4. Estructura del modelo dinámico de asignación de tráfico. (Fuente: Joksimovic y Bliemer, 2002).

La figura 3.4 ilustra la estructura general de un modelo dinámico de asignación de tráfico (MDAT). La primera parte del MDAT es el modelo de selección de ruta (conducta del usuario) en la que todos los viajeros están distribuidos sobre las rutas disponibles de la red viaria mediante un equilibrio dinámico de usuario estocástico. Este tipo de equilibrio se adopta dadas las condiciones aleatorias que los usuarios perciben. Los viajeros escogen la ruta óptima (generalmente buscando minimizar el coste del viaje, ver epígrafe 3.6.1) de un conjunto de rutas disponibles respetando el coste sobre la ruta y este a su vez, depende de muchos factores, siendo el tiempo de viaje uno de los más relevantes dentro del coste generalizado del viaje. La segunda parte del MDAT es el modelo dinámico de carga de la red (MDCR), en el cual todos los flujos se mueven a lo largo de las rutas asignadas. Esta parte del modelo simula la propagación del tráfico a través de la red teniendo en cuenta los tiempos de viaje en cada arco que obedecen a las densidades de cada arco. Los datos de entrada del modelo son: el conjunto de rutas disponibles, la matriz O-D de viajes dinámica, la función de demoras en cada arco y la función de costes sobre la ruta.

La estructura del MDAT tiene dos ciclos diferentes pero relacionados. Uno a nivel de ruta y el otro a nivel de arco. A nivel de ruta, los flujos se determinan por el modelo de selección de ruta (los viajeros escogen sus rutas) y depende del coste sobre la ruta (cada usuario preferiría la ruta con el coste mínimo). También, el coste de la ruta se acuerda en función del flujo en la ruta. Una condición estable solamente se determina cuando ningún viajero puede mejorar su tiempo de viaje al cambiar de ruta (equilibrio de usuario). El ciclo a nivel del arco indica que los tiempos de viaje en el arco dependen de la cantidad de flujos de cada arco (mediante una función de demoras) pero además, se

requiere conocer el tiempo de viaje en cada arco para establecer los flujos (en el modelo de asignación dinámica de tráfico se requiere propagar los flujos en los arcos en el tiempo).

Para modelar la selección de rutas se usan dos enfoques: el primero está basado en la generalización del primer principio de Wardrop de la asignación estática de tráfico, cuyos usuarios optimizan sus rutas según la información disponible de ellas. Este enfoque describe la evolución de flujos cuando los usuarios toman una decisión de la selección de la ruta basados en el tiempo de viaje experimentado y comúnmente conocido como asignación preventiva de la ruta. Esto no logra un patrón de equilibrio día-a-día y por ende, se considera un principio de asignación dinámica de tráfico y no un verdadero equilibrio. Friesz et al. (1993) propone una generalización alternativa del principio de Wardrop que lo indica como: *Si en cada instante de tiempo, para cada par O-D, el coste unitario del flujo sobre las rutas utilizadas es idéntico e igual al coste instantáneo mínimo unitario de la ruta, el correspondiente patrón de flujos es un equilibrio dinámico de tráfico.* Este enfoque, conocido como asignación reactiva, corresponde a usuarios que tienen acceso en tiempo real a la información del tráfico pronosticada por el sistema o alternatively, como una aproximación a un proceso en el cual los viajeros combinan el tiempo de viaje experimentado con conjeturas para pronosticar las variaciones temporales en flujos y costes de viaje, Casas (2004).

Friesz et al. (1993) señalan al problema de equilibrio dinámico en el espacio de flujos de ruta $s_p(t)$, para todas las rutas $p \in P_w$, como el conjunto de caminos posibles para el w -ésimo par O-D en el tiempo t , donde el índice de tiempo t se refiere al periodo cuando el flujo parte desde su origen. La tasa de rutas de flujos en la posible región Ω satisface, en cualquier tiempo $t \in (0, T)$, la siguiente conservación de flujo y restricciones no negativas:

$$\Omega = \left\{ s(t) / \sum_{p \in P_w} s_p(t) = q_w(t), w \in W; s_p(t) \geq 0 \right\}; \quad \forall t \in (0, T) \quad (3.3)$$

Donde: W es el conjunto de todos los pares OD de la red, T es el tiempo horizonte, $q_w(t)$ es la fracción de demanda para el w -ésimo par O-D en el tiempo t . el enfoque asume que las condiciones de equilibrio óptimo pueden ser definidos como “una versión temporal de las condiciones óptimas de equilibrio de usuario estáticas de Wardrop”, las cuales pueden ser formuladas como:

$$h_p(t) \begin{cases} = u_w(t); & \text{si } s_p(t) > 0 \\ \geq u_w(t); & \text{si } s_p(t) < 0 \end{cases}; \quad \forall p \in P_w, \quad \forall w \in W, \quad \forall t \in (0, T), \quad s_p(t) \in \Omega$$

$$u(t) = \text{Min}_{p \in P_w} \{h_p(t)\}$$

Donde: $h_p(t)$ es el tiempo de viaje sobre la ruta p , el cual es fijado por el modelo dinámico de carga de la red (MDCR). Friesz et al. (1993), muestra que estas

condiciones son equivalentes al problema de inequidad variacional, las cuales consisten en encontrar $s^* \in \Omega$, tal que:

$$|h(s^*), s - s^*| \geq 0, \forall s \in \Omega$$

En resumen, un modelo de asignación dinámica de tráfico consta de dos componentes:

- Un método para determinar las tasas de flujo dependientes de la ruta sobre los caminos de la red;
- Un modelo dinámico de carga de la red que determina cómo estos flujos de ruta dados incrementan el tiempo dependiente de los flujos en los arcos, del tiempo de viaje en los arcos y el tiempo de viaje en la ruta.

3.5 Tarificación del coste marginal social

Unas tarifas que reflejen el uso adicional de la infraestructura y los costes externos actuarían como señales a los viajeros sobre el coste social asociado con su viaje adicional. Basados en dicha tarifa, los viajeros tomarían una decisión acerca de dónde, cuándo, cómo y qué tan lejos viajan, es decir, regularían su demanda. Además de actuar como un coste señal, el mecanismo de tarificación es la mejor forma para asegurar que la oferta limitada de un bien sea accesible a quienes más lo valoran. Incrementando el precio hasta que la demanda total iguale la cantidad disponible, los consumidores con la más alta voluntad a pagar por el bien, recibirían el bien. Asimismo, en mercados competitivos las empresas obtendrían buenos resultados si sus precios se mantienen tan bajos como sea posible; de lo contrario sus competidores tomarían sus mercados. De esta forma el mecanismo tarifario provee de incentivos a todos los productores para incrementar o disminuir costes basados en técnicas de producción.

Una política tarifaria basada en costes marginales sociales a corto plazo (CMCP), debería maximizar el excedente social de los productores y de los usuarios del transporte. Con este principio se busca, que todos los vehículos paguen los costes adicionales que causan por usar las carreteras.

La tarificación basada en el CMCP implica que cada usuario de la infraestructura de transporte debería pagar - en o cercano al punto de uso - el total del coste marginal social que se impone por el uso. La justificación tradicional de la tarificación basada en el coste marginal social es la "asignación eficiente" en el sentido de optimizar la distribución de recursos y de maximizar el bienestar de la sociedad como un todo.

La maximización del bienestar social se logra cuando la tarifa escogida iguala al coste marginal social; esto se puede realizar bajo las nociones de *first best* que representa la implementación del coste marginal social como un óptimo social total o bajo las nociones de *second best* que implica la implantación óptima con restricciones. La tarificación basada en el CMCP, traducida en términos de tarifa por uso de la infraestructura, requiere de la estimación de tres componentes de costes para el tráfico adicional que utiliza la infraestructura existente. El primero es el coste impuesto por el

uso adicional de la infraestructura que se oferta, este coste abarca tanto los costes de mantenimiento y de rehabilitación, además de cualquier otro coste de operación adicional. El segundo componente es el coste marginal impuesto sobre otros usuarios de la infraestructura, en términos de demoras, congestión, accidentes y costes de oportunidad (éste último referido comúnmente a costes de escasez) sobre esos modos que poseen una limitante física y una vez que todos los espacios son tomados, ningún otro puede obtenerlo. El tercer tipo es el coste imputado fuera del sistema de transporte y que principalmente es un coste medioambiental.

Las nociones de *first-best* y *second-best* constituyen los conceptos centrales de una política de eficiencia económica y análisis del bienestar.

La teoría económica de tarifación se desarrolla de una manera satisfactoria en el caso de hipótesis restrictivas describiendo una clase de mundo perfecto, en el cual todos los mercados son competitivos, no hay efectos externos ni bienes públicos, hay ausencia de estado (o si lo hay, es un estado que recauda impuestos y donde estos impuestos no perturban el óptimo). En este sentido los resultados son simples y claros y proveen un enlace perfecto entre tarifación de infraestructura y selección de la inversión, la forma de obtener la tarifa es sencilla y el énfasis en el coste marginal constituye la guía para una tarifación óptima, Quinet (2005).

3.5.1 *First-best vs. Second-best*

De acuerdo con Quinet (2005), una situación de *first-best* se presenta cuando:

- No hay efectos externos ni bienes públicos;
- Las empresas actúan de manera competitiva, es decir se interesan en la tarifa;
- No hay impuestos y si los hay, son óptimos y además no están relacionados con la actividad económica del agente;
- No hay problemas de información: la información es la misma para cualquiera y no hay incertidumbres;
- No hay costes de transacción;
- No hay problemas de redistribución.

La teoría de tarifación *first-best* debe considerarse como un punto de referencia hipotético por dos razones: primero, porque es difícil implementarlo en la práctica ya que existen barreras de tipo técnico, legal e institucional, y de aceptabilidad tanto pública como política. Segundo, porque para poder aplicarla se deben satisfacer una serie de supuestos, entre ellos, que se aplique en la totalidad de la red en estudio y que los sectores del transporte, económico y gobierno utilicen impuestos únicos para alcanzar un objetivo común. En la tarifación real del transporte, estas suposiciones son difíciles de cumplir, de ahí que se contemple una tarifación basada en costes marginales bajo restricciones, teoría de *second-best*, en la cual se considera que no todas las decisiones pueden afectarse completamente de manera óptima.

Un aumento de bienestar basado en la tarifación *second-best*, implica que la tarifa por el uso de la infraestructura se ha estipulado de forma conjunta con la tarifa del transporte público, la tarifa de estacionamiento y a largo plazo con el nivel de inversión. Dado que

el transporte público genera unos costes externos menores por pasajero transportado que el transporte privado, el precio óptimo de *second-best* debe incorporar una subvención cuando el transporte privado no paga todos sus costes. Sin embargo, la efectividad de esta política para reducir la congestión es limitada, ya que la elasticidad cruzada entre la demanda de transporte privado y el precio del transporte público es baja, Matas (2004).

Las situaciones de *second-best* reflejan la variedad de complicaciones e imperfecciones debidas a las diferentes restricciones tecnológicas, institucionales, legales, políticas y públicas que deben tenerse en cuenta en una política real de tarificación. En el caso particular del transporte urbano por carretera se presentan entre otras las siguientes situaciones de *second best*:

- Limitación de la tarifa para medir diversos aspectos;
- Distorsión en otras rutas;
- Distorsión en otros modos;
- Distorsión en otros sectores

Para utilizar las orientaciones de *second best*, se pretende emplear modelos que tengan en cuenta estas distorsiones, como los modelos de equilibrio general que emplean supuestos no tan exactos en la función de utilidad. Estos modelos permiten considerar los efectos en la renta mientras la función de utilidad de los usuarios no tenga restricciones y además, consideran al transporte como un bien intermedio (Quinet 2005).

En el caso del diseño de cordones se requiere determinar de forma óptima tanto la localización de los puntos de cobro como el valor de la tarifa a pagar tal que se maximice el bienestar social, definido como el beneficio total menos el coste total. De acuerdo con la teoría microeconómica dicha función de bienestar social B_s se define como:

$$B_s(\mathbf{F}, \boldsymbol{\tau}) = \sum_i \int_0^{N_i} D_i(x) dx - \sum_j \sum_p \delta_{jp} F_p c_j \quad (3.4)$$

Donde: el primer y segundo términos son el beneficio del usuario y el coste del usuario, respectivamente, \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 δ_{jp} es la variable de 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 implantarse 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, el cual se incluye en el programa de optimización como una restricción que impone una especial estructura y da complejidad al problema.

Con base en la ecuación 3.4, Verhoef (2002), presenta un algoritmo heurístico para encontrar a través de un análisis de “*second-best*” el establecimiento de una tarifa óptima y 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*”. Para encontrar el óptimo de “*second-best*” definido como la tarifa que hace que el sistema de caminos relevantes no cambie para pequeñas variaciones de los peajes, el regulador tiene que resolver el Lagrangiano que muestra la ecuación 3.5.

$$\begin{aligned} \Lambda = & \sum_{i=1}^I \int_0^{N_i} D_i(x_i) dx_i - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \delta_{jp} N_i c_j \left(\sum_{k=1}^I \sum_{q=1}^P \delta_{jq} \delta_{kq} N_q \right) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \delta_{ip} \lambda_p \left[\sum_{j=1}^J \delta_{jp} \left(c_j \left(\sum_{k=1}^I \sum_{q=1}^P \delta_{jq} \delta_{kq} N_q \right) + \delta_j f_j \right) - D_i \left(\sum_{q=1}^P \delta_{iq} N_q \right) \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

El primer conjunto de términos expone los beneficios totales, sumado sobre todos los pares de O-D, con los flujos de O-D acordados según $N_i = \sum_{p=1}^P \delta_{ip} N_p$, donde: δ_{ip} es la variable binaria auxiliar de lógica que toma el valor de 1 si $p \in P_i$ y $\sum_{p=1}^P \delta_{ip} (c_j(N_j)) \delta_j f_j - D_i(N_i) \leq 0$, y el valor de cero en caso contrario. N_p es el número continuo de usuarios para el camino p o (flujo del camino p), con $N_p \geq 0$. El segundo conjunto de términos representa el coste total, sumado sobre todos los arcos en la red, con el total de flujo en los arcos según $N_j = \sum_{p=1}^P \delta_{jp} N_p$, donde: N_j es el número continuo de usuarios sobre el enlace j o (flujo en el arco j), con $N_j \geq 0$. El tercer conjunto de términos constituyen las restricciones causadas por las condiciones de equilibrio que se muestran en la ecuación 3.6, para cada trayectoria relevante, donde λ_p denota el multiplicador Lagrangiano asociado con la restricción p para cada trayectoria. La ecuación 3.6 añade el principio económico de equilibrio (el beneficio marginal debería ser igual al coste privado marginal) al primer principio de Wardrop.

$$\begin{aligned} N_p \geq 0; \quad & \sum_{j=1}^J \delta_{jp} (c_j + \delta_j f_j) - D_i \geq 0 \\ \text{y,} \quad & N_p \left(\sum_{j=1}^J \delta_{jp} (c_j + \delta_j f_j) - D_i \right) = 0 \quad \forall p \in \Pi_i \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde: f_j es el nivel de la tarifa en el arco j si $\delta_j = 1$, y Π_i es el conjunto de caminos no cíclicos para cada par i de O-D. Las condiciones de primer orden que se derivan de la ecuación 3.4 son:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial N_p} = \sum_{i=1}^I \delta_{ip} D_i - \sum_{j=1}^J \delta_{jp} \left(c_j + \sum_{k=1}^I \sum_{q=1}^P \delta_{jq} \delta_{kq} N_q c'_j \right) + \sum_{k=1}^I \sum_{q=1}^P \delta_{kq} \lambda_q \left(\sum_{j=1}^J \delta_{jp} \delta_{jq} c'_j \right) - \sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^P \delta_{ip} \delta_{iq} \lambda_q D'_i = 0; \quad \forall p \text{ con } \delta_{ip} = 1 \quad (3.7a)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial f_j} = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \delta_{ip} \delta_{jp} \lambda_p = 0; \quad \forall p \text{ con } \delta_j = 1 \quad (3.7b)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda_p} = \sum_{j=1}^J \delta_{jp} (c_j + \delta_j f_j) - \sum_{i=1}^I \delta_{ip} D_i = 0; \quad \forall p \text{ con } \delta_{ip} = 1 \quad (3.7c)$$

Verhoef (2002), examina las condiciones de primer orden del Lagrangiano para maximizar el bienestar social sujeto a las condiciones de equilibrio para un subconjunto predeterminado de caminos. Este problema se divide en dos partes, la definición de un nivel de tarifa óptima dado un grupo de puntos de cobro y la predicción de la ubicación óptima de los sitios de cobro. El uso y desarrollo de programas computacionales como SATURN y CORDON hacen posible solucionar el problema de los niveles óptimos de la tarifa. Como extensión de CORDON se desarrolló el software LOCATE para escoger la ubicación óptima del punto de cobro. El método requiere perfecta convergencia del problema de asignación ya que cualquier error de convergencia es magnificado por los multiplicadores de Lagrange y por consiguiente, afectará la predicción de la tarifa óptima, May et al. (2004b).

3.5.2 Críticas a la tarificación basada en el coste marginal social

Existe una tensión entre la teoría económica que sugiere la tarificación basada en el coste marginal social como la ruta a seguir y el mundo real que muestra los diferentes inconvenientes para una posible aplicación, entre los que se destacan: los obstáculos de tipo legal e institucional para implementar este tipo de tarificación; los efectos de equidad que causaría esta medida; la baja aceptabilidad pública, las razones encontradas entre políticos y profesionales del transporte y las barreras de la tecnología actual. Investigadores como Rothengatter (2003), critica el enfoque seguido por la CE para fijar una tarifa basada en costes marginales, puesto que éste corresponde a una orientación neoclásica de la economía y que en consecuencia, dicha dirección no puede ser óptima en la práctica por las siguientes razones:

- La medición de los costes marginales sociales en el corto plazo es compleja;
- Se descuidan los efectos de equidad, sobre todo para las personas de bajos ingresos;
- La suposición de un estado benevolente capaz de solucionar todos los problemas;
- Se ignoran los aspectos de financiación;
- Elevados costes administrativos al intentar implementar este tipo de medidas;
- Las distorsiones en el precio en otros sectores de la economía, no se consideran;

- Se producen impactos en el uso del suelo;
- No se consideran tanto los efectos dinámicos de la demanda como las decisiones de inversión y escogencia de tecnología, etc.

Cada una de estas críticas es analizada y respondida por Nash (2003a), quien concluye que las razones de restricción presupuestaria, equidad, objetivos institucionales, simplicidad y distorsiones en los precios en otros sectores de la economía conducen a una necesidad de salir de la pura tarifación del coste marginal social pero no cambia la posición de que la medición del coste marginal social es el punto de inicio correcto para el desarrollo de cualquier política eficiente de tarifación.

3.6 El peaje como instrumento eficaz para gestionar la movilidad

Se debe tener en cuenta que las infraestructuras de transporte tienen una capacidad finita, lo que hace que la congestión sea inevitable, sobre todo en periodos de mayor demanda (mañana y tarde) durante días laborables o en épocas de vacaciones. Algún grado de congestión es deseable, ya que al intentar suprimirla implicaría subutilizar el espacio ya disponible y representaría pérdida de beneficios para la sociedad. Por lo tanto, hay que mantenerla bajo control por el impacto negativo en la calidad de vida que está produciendo en las grandes ciudades, y de ahí que sea necesario hacerse la pregunta *¿cuál es el nivel óptimo permisible de congestión?*

Este nivel *óptimo* de congestión tiende a medirse en un uso eficiente de las infraestructuras, y por ello el compromiso de encontrar el flujo óptimo que permita lograr esa eficiencia. Dentro de las funciones objetivo que persigue la Administración con la instauración de un peaje que controle la congestión se encuentran: la maximización del bienestar social, la maximización de los ingresos y el mejoramiento de la equidad, mientras que para el usuario de la carretera su objetivo particular es la minimización de su coste generalizado del viaje.

3.6.1 Maximizar el Bienestar Social

Los modelos económicos tienden a centrarse en la eficiencia y la introducción de funciones de bienestar que incorporan el principio de Pareto. En la eficiencia de una carretera o una red de carreteras influye la demanda y capacidad de uso, tal que en un territorio en el que existe demanda para una vía de gran capacidad, será eficiente contar con una infraestructura que satisfaga la carencia o insuficiencia de vías entre distintas poblaciones, si, el beneficio social de haberla construido es mayor que sus costes sociales medidos en términos de un análisis coste-beneficio. Cuando existen vías que no son usadas a causa de la escasez de demanda se genera un problema de sobreoferta de infraestructuras, lo que conlleva a una ineficiente gestión de recursos.

Algunos autores señalan que la manera más eficiente de operar una infraestructura viaria es dejando que ésta sea libre de acceso, al menos hasta el punto en el que su uso no lleve a un cierto nivel de congestión. De una forma u otra, la sociedad debe pagar el coste de la infraestructura y este apenas varía marginalmente con su uso, una mayor cantidad de personas se beneficia de ella si no existe la imposición de un peaje,

umentando así el bienestar social. Lo anterior es válido en casos donde haya la posibilidad de un aumento de la capacidad viaria (previo análisis coste-beneficio), pero, como por ejemplo en zonas urbanas y metropolitanas donde resulta difícil y costoso este tipo de medidas, es el peaje (establecido a nivel óptimo, es decir, igualando coste y beneficio social marginal) el instrumento apropiado para la gestión de la demanda y el mantenimiento o mejora de un bienestar social previo a la congestión.

Una forma de obtener el peaje óptimo es establecer como función objetivo para la optimización del sistema, la *maximización del beneficio social neto*, para ello se tiene que la tasa de viajes v_{ij} entre cada par $ij \in W$ es una función que depende del coste generalizado del viaje, es decir:

$$v_{ij} = D_{ij}(C_{ij}) \quad \forall ij \in W \quad (3.8)$$

Donde: C_{ij} es el coste del viaje para ir desde el origen i hasta el destino j y W es el conjunto de pares O-D en toda la red. Existen diferentes rutas entre i y j por lo que C_{ij} está definido por el coste generalizado en la ruta escogida, expresada mediante la ecuación 3.9. En cualquier caso, el conductor optará por elegir la ruta que minimice el coste generalizado del viaje, de ahí que este coste se incluya en la función demanda como $C_{ij} = \text{Min}_r [g_{ij}^r]$.

$$g_{ij}^r = f_{ij}^r + v_t t_{ij}^r + \tau_{ij}^r \quad (3.9)$$

Donde: f_{ij}^r son los costes de operación vehicular (combustible, lubricantes, neumáticos, mantenimiento y reparaciones) dado en (€/viaje, o €/veh-km), v_t es el valor del tiempo (€/veh-h), t_{ij}^r es el tiempo medio que se gasta en realizar el viaje (h) y τ_{ij}^r son los gastos de peaje en que se incurre al viajar por la ruta r entre el par O-D $ij \in W$.

En forma general y tal como se muestra en la figura 3.5, el excedente de usuario (Eu) corresponde al beneficio de viajar (área $OABq^*$) en toda la red y está dado por la expresión 3.10, donde: $D_{ij}^{-1}(\cdot)$ es la función inversa de la demanda $D_{ij}(C_{ij})$ entre el par O-D ij ($\forall ij \in W$), Yang y Huang (1998).

$$Eu = \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (3.10)$$

Al considerar solo el valor del tiempo, se tiene que el coste social total (Cst) en el que incurren todos los usuarios de la red, (área $OEFq^*$) está dada por la ecuación 3.11.

$$Cst = v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a) q_a \quad (3.11)$$

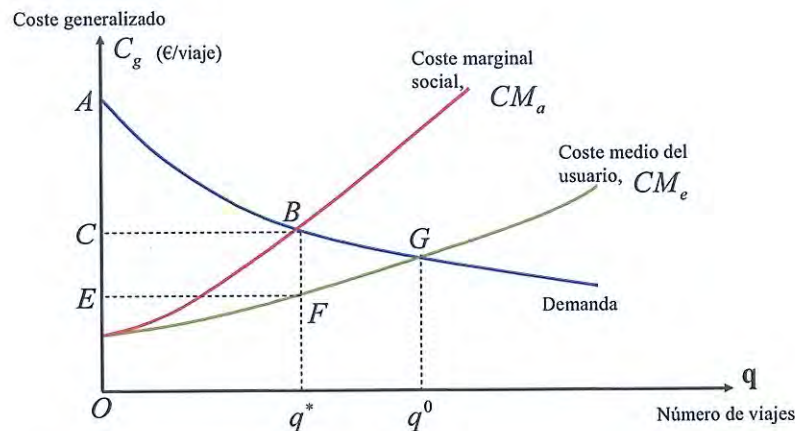


Fig. 3.5. Tarifación basada en costes marginales bajo congestión.

Por ende, el bienestar social neto (BS_T) también llamado excedente social o beneficio económico neto, (área $EABF$) se determina mediante la ecuación 3.12.

$$BS_T = Eu - Cst = \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a) q_a \quad (3.12)$$

Entonces, esta función objetivo busca maximizar el área $EABF$ mediante la aplicación del peaje gestor de la movilidad; es decir se requiere resolver la expresión:

$$\max_{\tau} BS_T = \max_{\tau} \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}(\tau)} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - v_t \sum_{a \in A} t_a(q_a(\tau)) q_a(\tau) \quad (3.13)$$

Sin embargo, mientras la administración busca reducir la congestión planteando como función objetivo la maximización del bienestar social, los usuarios buscan escoger la ruta óptima que minimice el coste del viaje. El problema de reducir este coste generalizado consiste en calcular los flujos en cada una de las diversas rutas que se encuentran en la red, lo cual se convierte en la solución de un problema de equilibrio de demanda o “problema de asignación de tráfico”, donde la noción de equilibrio (en el análisis de redes de transporte) nace de la dependencia que tiene el tiempo (costes) de viaje con respecto al flujo para desplazarse desde un origen i hasta un destino j pasando por los diferentes arcos que conforman una ruta determinada de la red en estudio.

Para solucionar este problema es razonable asumir que cada conductor intenta minimizar sus propios costes de viaje cuando transita entre el par origen-destino ij , pero dado que para las diferentes rutas a elegir, los costes cambian de acuerdo con el flujo que se tenga en cada arco atravesado, la condición estable se alcanza cuando *ningún viajero puede mejorar su tiempo de viaje cambiando de forma unilateral su itinerario de viaje* (primer principio de Wardrop). Esto es lo que caracteriza la condición de *equilibrio de usuario* (UE).

Para alcanzar la condición UE se deben hacer varios supuestos, entre ellos, asumir que todos los conductores poseen una conducta semejante y que disponen de una buena información respecto al coste de viaje en cada posible ruta y que se tome la decisión correcta a la hora de elegir. En estos supuestos se debe hacer una distinción entre el tiempo de viaje que los individuos perciben y el tiempo de viaje actual. El tiempo percibido puede aproximarse a una variable aleatoria distribuida a través de la población de conductores. Es decir, cada conductor percibe un tiempo de viaje diferente sobre un mismo arco. El equilibrio que se logra cuando *ningún conductor cree que su tiempo de viaje puede ser mejorado de forma unilateral cambiando su itinerario de viaje* caracteriza la condición de *equilibrio de usuario estocástico* (SUE), propuesta por Sheffi (1985).

Trabajar con problemas de asignación de tráfico requiere definir una notación para representar la red de carreteras con un grafo dirigido Γ compuesto por un conjunto numerado de nodos N , un conjunto numerado de arcos A y el conjunto W de pares O-D ij (cada nodo i o j representa el origen o final de un viaje) que se unen a través de las distintas rutas en la red. Sean v la matriz de viajes origen-destino, v_{ij} el número de viajes entre el origen i y el destino j durante el periodo de análisis, φ_{ij}^r y g_{ij}^r , significan el flujo y el coste generalizado, respectivamente, sobre la ruta r que une el origen i y el destino j , tal que $r \in R_{ij}$, donde R_{ij} es el conjunto de rutas posibles entre el par O-D $ij \in W$. El problema se plantea dependiendo si la demanda es fija o variable.

Demanda fija

Siguiendo las deducciones de Sheffi (1985) y haciendo las modificaciones respectivas, si el número de viajes v_{ij} entre cada par O-D ij es fijo y conocido, se tiene que el coste generalizado del viaje g_{ij}^r (€/viaje, o €/veh-km) en una ruta particular corresponde a la suma de los costes sobre cada arco que comprende dicha ruta, y se expresa mediante la ecuación 3.14.

$$g_{ij}^r = \sum_a \delta_{ij}^{a,r} g_a \quad (3.14)$$

Donde: $\delta_{ij}^{a,r}$ es la variable binaria lógica que toma el valor de 1 si la ruta r usa el arco a y 0 en caso contrario. Con la expresión 3.15 se determina el coste generalizado g_a que depende de los costes de operación vehicular f_a (combustible, lubricantes, neumáticos, mantenimiento y reparaciones), del flujo q_a y del peaje τ_a en el arco $a \in A_r$, donde A_r es el subconjunto de arcos de la red que tienen peaje talque ($A_r \subset A$).

$$g_a(q_a, \tau_a) = f_a + v_t t_a + \tau_a \quad \forall a \in A_r \quad (3.15)$$

Usando la misma variable binaria, el flujo en el arco q_a se expresa como una función del flujo en la ruta, mediante la ecuación 3.16, que recibe el nombre de *relación de incidencia ruta-arco*.

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} v_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (3.16)$$

El problema de asignación es encontrar el vector de flujos en los arcos \mathbf{q} , que satisfaga el criterio de equilibrio de usuario cuando toda la matriz O-D \mathbf{v} ha sido asignada apropiadamente. Este modelo arco-flujo se obtiene resolviendo el siguiente programa matemático de minimización con restricciones, ecuación 3.17, a la cual se le conoce como transformación de Beckmann:

$$\min z(\mathbf{q}) = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} g_a(\omega) d\omega \quad (3.17a)$$

Sujeto a:

$$v_{ij} = \sum_{r \in R_{ij}} \phi_{ij}^r \quad \forall ij \in W \quad (3.17b)$$

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} \phi_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (3.17c)$$

$$\phi_{ij}^r \geq 0 \quad \forall r \in R_{ij}, \forall ij \in W \quad (3.17d)$$

La ecuación 3.17b representa el conjunto de restricciones para la conservación del flujo, es decir, todos los viajes en la matriz O-D se asignan a la red. La no negatividad de la ecuación 3.17c asegura que la solución del programa matemático sea coherente.

Demanda variable

El problema a solucionar en este caso consiste en hallar los flujos y el coste generalizado en los arcos, además, de la matriz de viajes origen-destino que satisfacen la condición de equilibrio de usuario (UE). En equilibrio, los costes generalizados en las diferentes rutas entre cualquier par origen-destino son iguales y son también menores o iguales que los costes generalizados de las rutas sin usar. Estas condiciones definen el equilibrio de usuario con demanda variable conocido también como problema de equilibrio de usuario con demanda elástica.

Al igual que en el caso de demanda fija, se da que el programa de minimización equivalente al caso de demanda variable tiene una única solución y se plantea mediante el programa matemático 3.18.

$$\min z(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} g_a(\omega, \tau) d\omega - \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (3.18a)$$

Sujeto a:

$$v_{ij} = \sum_{r \in R_{ij}} \varphi_{ij}^r \quad \forall ij \in W \quad (3.18b)$$

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} \varphi_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (3.18c)$$

$$\varphi_{ij}^r \geq 0 \quad \forall r \in R_{ij}, \forall ij \in W \quad (3.18d)$$

Donde: $D_{ij}(\cdot)$ es la función inversa de la demanda asociada con el par origen-destino ij y el vector $\mathbf{q} = (\dots, q_{ij}, \dots)$.

Volviendo a nuestra dificultad inicial de lograr que el uso de la red sea socialmente eficiente, se requiere resolver el siguiente problema anidado: (i) maximizar el bienestar social (*problema de nivel superior*) y (ii) minimizar el coste generalizado de los usuarios (*problema de nivel inferior*). La solución a este objetivo bi-nivel permitiría determinar de forma óptima para toda la red, los arcos a tarifar y la tarifa a cobrar. Esta combinación de funciones objetivo se plasma mediante el problema bi-nivel expresado en las ecuaciones 3.19 y 3.20.

Nivel superior: cuyo objetivo lo define el planificador del sistema de transporte

$$\max B_{S_T} = \max_{\tau} \sum_i \sum_j \int_0^{v_{ij}(\tau)} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega - \sum_{a \in A} t_a(q_a(\tau)) q_a(\tau) \quad (3.19)$$

Nivel inferior: que representa el comportamiento de los usuarios en la red de transporte modelizada mediante un problema de asignación de tráfico. Para resolver este problema se requiere determinar las funciones $q_a(\tau)$, $\forall a \in A$ y $q_{ij}(\tau)$, $\forall ij \in W$.

$$\min z(\mathbf{d}, \mathbf{q}) = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} g_a(\omega, \tau) d\omega - \sum_i \sum_j \int_0^{q_{ij}} D_{ij}^{-1}(\omega) d\omega \quad (3.20a)$$

Sujeto a:

$$q_{ij} = \sum_{r \in R_{ij}} \varphi_{ij}^r \quad \forall ij \in W \quad (3.20b)$$

$$q_a = \sum_i \sum_j \sum_r \delta_{ij}^{ar} \varphi_{ij}^r \quad \forall a \in A, \forall ij \in W \quad (3.20c)$$

$$\varphi_{ij}^r \geq 0 \quad \forall r \in R_{ij}, \forall ij \in W \quad (3.20d)$$

Para descubrir la solución a este problema bi-nivel (expresiones 3.19 y 3.20), resulta necesario su modelización como un problema aplicado de la planificación del transporte para que sea aceptado por la gran mayoría de su sociedad. En este caso, el uso de la *teoría de juegos no cooperativos*, permite formular un modelo que represente las complejas interacciones que se dan entre los diversos agentes participantes del mercado del transporte, cada uno de ellos con objetivos propios diferenciados. Los modelos de equilibrio aparecen como resultado de estas interacciones y su formulación matemática se fundamenta en modelos de optimización, desigualdades variacionales o formulación de tipo punto fijo, Codina et al. (2003).

Dos tipos básicos de equilibrio se presentan; el denominado equilibrio de *Cournot-Nash* y el equilibrio de *Stackelberg* (Stackelberg (1952), Baar y Olsder (1982)).

En el equilibrio de *Cournot-Nash* cada jugador o agente participante intenta maximizar su utilidad de forma no cooperativa, asumiendo como conocidas las decisiones del resto de jugadores. El equilibrio se alcanza cuando ningún jugador puede mejorar su utilidad mediante cambios unilaterales. Los modelos de asignación de tráfico en equilibrio o de asignación de usuarios en sistemas de transporte público son ejemplos de este tipo de equilibrio.

En el equilibrio de *Stackelberg* existe un jugador especial denominado *líder*, que al proponer su estrategia puede conocer las reacciones que harán el resto de jugadores, los cuales se designan como *seguidores*. El líder puede elegir su estrategia dentro de un cierto conjunto independientemente de las estrategias de sus seguidores, mientras que cada seguidor puede seleccionar una estrategia dentro de un conjunto de ellas parametrizadas por la elección efectuada por el líder. La estrategia de un seguidor depende de la estrategia del líder, y además su utilidad depende tanto de las estrategias de los otros seguidores como de la del líder.

Muchos de los problemas de planificación y de diseño de redes de transporte urbano son formulados mediante un problema de equilibrio de *Stackelberg*, porque su estructura jerárquica es adecuada para reflejar el proceso de toma de decisiones. Los operadores del sistema (líder) planifican o diseñan el sistema de transporte teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios (seguidores) ante sus políticas de gestión o inversión. En el nivel superior se minimizan los costes (sociales, económicos, ambientales, etc.) derivados de las políticas de los operadores, mientras que en el nivel inferior se describe el comportamiento de los usuarios en el sistema de transporte intervenido.

La formulación matemática de los juegos de equilibrio de *Stackelberg* es conocida como *programas matemáticos con restricciones de equilibrio* (MPEC). Un MPEC es un modelo de optimización en el que cierto conjunto de restricciones están definidas mediante una desigualdad variacional.

En este programa matemático con restricciones se distinguen dos problemas anidados: el de optimización, que recibe el nombre de problema exterior o problema del nivel superior y el problema de la desigualdad variacional, al que se le denomina problema interior o problema del nivel inferior. El término *restricciones de equilibrio* hace referencia a que las desigualdades variacionales modelizan ciertos equilibrios que

aparecen en problemas de economía e ingeniería, como es el caso de equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte.

En este sentido, Hearn y Ramana (1998), proponen un enfoque para definir el número mínimo de arcos con peaje para alcanzar un sistema óptimo usando MPEC, Zhang y Yang (2004), formulan un modelo de programación matemática (cuya solución está basada en un algoritmo genético) para determinar las tarifas, al igual que la localización óptimas del cordón.

3.6.2 Generación de ingresos

La generación de ingresos es uno de los objetivos primordiales que se busca con la implantación de una estrategia de *road pricing*. Los tres anillos de peaje noruegos se diseñaron específicamente para generar ingresos que ayudarían al financiamiento de infraestructuras de transporte. Los costes de la implantación de un esquema de *road pricing* son elevados, de ahí que se requiera estimar el recaudo bruto que se obtendría durante la aplicación de la medida. En la tabla 3.3a y 3.3b se muestra la estimación de los costes e ingresos al tarifar la congestión en Londres en la parte central como en la zona ampliada.

Tabla 3.3a. Estimación de los costes e ingresos para la implementación de la tarifa por congestión en Londres. (Fuente: Transport for London, 2003).

Estimación de costes e ingresos. Año 2003/2004 (£ millones)	
Costes de inversión inicial	180
Costes de operación (se reduce en los años siguientes)	97
Total de ingresos brutos	165
Ingresos netos	68

Tabla 3.3b. Estimación de los costes e ingresos para la ampliación de la tarifa por congestión en Londres hacia la zona oeste. (Fuente: Transport for London and GLA Economics, 2005).

Estimación de costes e ingresos para la ampliación oeste	
Costes del sistema	£115-125 millones
Costes de nuevos contratos	£20-30 millones
Costes de operación	£27-33 millones/año
Costes adicionales de buses	£11-16 millones/año
Costes de resistencia al cobro	£5-10 millones/año
Ingresos netos de operación del esquema	£30-50 millones/año

La experiencia de Londres señala que aunque los costes y los ingresos de la tarifa por congestión no han alcanzado las predicciones, el recaudo neto ha sido positivo. La disuasión del uso del coche fue lo suficientemente alto para lograr una reducción de los

ingresos previstos. Sin embargo, se ha alcanzado un claro beneficio neto al estimar los costes y el beneficio social. Los costes sociales considerados incluyen los costes administrativos, costes de operación del esquema, costes de implantación, costes de gestión del tráfico y costes de cumplimiento del usuario que paga. Los beneficios incluyen ahorros en tiempo y fiabilidad, reducción de accidentes, emisiones de CO₂ y otros relacionados con la disminución del tráfico. Aunque los beneficios netos son positivos, los costes operacionales del programa son altos y si se anticipan dan lugar para posibles mejoramientos de eficiencia.

Se debe tener en cuenta que el diseño de un esquema de tarificación para maximizar ingresos es muy diferente del diseñado para maximizar eficiencia económica; este último busca reducir el uso del vehículo, mientras que el primero es más adecuado para mantener los flujos de los vehículos que son tarifados. En parte, esto explica por qué los precios de las elasticidades de los anillos de peaje noruegos son más bajos que los de Singapur (May y Milne, 2000).

La aplicación de un esquema tarifario como objetivo para gestionar la demanda permite identificar la voluntad a pagar por parte de los usuarios a cambio de disponer de ciertos beneficios “valor social” por el uso de la carretera tales como ahorros en tiempo, fiabilidad en la predicción de la duración del viaje, seguridad, etc. Pero para disuadir las barreras de aceptabilidad tanto pública como política, se requiere especificar dentro del sector del transporte los propósitos del recaudo que se obtendrá y los beneficios que recibirían aquellos que pagan las tarifas.

Los aspectos más investigados en virtud del uso de los ingresos, según Ricci et al. (2006), son los impactos en la equidad, los efectos de la descentralización de la tarificación y las decisiones sobre el uso de ingresos entre los distintos niveles del gobierno y otras instituciones (incluidos los administradores de infraestructuras privadas y las asociaciones público-privadas). Las investigaciones indican que el impacto en la equidad y en la eficiencia económica depende de la forma de utilizar los ingresos. Además, las decisiones que debe afrontar el gobierno en cuanto a la estructura tarifaria y el valor de la tarifa (niveles máximos y mínimos, descuentos, excepciones, etc.), influye también en la eficacia de la medida, puesto que los gobiernos tienden a ignorar los efectos secundarios fuera de la zona que les atañe.

Para la captación de los ingresos se requiere establecer un órgano independiente de la Administración con poder legal para recaudar y distribuir los ingresos de acuerdo con los proyectos establecidos antes de la entrada en vigor de la medida tarifaria.

El recaudo captado puede reinvertirse en: innovación y mejoramiento del servicio del transporte público, construcción y mantenimiento de la infraestructura, disminución de impuestos, fortalecimiento de otros modos, abonos de transporte para las personas que modifican su conducta de viaje, etc. Según el uso de los ingresos, se tienen importantes implicaciones sobre la eficiencia, la equidad y la aceptabilidad.

Respecto a la *eficiencia*, no hay una garantía de que el gasto en proyectos de transporte sea la forma más eficiente de reinvertir el recaudo obtenido, puesto que la teoría clásica indica que hipotecar fondos para los presupuestos de transporte puede conducir a una

pérdida de eficiencia, en el sentido de que se requiera realizar una serie de proyectos que no maximizan el bienestar social. No obstante, en un sistema con distintos niveles de gobierno (Europeo, nacional, regional), los gobiernos de niveles inferiores no valoran los efectos de sus decisiones sobre el resto del sistema fuera de su área de competencia. Por ejemplo, los gobiernos pueden seleccionar los proyectos locales que favorezcan más al tráfico de paso. En lo concerniente a la *equidad*, no hay ninguna razón para suponer que el destino del recaudo la mejorará, aunque puede haber casos concretos es que si por ejemplo, al asignar los ingresos procedentes del autobús en medidas prioritarias para el autobús en lugar de medidas que beneficien a los viajeros del ferrocarril. Los argumentos de la equidad se destinan a indicar que los que pagan son los llamados a obtener los beneficios de su dinero. En general esto podría ser justo, si la actual distribución de los ingresos fuera justa.

Por último, la implantación de una medida tarifaria se verá reforzada si goza de *aceptación pública*, o sea, una mayoría de población que la apoye. La asignación del excedente de ingresos en el mejoramiento del transporte (por ejemplo en proyectos que mejoren la accesibilidad de modos alternativos, tal como se hizo con los anillos de peaje en Noruega y la tarifa por congestión de Londres) es un método que disminuye los efectos nocivos que se producen sobre los usuarios que ven incrementados sus gastos en peajes, Ricci et al. (2006).

3.6.3 Mejorar la equidad

Uno de los grandes inconvenientes de implementar una tarifa que administre la congestión es su impacto potencial en la equidad. De acuerdo con Riera y Nájera (1999) es un término difícil de manejar en economía, puesto que no existe una definición clara, operativa y única de aceptación general, lo que puede ser equitativo para unos puede no serlo para otros. Una determinada política de transporte será equitativa si es justa y comporta igualdad de oportunidades, esto significa que, si individuos con las mismas características relevantes, como el nivel de renta, reciben los mismos privilegios o si grupos sociales o personas beneficiadas compensan a aquellos que son perjudicados.

Las tipologías más usadas de la equidad son la vertical y la horizontal. La *equidad vertical* favorece una distribución hacia los individuos con menor renta, con el propósito de disminuir las desigualdades en este aspecto. En el caso de aplicarse una tarifa por congestión habría que estudiar el impacto en los diferentes grupos de población clasificados por nivel de ingresos, acceso al vehículo privado, género, etc. En cuanto a la *equidad horizontal* que hace referencia al impacto en equidad espacial, el cual indica la distribución de los costes y beneficios del esquema tarifario a través de la población en zonas diversas de la red de carreteras.

Sumalee et al. (2005), consideran la distribución geográfica de beneficios cuando se impone un esquema tarifario para controlar la congestión y adoptan el *coeficiente de Gini* para medir la distribución espacial de los cambios de bienestar y que se determina mediante la expresión 3.21.

$$G = \frac{1}{2D^2 \bar{B}} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W D_i D_j \left| \hat{B}_i - \hat{B}_j \right| \quad (3.21)$$

El cambio en el bienestar social \hat{B} para cada par de origen-destino ij (comparado con el escenario base, es decir cuando no se aplica peaje por congestión) lo usan para medir el impacto de la distribución espacial. En esta expresión, \hat{B} indica el mejoramiento del bienestar social comparado con el escenario base, D es la demanda total en el escenario base, W es el número de pares origen-destino en la red, ij son los índices del par origen-destino y \bar{B} es el valor medio de \hat{B} .

El coeficiente de Gini está entre 0 y 1, donde, cuanto más se acerque a cero indica mayor equidad entre viajeros desde distintas zonas de la red y cuanto más se acerque a uno indica menor equidad.

Safirova et al., (2004), señalan que los efectos causados por una tarifa para disminuir congestión tanto en la equidad horizontal como vertical son el mayor obstáculo para su implantación. Lo que más preocupa en este tipo de medidas es que las personas con menor nivel de ingresos resultan ser los más perjudicados y peor aún si se cobra una tarifa igual e independiente de la renta. Varias investigaciones han abordado este tema e indican que para poner en marcha una estrategia tarifaria que gestione la movilidad, los ingresos que se perciben por peajes deben reinvertirse bien sea en disminución de impuestos, inversión en carreteras o en transporte público y de esta forma compensar a los potenciales perdedores.

Ganadores como perdedores de una política tarifaria cruzan las diferentes zonas para ir desde un origen i hasta un destino j del entorno metropolitano, de ahí que los efectos en la equidad horizontal jueguen un papel importante en la posible consumación de dicha política, ya que si se presenta un gran número de zonas que se benefician de la medida, al ser mayoría formarían una coalición de apoyo para su implantación.

En cuanto al efecto que una tarifa por congestión tiene sobre la equidad vertical es gobernada por dos factores que trabajan en dirección opuesta: las personas de mayores ingresos son más propensos a usar sus coches y por lo tanto pagarían más en impuestos, pero a la vez, tienen un beneficio desproporcionado al disminuirse la congestión, ya que ellos valoran mucho más el tiempo. De hecho bajo ciertas condiciones, los grupos con mayores ingresos pueden resultar más favorecidos (por ejemplo, el coste del tiempo ahorrado puede ser mayor que lo que paga en impuestos) mientras que las personas con menores ingresos resultarían más perjudicados (Small, 1983). Sin embargo, una clara y eficiente reinversión del recaudo que se obtenga puede favorecer a los diferentes grupos sociales (Small, 1992).

La implantación de *road pricing* produce un excedente de bienestar neto. Aunque esto es cierto (siempre y cuando el esquema tarifario esté bien diseñado sistema, puesto que las tarifas deben ser cercanas a la óptima "*first-best*" y que el sistema no produzca un congestión fuera del área tarifada o que su funcionamiento no sea tan costoso tal que

consume el recaudo captado), este solo argumento no puede ser particularmente convincente en un mundo real, si se descuidan los efectos de la equidad (efectos distribucionales), Eliasson et al., (2006).

Eliasson et al., (2006), indican que los efectos sobre la equidad son importantes por al menos dos razones: (i) la magnitud de la redistribución entre diversos grupos puede ser tan grande que se subvalore el beneficio neto de la reforma. En aplicaciones reales, los efectos distribucionales pueden ser tan grandes que las ganancias de eficiencia que produce la tarificación de la congestión son vistas como que no valen la pena. Esto es especialmente probable que suceda si los niveles de congestión iniciales son bajos o la demanda es relativamente inelástica. (ii) la tarificación de la congestión puede ser regresiva, o tener otros efectos adversos sobre la equidad. Si este es el caso, dependería de la calidad de los otros modos disponibles y del diseño de las tarifas por congestión.

Con base en lo anterior, Eliasson et al. (2006), concluyeron que para evaluar cualquier propuesta real de un esquema tarificación de la congestión, es crucial:

- Investigar los efectos distribucionales;
- Considerar el impacto de los posibles usos del recaudo que se obtenga, e incluirlos en el cálculo de los efectos distribucionales;
- Comparar la magnitud del excedente de bienestar neto con el total de los efectos distribucionales.

Existen varios estudios relativos a estos temas, para mayor información ver Arnott et al. (1994), Glaizer y Niskanen (2000), y Small (1983). De estos estudios se concluye que los efectos de equidad depende generalmente del diseño del sistema tarifario (cuándo y dónde se cobran las tarifas) y diferencias socioeconómicas en patrones de viaje (por ejemplo, la escogencia de modo y destino, difiere entre grupos de distinto nivel de renta). Por otro lado, los modelos de tráfico que se emplean para evaluar las implicaciones que tienen las tarifas sobre el tráfico no se aprovechan para evaluar los impactos socioeconómicos, y finalmente, los actuales estudios tratan exclusivamente sobre la distribución de los costes y beneficios entre los grupos de diferente renta y no consideran otras dimensiones, tales como la distribución de costes y beneficios según el género, áreas residenciales y tipos de hogares.

La mayoría de investigaciones se han preguntado si la tarificación de la congestión beneficiaría a pobres o a ricos. Varios estudios han llegado a conclusiones diversas. Todo depende de los supuestos tomados acerca de las preferencias y conducta de viajes de los grupos y qué efectos se toman en cuenta durante la modelación.

En muchos estudios se argumenta que la tarifa por congestión sería regresiva, puesto que, las personas con alto nivel de renta valoran mucho más el tiempo y por ello el ahorro en tiempo que obtengan lo equiparan a la tarifa (Arnott et al., 1994 y Small, 1983). Por otra parte, las personas con pequeños márgenes económicos sufrirían más por la aplicación de este tipo de tarifas. Además, generalmente ellas tienen menores posibilidades para decidir sobre su tiempo para trabajar y no podrían evitar el pago de la tarifa durante las horas punta. Asimismo, es probable que vivan más lejos del corazón de la ciudad y su destino se localice fuera del centro de la ciudad en áreas donde el

transporte público es deficiente; mientras que si la inversión en carreteras no es sufragada por las tarifas se tendrían que financiar a través de impuestos y puesto que las personas con mayor renta pagan más impuestos, entonces este grupo de personas sobrellevarían la mayor parte al aplicarse esta medida tarifaria (Arnott et al., 1994).

Sin embargo, otros estudios argumentan que las personas con menos ingresos serían los más beneficiados de la tarifa por congestión. La mayoría de los argumentos se establecen desde el contexto Americano donde el coche es el modo de transporte predominante. La situación es diferente en muchas ciudades típicas Europeas, donde los ciudadanos tienen acceso a más transporte público y a modos “más lentos” sobre todo durante las horas punta. Cuando se debe escoger entre un modo rápido (coche) y un modo lento (transporte público), un peaje que incremente el bienestar es probable que sea sobre el modo rápido debido a que los que usan este modo regularmente son los que tienen más dinero, en este sentido tales peajes serían progresivos (Glaizer y Niskanen, 2000). Ya que las personas de menor renta usan mucho más el transporte público, no solamente serían los menos afectados por la tarifa sino que también resultarían más beneficiados si el recaudo de los peajes se destina a mejoramiento del transporte público (como es lo que generalmente se propone con al menos, una parte del recaudo). Otros estudios (hechos para ciudades Europeas) indican que las personas con mayores ingresos conducen mucho más y generalmente su destino es el centro de la ciudad donde la congestión es mayor. Igualmente, es probable que vivan dentro o cerca del centro y en consecuencia no podrían evitar la tarifa o escoger rutas alternativas. De nuevo, este argumento presupone una distribución geográfica “Europea” de los distintos grupos de renta, con el rico ubicado cerca al centro de la ciudad. Algunos argumentan que la tarifación de la congestión también disminuye el desarrollo hacia una sociedad más dependiente del coche, con lo cual se favorece a las personas de menores ingresos quienes son los menos probables que tengan coche, Eliasson et al., (2006).

Siguiendo en esta línea que señala a las personas con mayor nivel de renta como los más afectados por usar más el coche y además porque es probable que vivan en áreas con deficiente servicio de transporte público. El efecto neto si todos los ingresos fueran divididos igualmente sería que las personas con menor renta saldrían más beneficiadas. Estos cálculos aún son inciertos, puesto que los modelos usados no consideran las diferencias en valores del tiempo y los efectos de la hora de salida para realizar el viaje. De hecho hay estudios teóricos centrados únicamente en la hora de salida que indican que las personas con mayor renta resultarían más beneficiadas que los de menor renta, dado que estos distribuyen el recaudo de forma igual, Arnott et al., 1994.

Estos diversos puntos de vista evidencian la dificultad de llegar a unas conclusiones claras sobre los efectos distribucionales que produce la tarifación de la congestión. Lo común de todos los estudios es que las diferencias en los beneficios directos y los costes entre los grupos de renta son pequeñas. Lo cual es importante para el objetivo de la equidad ver cómo los beneficios de los diferentes grupos provienen del uso del recaudo.

