

Sistema tarifario de las carreteras españolas en base a un modelo de costes sociales

Floriea Di Ciommo, José-Manuel Vassallo, Pedro Pérez, Andrés Monzón
Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT) Universidad Politécnica de Madrid,
Escuela de Caminos, Canales y Puertos

RESUMEN

La política de precios de transporte de la Unión Europea se apoya en la hipótesis de equilibrio demanda –oferta en un mercado, si el precio/tarifa es igual al coste marginal, en este caso social, incluyendo los costes externos de utilización de la carretera. En otros términos, si el coste marginal social determina el precio, el usuario tiene un incentivo para elegir qué modo de transporte es el más conveniente para él, o qué carretera le conviene utilizar. De este modo, se propone una política de tarifación variable en función de la demanda que integre los costes externos y de congestión. La introducción de este tipo de tarifación, basada en los costes marginales sociales, regularía la demanda y representaría un incentivo para un uso correcto de las carreteras (Nash 2005).

Actualmente, en España no existe una tarifación de carreteras fundada en los costes marginales. Sino que los usuarios de la carretera se enfrenten a varios tipos de impuestos y peajes establecidos en función de objetivos fiscales y de financiación de las infraestructuras, en vez de estar sujetos a un sistema de tarifación óptimo, basado en el cálculo de los costes marginales sociales. Este artículo desarrolla un modelo de costes, calibrado según las características de las carreteras y la composición del tráfico en España, cuya variable de entrada es la intensidad horaria. El resultado principal de la aplicación de este modelo de costes es la existencia de un valor igual y óptimo, combinación de la intensidad y velocidad, que minimiza el coste marginal interno y el coste marginal social. Como consecuencias se puede establecer un sistema de tarifas variable según tipología y características de las infraestructuras y la demanda.

1. INTRODUCCIÓN

La Política Común de Transportes busca impulsar el mercado interior de transporte, mejorando la competencia entre servicios y entre modos. Pero este objetivo pasa por el establecimiento de un sistema de tarifario común. En este sentido, la Comisión Europea lanzó el Green Paper “Hacia una tarifación equitativa y eficaz del transporte” (1995), apoyado en múltiples proyectos de investigación en los Programa Marco de I+D. Para marcar las líneas de acción, la UE emitió el informe “Tarifación equitativa del uso de las infraestructuras” (1998), donde se establece una estrategia de implementación de la tarifación común según los costes marginales sociales, incluyendo la recuperación de costes de operación y los

medioambientales. Para la financiación de infraestructuras y casos especiales se admite la posibilidad de establecer tarifas duales: una parte sería fija –viñeta, tasa de acceso, etc.- y la otra variable, por tramos, de acuerdo con los costes marginales.

La introducción de un modelo de tarifación basado en los costes marginales para las carreteras busca provocar moderados, pero significativos, cambios en el comportamiento de sus usuarios. La reducción de demanda mejoraría la congestión y otras externalidades, sobre todo en tramos de carreteras metropolitanos. En algunos casos, como el *congestion charging* de Londres, se ha observado que pequeñas reducciones de la demanda suponen una importante reducción del nivel de congestión. Los efectos positivos de los peajes y la consecuente reducción de la demanda se reflejan en el flujo de tráfico, a su vez relacionado con la disminución de la congestión, en el aumento de los ingresos por el estado y, en general, en el ahorro de tiempo (Nash 2003).

Según la teoría económica, para maximizar la eficiencia social el precio de uso de las carreteras (tarifas) tendría que incluir los costes adicionales derivados de su uso por parte de los usuarios (deterioro del firme, retraso para los otros usuarios, aumento del riesgo de accidentes y costes ambientales en general). Estos constituyen los “costes marginales externos”. Si se les añaden los costes directamente soportados por el usuario (sobre todo combustible y tiempo), se obtienen los “costes marginales sociales”. Sólo cuando los usuarios asumen estos costes pueden elegir de modo óptimo su viaje (modo y trayecto) (Nash et al. 2005 y 2007). Desde este punto de vista, se trata de definir un modelo de tarifación capaz de desplazar la curva de demanda del punto de equilibrio precio o tarifa = coste marginal interno (CMI), al punto de equilibrio precio o tarifa = coste marginal social (CMS).

2. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE COSTE DE CARRETERAS ESPAÑOLAS.

Debido a la existencia de costes externos y congestión, los usuarios de una infraestructura no siempre internalizan los costes que producen. En consecuencia, la determinación de las tarifas exige llegar a una aproximación lo más precisa posible a las funciones de costes marginales sociales y costes asumidos por los usuarios para, en función de la demanda, poder calcular las tarifas justas. El modelo de costes desarrollado en el proyecto META (Modelo Español de Tarifación de carreteras), de la convocatoria CEDEX del Plan Nacional de I+D, constituye una herramienta que permitirá calcular los costes totales, medios y marginales para establecer una tarifa óptima, en cada tramo.

2.1 Las hipótesis de partida y simplificaciones necesarias

La primera hipótesis consiste en reducir los tipos de vehículos a cuatro tipos representativos de su categoría que suponemos que van a ser los únicos que circulan por la sección. A partir de un análisis de los datos del Ministerio de Fomento del 2005 sobre el parque español de vehículos y de un examen de la incidencia de la composición del tráfico sobre el conjunto de los costes sociales, se definen cuatro categorías de vehículos tipo a efectos de este trabajo:

Tipo 1: vehículo ligero diesel con motor de 2 litros.

Tipo 2: autobús de dos ejes con carga máxima transportable de 18 toneladas.

Tipo 3: camión rígido de 18 toneladas.

Tipo 4: vehículo articulado de más de 4 ejes que podría transportar hasta 40 toneladas.

Esta definición de vehículos se ha llevado a cabo en función de la importancia del vehículo en el sistema del transporte. A título de ejemplo, los vehículos articulados de más de 4 ejes, constituyen solo el 5,7% de tráfico pero mueven el 60% de las mercancías en toneladas y hasta el 80% de las toneladas-km. Por otro lado, a estos vehículos se les atribuye un 58% del deterioro del firme y un 70% de las emisiones de CO₂. El hecho de distinguir entre varios vehículos tiene la finalidad de valorar su contribución marginal a los costes del transporte y, en consecuencia, determinar la tarifa óptima para cada uno de ellos.

Una segunda hipótesis es suponer que el tipo de carretera es una autovía de doble calzada de dos carriles. Se supone que es un tramo llano y en recta, y que es de un firme bituminoso adecuado al tráfico previsto según la norma española. El 90 % de la red de autovías y autopistas españolas (Ministerio de Fomento, 2008) corresponde a esta hipótesis. La función de costes a obtener será función del número de vehículos-kilómetro de una sección de un kilómetro en una hora (veh/h). Esta es una medida de la intensidad horaria que tiene una relación directa con la IMD. Esta variable será la base del modelo de costes y va a permitir medir el conjunto de los costes sociales que están relacionados con la velocidad y el tiempo.

2.2 Costes considerados y su formulación

La metodología a aplicar tiene como primer objetivo definir la función de costes totales C para, a partir de ahí, derivar las funciones de costes marginales. La función de costes totales se expresa en función de las intensidades horarias de los diferentes tipos de vehículos definidos previamente, tal y como señala la siguiente expresión:

$$C = C(I_1, I_2, I_3, I_4) \quad (1)$$

La función de costes totales será la suma de los costes de infraestructura, los costes de operación, los costes medioambientales y los costes de los accidentes.

$$C = C_I + C_O + C_{MA} + C_A \quad (2)$$

Cada una de las partes de la función anterior dependerá a su vez de las intensidades I_1, I_2, I_3 e I_4 de los diferentes tipos de vehículos. El coste marginal, para cada tipo de vehículo, se obtendría derivando la función anterior con respecto a la intensidad de este tipo de vehículo:

$$C'_1 = \frac{\partial C_T(I_1, I_2, I_3, I_4)}{\partial I_1} \quad (3)$$

Las unidades de este coste marginal serán (€/veh×km). La diferencia entre el coste marginal y el coste asumido por cada vehículo dará como resultado la tarifa que deberá cobrarse en cada momento para lograr la máxima eficiencia.

3. DESARROLLO DEL MODELO DE COSTES

Para determinar la diferencia entre el coste marginal asumido por el usuario y el coste

marginal social, se desarrolla un modelo de costes midiendo, por un lado, los costes de combustible, tiempo, cambio climático, contaminantes, ruido y accidentes, que dependen de la relación intensidad/velocidad, y consecuentemente de la relación intensidad/capacidad en la carretera. Cuando la carretera se encuentra en niveles de congestión, la entrada de un vehículo adicional da lugar a un coste marginal superior al coste que ese vehículo internaliza. La diferencia entre esos dos costes es lo que da lugar a la externalidad de congestión.

Así se explica que velocidad del flujo de tráfico disminuya cuando aumenta la intensidad de tráfico. Esta relación es fundamental para estimar las funciones de costes de operación ya que tanto el tiempo, como algunos costes de los vehículos (especialmente el consumo de carburante), dependen directamente de la velocidad. En una primera aproximación del modelo, hemos optado por la forma funcional más simple, una recta cuyos parámetros varían con respecto a la relación intensidad- capacidad de la carretera y a las condiciones del tráfico (proporción tráfico hora punta dirección punta, porcentaje IMD en hora punta, numero de carriles por sentido, velocidad máxima en flujo libre y densidad máxima).

$$V = f(I) = b - b_1 I \quad (4)$$

Los resultados del modelo de costes simplificado, con esta aproximación lineal, coinciden con los de una aproximación más fina, como la parabólica, propuesta por el Manual de Capacidad Americano (2000).

3.1 Costes de operación

Los costes de operación y tiempo se encuentran íntimamente ligados al uso y circulación de los vehículos. Incluyen la amortización de los vehículos, el coste de mantenimiento de los vehículos, el coste de las reparaciones, los costes de administración, los costes salariales y los costes de carburante. Los dos costes más importantes de todos ellos, son el coste de carburante y el coste del tiempo (salario, valor del tiempo, VOT). Ambos están relacionados con la velocidad. La función de consumo de combustible puede asemejarse a una función polinómica de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Consumo}}{\text{Kilómetro}} = a_0 + \frac{a_1}{V} + a_2 V^2 \quad (5)$$

Se acepta la hipótesis que el conjunto de los costes independientes de la velocidad (amortización, mantenimiento, reparación y administración) son constantes y, en la función de costes totales de los vehículos se representan a través la constante K_0 . Por lo tanto, la función de coste de operación por el tipo de vehículo "i" en su conjunto será:

$$C_i = K_0 + a_0 + \frac{a_1}{V} + a_2 V^2 + (1/V) S^h \quad (6)$$

Donde t es igual el tiempo de recorrido de 1 km. y se representa con la función inversa de la velocidad horaria y S^h corresponde al salario horario medio regional utilizado como valor del tiempo.

Asumiendo las funciones lineales de correspondencia velocidad-intensidad que resultan de las

estimaciones británicas y substituyendo V con su expresión en función de la intensidad, se obtiene:

$$C_{ov} = K_0 + a_0 + \frac{a_1}{b - b_1 I} + a_2 (b - b_1 I)^2 + \frac{1}{(b - b_1 I)} S^h \quad (7)$$

3.2 Cambio climático, contaminantes, ruido y accidentes.

Los costes de cambio climático están fuertemente influenciados por el valor de la tonelada de CO2 y determinados por el tipo de intensidad de tráfico y el consumo de combustible.

Entonces, el coste de cambio climático en €/hora en la sección estudiada de 1 km. queda representado por la siguiente ecuación:

$$C_{CO2} = CO2 * K \cdot \sum_{i=1}^{i=4} I_i \cdot C_i(v_i) \quad (8)$$

siendo I_i la intensidad horaria de vehículos (veh/h) del tipo i ; $C_c(v_i)$ consumo de combustible en función de la velocidad para el tipo de vehículo i , C_{CO2} , el coste de CO2; K representa la relación emisión y consumo (Friedrich and Bickel 2001).

El coste de contaminación atmosférica depende de la población, de la emisión media, que en España sería 40 mg/m^3 , de los nuevos casos de enfermos atribuibles a la contaminación y más, en general, a los costes que la contaminación ocasiona a la salud. Al final, el coste de contaminación anual debida al tráfico vendría dado por la siguiente ecuación:

$$C_{\text{contaminación}} = \frac{P_t * \phi * \sum_{i=1}^m n_i c_i}{10} \quad (9)$$

donde P_t es la población total de España (43,2 millones, 2004), ϕ , valor medio de las inmisiones de PM10; n_i , el número de nuevos casos por millón de habitantes y del efecto sobre la salud humana i ($i=1,..8$) que aparecen como consecuencia de un nivel de PM10 de $10 \mu\text{g/m}^3$ en un año; c_i , costes por caso nuevo que la contaminación atmosférica ocasiona en la salud humana y del efecto sobre la salud humana i ($i=1,..8$).

El impacto que el incremento del volumen de tráfico tiene en el aumento del nivel de ruido es más alto al principio; los incrementos sucesivos de intensidad horaria producen un crecimiento menos que proporcional del ruido, con una tasa de pesados constante. El impacto bajo, que un cambio del volumen de tráfico tiene en el nivel de ruido queda expresado por una función de forma logarítmica:

$$L_{eq} = a + 10 * \log(I / h * (1 + b * p)) \quad (10)$$

donde L_{eq} es el nivel básico equivalente de ruido, p , es el reparto del transporte de mercancías, a y b , son parámetros específicos para el modo de transporte por carretera. Según las estimaciones de Weinberger (1991), un incremento del 10% en el volumen de tráfico implica un 0,5% de aumento en los niveles de ruido.

El coste por veh-km por accidentes depende de la intensidad horaria y se determina según los ratios de heridos leves, graves y mortales, el valor del riesgo de los heridos y el coste médico. Su forma funcional sería:

$$C_{acc} = I/h \times (R_{hl} \times VR_{hl} + R_{hg} \times VR_{hg} + R_m \times VR_m + \varphi) \quad (11)$$

donde, I/h , intensidad horaria en veh/hora, R_{hl} , es el ratio de heridos leves por vehículos kilómetro el cual varía en función de la I/h , VR_{hl} , valor del riesgo de los heridos leves, estimado para España en función del PIB por habitante constante igual a 12.100 € por herido leve (UNITE 2003), R_{hg} , es el ratio de heridos graves por vehículos kilómetro el cual varía en función de la I/h , VR_{hg} , valor del riesgo de los heridos graves, estimado para España en función del PIB por habitante constante igual a 157.300 € por herido grave (UNITE 2003), R_m , es el ratio de muertos por veh-km el cual varía en función de la I/h , VR_m , valor del riesgo de los muertos, estimado para España en función del PIB por habitante constante igual a 1,21 M€ por muerto (UNITE 2003), φ , pérdidas de capital humano, costes médicos, costes administrativos y daños a la propiedad contabilizados como externos, constante independiente de la I/h y que adopta el valor medio de 0,009 € por vehículo kilómetro (UNITE 2003).

El valor del riesgo representa, en términos cuantitativos, el componente más importante de los costes por accidente y adopta en nuestro caso el valor de 1,21 M€ para los muertos (valor de la vida estadística), 157.300 € para los heridos de gravedad (13% del valor de riesgo de los muertos), y 12.100 € para los heridos leves (1% del valor de riesgo de los muertos).

3.3 Costes de deterioro del firme

Debido a que en el corto plazo el coste de construcción es constante, su coste marginal será cero, ya que no se producirá ningún aumento o disminución del coste con el paso de un vehículo adicional. Dentro de los costes de conservación y explotación se pueden distinguir costes que dependen del tráfico y costes que no dependen del tráfico. Entre los costes de infraestructura es principalmente el coste de mantenimiento de firmes que está íntimamente ligado a la circulación de vehículos, especialmente vehículos pesados y que es relevante para establecer a la hora reestablecer una tarifa a costes marginales. Los costes de conservación y explotación de carreteras están determinados por un lado por las características estructurales de las carreteras (su ancho, por ejemplo) y, por el otro, por la relación Intensidad de tráfico - Capacidad de la carretera. La siguiente función de coste de mantenimiento de carreteras es el resultado de una elaboración propia de las funciones descrita por Small, Winston y Evans (1989). Su expresión es:

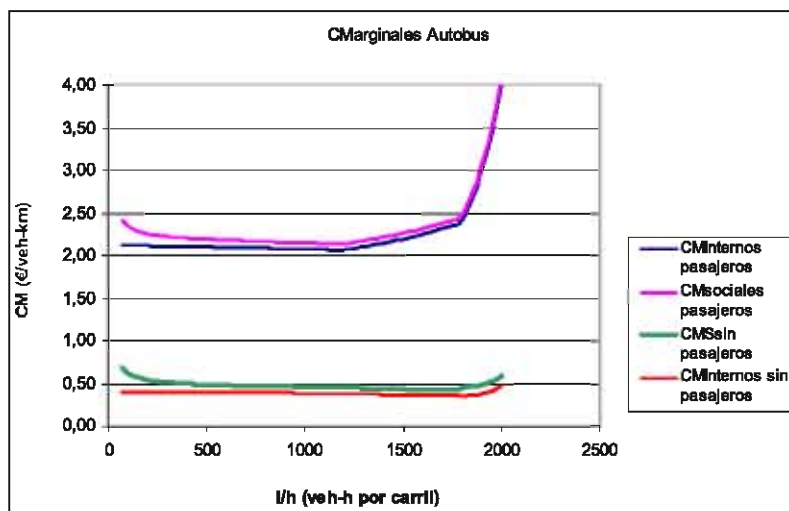
$$C_{IM} = K_0 e^{-rT} \quad (12)$$

$$T = \frac{\theta(Q)}{(1 + \alpha)IMD_{VPA} + \alpha IMD_{VRM/A}}$$

donde el intervalo T determina los costes de mantenimiento de la carretera y depende de la relación entre capacidad diaria media anual de la carretera e IMD anual ponderada por el peso $\alpha = 0,48$ relacionado con el peso por eje de pesados y autobuses, del parámetro θ , que sería 1 si

las carreteras requiere una intervención anual con un flujo de tráfico próximo a la capacidad de la carretera. θ sería < 1 si las condiciones de la carretera son más degradadas y el flujo de tráfico afecta más a la carretera misma, determinando un intervalo de intervención inferior al año y un coste de intervención más elevado. En el modelo de costes desarrollado se han planteado un ancho de la calzada de 25 metros, el parámetro θ del valor de 0,6 y una constante K_0 de 52.800, que representa el coste de mantenimiento si $T=0$. Según estas hipótesis iniciales, los costes marginales de mantenimiento serían decrecientes en relación a la IMD ponderada según los VPA, VPR y autobuses.

3.4 Costes de congestión



Los costes de congestión no tienen una naturaleza distinta a los otros costes. Se consideran costes externos debido a la incorporación de un vehículo adicional que contribuye a incrementar el coste marginal más de lo que ese vehículo internaliza. META calcula los costes de congestión a partir de la variación del coste de tiempo de cada tipo de vehículo debida a la entrada de un vehículo más. Un análisis de las funciones de costes marginales sociales e internos subraya cómo en torno al punto de congestión -donde la I/h alcanza la capacidad de la carretera- los costes sociales crecen más rápidamente que los costes internos porque la parte del coste de tiempo que no se internaliza aumenta, así como los costes externos relacionados directamente con la intensidad-velocidad (cambio climático, ruido y contaminante) se disparan. Al revés, los costes marginales de accidentes se estabilizan, o incluso bajan con respecto al incremento de la intensidad horaria y el riesgo de heridos graves o mortales baja al disminuir de la velocidad. El análisis del punto de congestión subraya el peso que los costes de tiempo tienen en la determinación de los costes internos y externos. La figura refleja los costes marginales para los autobuses, donde incluir o no el valor del tiempo de los pasajeros determina un aumento del coste marginal del orden de cinco veces y un incremento exponencial más acentuado si se considera el VOT de los pasajeros y no solamente el de los conductores de autobuses.

4. CONCLUSIONES

Los costes marginales por veh-km son decrecientes al principio y constantes después hasta

alcanzar el punto de congestión. A partir de este punto dichos costes se disparan. Este resultado se explica con respecto al aumentare de los costes externos con un aumento de la velocidad, relacionada a una baja intensidad horaria. En este entorno, menos que 500 Veh/h, los costes de cambio climático, el ruido, los contaminantes y los accidentes se quedan elevados. Al disminuir la velocidad, y aumentando la I/h, los costes marginales disminuyen o se estabilizan cerca de un valor constante. Sin embargo, al alcanzar la capacidad de la carretera los costes medioambientales de cambio climático, de contaminante y, en menor medida, de ruido crecen conjuntamente con los costes de tiempo que en el entorno de la congestión son los que mayor peso tienen con respecto al resto.

El desarrollo del modelo de coste conlleva un resultado importante con respecto a la intensidad de cada tipo de vehículo: hasta el punto de congestión las tendencias de los costes marginales internos y externos coinciden, así que tarifar con respecto a estos costes a fin de evitar la congestión resultaría conveniente también para bajar los costes marginales internos, y no solamente los externos.

5. REFERENCIAS

- FRIEDRICH R. and BICKEL P.(2001). Global Warming, en *Environnemental External Costs of Transport*, Springer-Verlag, Berlin.
- TRB, (2000). *Highway Capacity Manual 1*, National Research Council, Washington, D.C.
- Modelo Español de Tarifación de cArreteras, (2007). *Tarifación y externalidades y Modelo de Costes* en Informe 1A y 1B, autores: Andrés Monzón, José Manuel Vassallo, Floridea Di Ciommo, Pedro Perez y Elena Lopez..
- NASH, C. (2003) *UNIfication of accounts and marginal costs for Transport Efficiency. Final Report*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, V FP, EU, Leeds, 60p.
- NASH, C. y MATTHEWS, B. (editors) (2005). *Measuring the marginal social cost of transport*, Elsevier, Oxford, 335 p.
- NASH, C. (2007). Road Pricing in Britain, *Journal of Transport Economics and Policy*, 41(1), pp. 135-147.
- PEREZ, P.J. y MONZÓN, A. (2006). *Informe sobre transporte y medio ambiente, TRAMA 2006*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 34 p.
- SMALL, K.A., WINSTON, C., Y EVANS, C.A. (1989). *Road work: a new highway pricing and investment policy*. The Bookings Institution, Washington.
- UE (1995) Hacia una tarifación equitativa y eficaz del transporte – opciones para la internalización de costes externos del transporte en la Unión Europea, *Libro Verde COM 691 final*, UE, Bruselas.
- UE (1998). Tarifas justas por el uso de infraestructuras: estrategia gradual para un marco común de tarifación de transporte en la UE, *Libro Blanco*, UE, Bruselas.
- WEINBERGER (1991). Kosten des Lärms in der Bundesrepublik Deutschland, Informe sobre los costes medio-ambientales en Alemania, Forschungsbericht UBA, Berlin.