

**EXPLOTACIÓN COMERCIAL Y OPERACIÓN
DE LOS SERVICIOS DE TRANSPORTE DE VIAJEROS
POR FERROCARRIL / 3**



**LA DEMANDA EN EL TRANSPORTE
DE VIAJEROS.
GENERACIÓN, EVOLUCIÓN Y
REPARTO MODAL**

Alberto García Álvarez

Edición 8. Agosto de 2016

Este documento es un capítulo del libro *Explotación comercial y operación de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril*, cuyo contenido global es el siguiente:

1. Introducción al transporte de viajeros por ferrocarril. Los servicios interurbanos de transporte de viajeros en general, y por ferrocarril en particular. Infraestructura y regulación. Servicios comerciales y OSP
2. Magnitudes, unidades, indicadores y estadísticas en el transporte de viajeros.
3. La demanda en el transporte de viajeros. Generación, evolución y reparto modal.
4. La política comercial y los ingresos. Productos, canales y precios.
5. Los trenes. Material rodante para el transporte de viajeros por ferrocarril. Aspectos funcionales y operativos
6. Los recursos y los costes.
7. La oferta de servicios. Planificación programación y gestión de horarios, frecuencias, paradas, etc.

El libro tiene su origen en otro titulado *Operación de trenes de viajeros. Claves para la gestión avanzada del ferrocarril*, que el autor publicó junto con Alberto Cillero y Pilar Jericó en marzo de 1998, y que fue editado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en el marco de las actividades que se desarrollaron para celebrar el 150 aniversario del ferrocarril en España. Tras esta primera edición, que se agotó rápidamente, se reeditó la primera parte del libro, corregida, en febrero de 2011.

Los nuevos conocimientos y el rápido desarrollo de los servicios de viajeros en España a partir de la extensión de los servicios de alta velocidad (2008-2010) y de las nuevas políticas comerciales y de oferta de Renfe (2013-2014) aconsejan la redacción de una nueva publicación que, por entenderse más útil y flexible, adopta la forma de una serie de capítulos separados. Esta publicación recoge las nuevas experiencias y últimos datos disponibles.

El documento relativo a la demanda ha sido desarrollado en varias versiones desde 2004 como material didáctico de apoyo a diversos cursos. En esta edición (número 8) adopta una nueva denominación actualizada y adecuada a los nuevos contenidos.

En la elaboración de esta versión enriquecida ha sido decisiva la colaboración y aportaciones de Andreu Esquius, de Mcrit, a través del trabajo que dicha empresa ha realizado para la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en virtud de un convenio de colaboración titulado “Elementos para la determinación de la demanda y optimización de la oferta en servicios ferroviarios de alta velocidad”. Dada la diversidad de problemas de distinto alcance que se presentan en la evaluación de la demanda de transporte, y el carácter necesariamente simplificado de este documento general, se recomienda completar los conocimientos con otro tipo de documentos, como los apuntes de J.J. Muruzábal del curso *on line* “Modelos de demanda de viajeros en proyectos de inversión en infraestructuras de transporte. Aplicación al caso de los ferrocarriles” de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Explotación de los servicios de transporte de viajeros / 3

La demanda en el transporte de viajeros. Generación, evolución y reparto modal

Edición 8. Agosto de 2016

© Alberto García Álvarez

Edita: Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Este documento es propiedad de su autor

ISBN: 978-84-946555-2-4

Depósito legal: M-5785-2017

Ilustraciones de cubierta y portada: Campo de Tarragona, julio de 2016, y Santiago de Compostela, junio de 2013. Alberto García

El autor quiere agradecer la colaboración de Andreu Esquius, Lorenzo Jaro, Alberto Cillero Hernández, Ignacio González Franco y María del Pilar Martín Cañizares. También agradece la colaboración en la edición de Laura León y Lourdes Orozco

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE	7
2.1. Modelos de generación/atracción y distribución	8
2.2. Modelos de reparto modal	13
3. MODELO DEL COSTE GENERALIZADO	17
3.1. Teoría del <i>Valor por esfuerzo</i>	17
3.2. El tiempo en el servicio de transporte	18
3.2.1. El valor del tiempo.....	20
3.3. La importancia de la frecuencia	27
3.4. El <i>tiempo generalizado</i> en el coche particular	28
3.5. Concepto elemental del modelo	28
4. APLICACIÓN DEL MODELO DE COSTE GENERALIZADO	33
4.1. Sensibilidad de la demanda al precio, frecuencia y tiempo de viaje.....	33
4.1.1. Sensibilidad al precio.....	33
4.1.2. Sensibilidad a la frecuencia	35
4.1.3. Sensibilidad al tiempo de viaje	37
4.2. El efecto de las tres horas en el reparto modal tren-avión	38
4.3. Ejemplos de aplicación del modelo.....	41
4.3.1. Ejemplo de costes unitarios aplicados como integrantes del coste generalizado.....	41
4.3.2. Ejemplo de aplicación modelo en una ruta	42
4.3.3. Parte del crecimiento explicado por cada factor.....	44
4.3.4. Ejemplo de la evolución de la demanda en el tiempo a igualdad de oferta	45
5. LA DEMANDA INDUCIDA	47
5.1. Marco teórico	48
5.2. Aplicación práctica.....	50
5.2.1. Enfoque del menor coste generalizado	50
5.2.2. Enfoque de la curva empírica	52
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ÍNDICE DE FIGURAS	59
ÍNDICE DE TABLAS.....	61

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la demanda del transporte de viajeros resulta de la máxima importancia, tanto para las decisiones relativas a la inversión en infraestructuras como para el diseño y planificación de la oferta de servicios de transporte.

El tema es complejo, por cuanto la demanda entre dos puntos (que son origen y destino de una *ruta*) depende de muchos factores: unos son relativos a la propia necesidad de transporte entre esos dos puntos (población, renta, intercambios económicos, implantaciones comerciales, industriales y de servicios); mientras que otros factores dependen de la oferta de transporte (tiempo de viaje, frecuencias ofrecidas, precios del transporte).

Suele ser necesario conocer el reparto de la demanda global entre cada uno de los modos de transporte que operan en la ruta (coche privado, autobús, aviación, tren...) y, en ocasiones, entre cada una de las ofertas de transporte de cada modo (es el caso de cuando en un mismo modo, por ejemplo en el aéreo, varias compañías ofrecen servicios de transporte: puede ser necesario conocer el reparto de la demanda entre compañías).

Por otra parte, para tomar decisiones relativas a la oferta de un servicio concreto, no interesa únicamente pronosticar el total de viajeros que se van a mover entre dos puntos, sino cuántos viajeros van a emplear un servicio de transporte, y (lo que es más relevante en el este análisis) cuál es la sensibilidad de esta demanda a las variaciones que se puedan introducir en una oferta concreta (tiempo de viaje, precio, frecuencia, comodidad, sistemas de venta de billetes).

Además de conocer la demanda global en una ruta en un periodo de tiempo (por ejemplo en un año) y su distribución modal, para el adecuado dimensionamiento de la infraestructura y para alcanzar la máxima eficiencia de los servicios, es preciso conocer la distribución de la demanda en el tiempo, ya que ésta suele estar caracterizada por una elevada estacionalidad (con periodos punta anuales, semanales o diarios).

Metodología

En el presente documento, tras la introducción, se presenta en el capítulo segundo una visión general de los modelos de predicción de la demanda del transporte, incluyendo los de generación y los de reparto modal.

En el capítulo tercero se profundiza en el modelo del coste generalizado en su formulación *logit*, que permite diseñar la oferta y conocer los efectos en la demanda y en los ingresos de las variaciones en la oferta.

El siguiente capítulo recoge ejemplos de aplicación del modelo de coste generalizado, así como de sensibilidad de la demanda a las variaciones de la oferta y del valor del tiempo.

Se añade un pequeño capítulo sobre la demanda inducida y tras él, se incluye la bibliografía.

Denominaciones empleadas

En este documento se denomina *ruta* a un par de puntos entre los que se produce un flujo de transporte de viajeros. Los puntos pueden ser ciudades o áreas metropolitanas o provincias. En otras ocasiones se denomina “relación”, “par”, “ruta OD”, etc.

Se denomina **demanda global** al número de viajeros que desearían moverse en una ruta en un periodo de tiempo (generalmente un año) en ambos sentidos e incluyendo todos los modos de transporte mecanizados (autobús, tren, avión, coche, etc.)

Se denomina **cuota modal** al porcentaje de la demanda total que utiliza un determinado modo de transporte.

Se denomina **demanda inducida** al incremento en la demanda global que se produce por una variación importante en la oferta, por ejemplo por la introducción del tren de alta velocidad.

2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE

Los modelos con los que con más frecuencia se trabaja para estudiar los problemas de transporte se sitúan generalmente en el nivel agregado, y por ello tratan de predecir y explicar los volúmenes de viajeros en determinadas condiciones (de tiempo de viaje, frecuencia, precio, etc.) Unos modelos se denominan *modelos de generación* y pretenden estimar el total de viajes que se producen (se llaman viajes generados) entre dos puntos (en todos los modos de transporte). Otro grupo importante de modelos son los llamados *modelo de reparto*, que intentan anticipar la distribución modal que corresponderá a una determinada oferta de transporte.

No podemos profundizar en la utilización de modelos sobre los que, por otra parte, no hay una consolidada ni pacífica doctrina. Sin embargo, al tratarse de un tema tan importante, se ha agregado este apartado específico para exponer un enfoque coherente y actualizado de los métodos de estimación de la demanda en cada modo en los servicios interurbanos de transporte de viajeros.

Existen importantes ventajas en partir de la experiencia del pasado, siempre que sea posible, tratando de anticipar las variaciones cualitativas o cuantitativas en la demanda que pueden producirse, así como de su reparto entre modos.

La determinación de la demanda para una ruta concreta, y el reparto modal de tal demanda, es un problema complejo y que ha sido objeto de múltiples estudios teóricos y aplicaciones a casos concretos. La diferencia de circunstancias de cada caso impide dar fórmulas de validez universal, aunque sí se puede ofrecer una aproximación a la modelística aplicable, con la que el planificador puede conocer cuáles son las variables sobre las que puede actuar, y sobre cuáles tiene menos interés de actuación, para modificar el tamaño del mercado y su reparto modal.

Conocida la demanda en su situación “actual”, el planificador desarrolla un modelo estadístico-matemático que, con un algoritmo, relaciona la variable dependiente (la demanda, en este caso) con las variables independientes, mediante una relación funcional definida por diversos parámetros.

En definitiva, se trata de interpretar la realidad (ya conocida a partir de las encuestas) mediante un modelo de la misma realidad.

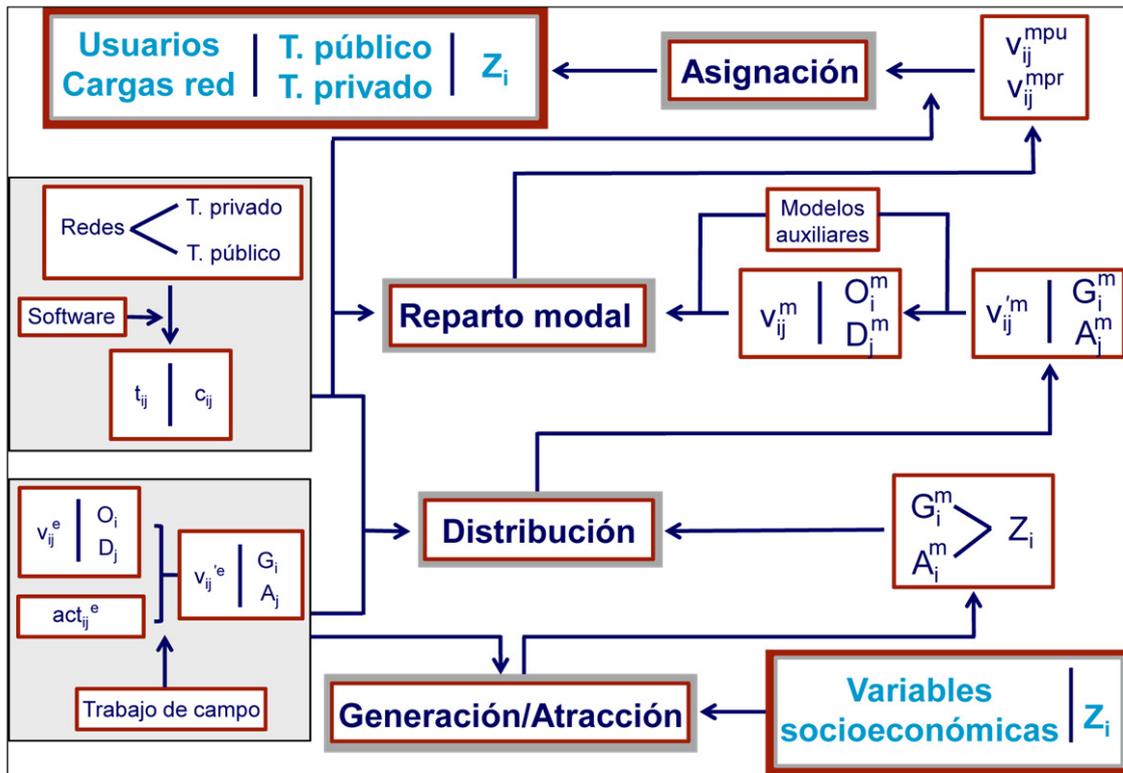
Los elementos que constituyen un modelo son las variables y los parámetros, y otros factores a considerar en su construcción son los algoritmos de cálculo y las relaciones funcionales.

Los modelos más comúnmente empleados para la determinación de la demanda de viajeros son los *modelos secuenciales*, que toman en consideración las cuatro fases que, en teoría, tiene en cuenta un posible viajero al realizar un desplazamiento y para cada una de estas fases se han formulado diversos modelos matemáticos:

- Decisión de viajar. Modelos de generación/atracción.
- Elección de destino. Modelos de distribución.
- Elección del modo (o la compañía operadora, si actúan varias en un mismo modo) de transporte. Modelos de reparto modal
- Elección de itinerario (si hay varios posibles entre los dos puntos). Modelos de asignación.

Estos modelos en su globalidad integrarían el llamado Modelo General de Movilidad (MGM).

Figura 1. Esquema de un Modelo General de Movilidad



El "Modelo General de Movilidad" (MGM) comprende las cuatro etapas: Modelo de generación/atracción; de distribución; de reparto modal; y de asignación. En la figura se esquematiza cómo se hace el calibrado de cada uno.

Fuente: Muruzábal (2016).

2.1. Modelos de generación/atracción y distribución

Las dos primeras fases (la de generación/atracción y la de distribución) se tratan generalmente de forma conjunta mediante la aplicación de modelos de tipo gravitatorio. Este tipo de modelos, muy desarrollados, fundamentan sus hipótesis en una presunta analogía entre ciertos procesos socio-espaciales y la teoría de gravitación universal de Newton.

La formulación adoptada (García Álvarez et al., 1998) sería del tipo:

$$D_{i,j} = \frac{k \times VarSocio^{hv}_{i,j}}{G_{i,j}^c}$$

Donde:

- $D_{i,j}$ es la variable dependiente: demanda de transporte entre las zonas i y j

- k es una constante
- $VarSocio$ son las h variables socioeconómicas explicativas de la demanda de transporte (por ejemplo: población, nivel de empleo, renta, instalaciones turísticas, actividad comercial, etc.)
- $G_{i,j}$ es la impedancia (o resistividad) al viaje entre i y j . Es mayor cuanto mayor es la distancia, precio del transporte y tiempo de viaje entre i y j .
- ν y c son las elasticidades de las variables consideradas como explicativas de la demanda o de la impedancia.

Las variables socioeconómicas más comúnmente utilizadas (y que incidirían en la movilidad entre dos puntos) en este tipo de análisis son: población, Producto Interior Bruto (PIB), renta, empleo, número de segundas residencias, número de plazas hoteleras.

La *resistividad al viaje* (o *impedancia*) que reduce la movilidad entre dos puntos puede depender del precio del servicio, de la distancia, del tiempo de viaje, etc.

Como ejemplo de un modelo de generación, en González Franco (2015) se encuentra el siguiente resultado para el corredor Madrid Levante:

$$V_{ij} = \frac{0,0126 \times (P_i \times P_j)^{0,51} \times (PIB_i \times PIB_j)^{0,58} \times (TM_i \times TM_j)^{-0,12}}{Cg^{2,61}}$$

Donde:

V_{ij} : número de viajes entre la zona i y la zona j .

P_i, P_j : población activa de la zona i (origen) y j (destino) respectivamente.

PIB_i, PIB_j : Producto Interior Bruto (PIB) de las zonas i y j .

TM_i, TM_j : tasa de motorización de las zonas i, j .

K, α, β, γ : parámetros a ajustar.

Cg : Coste generalizado entre i y j , ponderado en función de los viajeros de cada modo de transporte.

Evolución de la demanda global en el tiempo

Una vez conocida la movilidad global (medida por el número de viajeros que se desplazan en todos los modos de transporte entre dos ciudades en un período de tiempo, por ejemplo en un año), es relativamente sencillo conocer o estimar cuál va a ser la evolución de esa movilidad a lo largo del tiempo.

La evolución de la demanda global dependerá de la evolución de las variables que intervienen en el modelo de generación: por un lado, de las variables socioeconómicas (es decir, la actividad económica y social); y por otro de la oferta de los distintos modos de transporte (precio, frecuencia y tiempo de viaje). Podemos suponer que si en el tiempo se mantiene una oferta similar a la inicial de cada uno de los modos de transporte, la evolución de la demanda global dependerá exclusivamente de la evolución de las variables socioeconómicas.

Para el caso de España, empíricamente se ha comprobado que la variación de la movilidad de larga distancia está estrechamente ligada a la variación del Producto Interior Bruto, mientras que la evolución de la movilidad de cercanías está ligada a la evolución de la población ocupada.

Relación entre el PIB y la evolución de la demanda del tren y avión

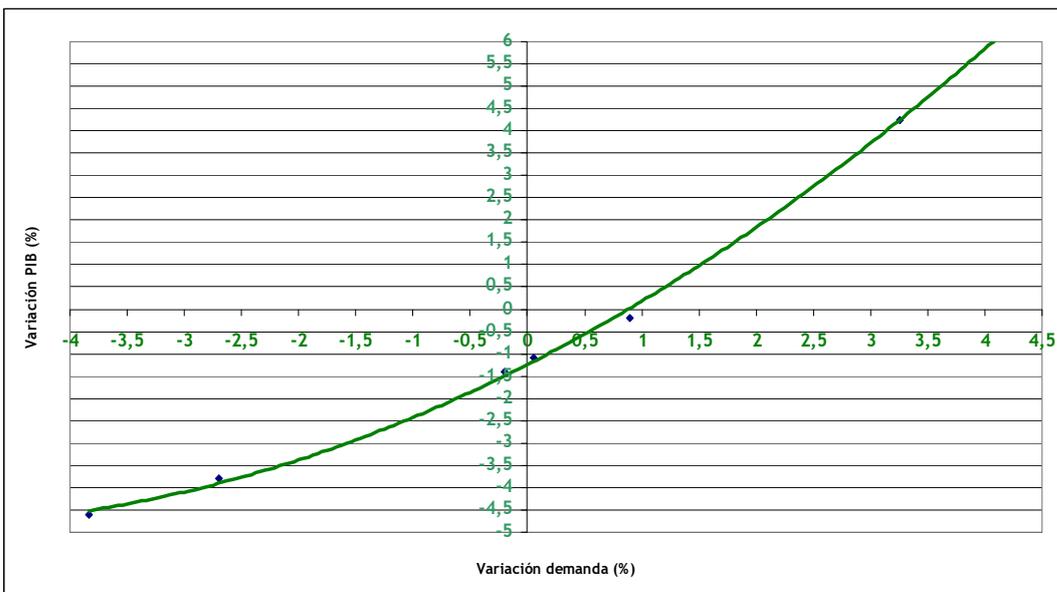
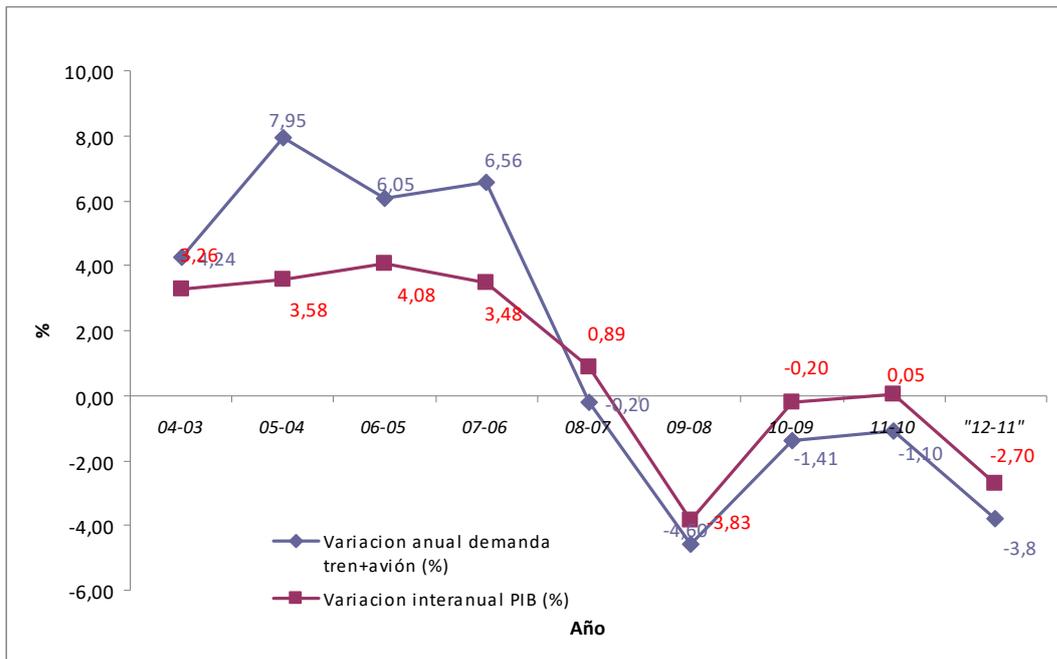
La relación entre la movilidad de larga distancia en tren y en avión (a igualdad de oferta) y el Producto Interior Bruto ha sido estudiada en diversos entornos. Para el

caso español en años recientes, una propuesta muy ajustada corresponde a Judith Fernández (2012) en el marco del proyecto Optired, quien proponía la formulación siguiente:

$$\text{Variación demanda } T y A (\%) = 0,19 \times (\text{Var PIB}-1)^2 + 1,906 \times \text{Var PIB} + 0,1216$$

Más recientemente la propia Judith Fernández (2015) ha sustituido el primer año 2003 por el de 2012 y ha eliminado dos años (2004 y 2006) que en su primer estudio habían ofrecido resultados anormales por cambios significativos en la oferta del avión.

Figura 2. Relación observada en España entre la demanda de viajes de larga distancia y PIB (2003-2012)



Fuente: Fernández Jánez (2015).

La nueva ecuación resultante (que tiene un excelente ajuste) es la siguiente:

$$\text{Variación demanda } T y A (\%) = 0,11698 \times (\text{Var PIB} - 0,8817)^2 + 1,906 \times (\text{Var PIB} - 0,8817)$$

Por ejemplo, supongamos que entre Madrid y Barcelona en el año 2012 se movieron 5.673.748 viajeros. Si en ese momento hubiera habido que realizar una previsión sobre la evolución futura de los movimientos entre Madrid y Barcelona en ausencia de cambios significativos en la oferta del tren y del avión, habría que conocer los crecimientos del PIB esperados, y ello permitiría, por aplicación de la fórmula anterior determinar el tráfico total previsible. Supongamos que la previsión de crecimiento anual del PIB es del 2%. Entonces:

$$\text{Variación de la demanda } (\%) = 0,11698 \times (2 - 0,8817)^2 + 1,906 \times (2 - 0,8817) = 2,277\%$$

Es decir, cabe prever que (en ausencia de cambios en la oferta) la demanda global entre Madrid y Barcelona crezca un 2,277% y pase a ser de 5.802.983 viajeros en el año siguiente¹.

Relación entre el PIB y la evolución de la demanda global

La relación descrita entre el PIB y la demanda en tren y en avión está calculada para las 88 principales rutas peninsulares en las que ambos modos coexisten. En la mayor parte de ellas, los servicios del tren son de alta velocidad. Por ello, la fórmula indicada refleja con precisión la evolución de la demanda de los modos de transporte más rápidos, pero no necesariamente es la misma que la del mercado total.

En efecto, un crecimiento de la renta produce un incremento del valor del tiempo y por lo tanto una cierta redistribución modal en favor de los modos de transporte más rápidos (avión y tren de alta velocidad). Por lo tanto, el crecimiento del mercado global es distinto (y menor probablemente menor) que el crecimiento del conjunto del tren de alta velocidad y avión.

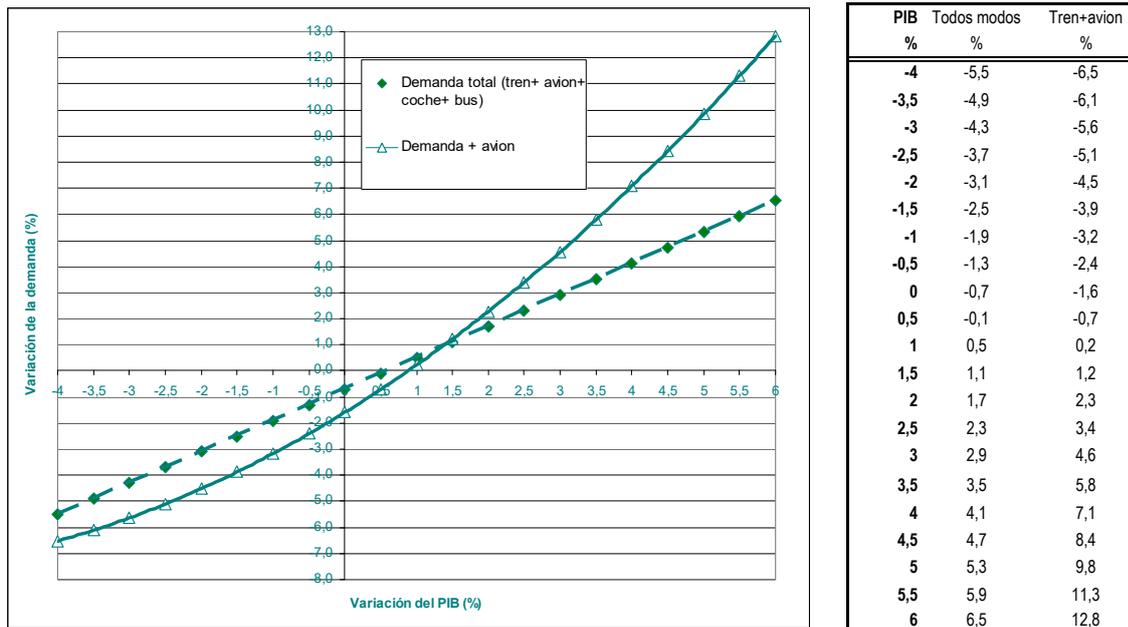
El análisis de las 34 principales rutas peninsulares con los datos desde 1998 hasta 2015 en todos los modos de transporte permite inferir una relación prácticamente lineal que vendría dada por la expresión:

$$\text{Variación mercado global } (\%) = 1,2018 \times \text{Var PIB } (\%) - 0,7.$$

En la Figura 3 están representados la tabla y el gráfico que relacionan la variación de la demanda del tren y del avión como la del mercado global con la variación del PIB.

¹ Los viajeros transportados en tren en 2013 fueron más de los indicados, pero en buena parte se debió a una relevante variación de la oferta de Renfe en forma de rebaja de precios, aumento de frecuencias y de servicios y facilidades al viajero.

Figura 3. Evolución del mercado en función de la variación del PIB



Fuente: Fernandez Jañez (2012) y elaboración propia.

En ella puede observarse cómo para crecimientos altos del PIB crecen tanto la demanda global como la del tren y del avión, y lo hace más la segunda; mientras que para crecimientos bajos y negativos del PIB disminuyen ambas, pero disminuye más la demanda de los modos más rápidos.

El ramp up o puesta en carga

La variación de la demanda que se produce después de un importante cambio en la oferta (por ejemplo derivado de la entrada en servicio de una nueva infraestructura o de una bajada importante en los precios) y que se obtiene con los modelos de generación y reparto modal es la que corresponde a un “año tipo” una vez estabilizado el servicio, ya que se observa un cierto retardo temporal entre la aplicación de los cambios en la oferta y la reacción de la demanda.

El término *ramp up* hace referencia al crecimiento de la demanda en el periodo transitorio de arranque y puesta en carga tras un cambio importante en la oferta, como puede ser la puesta en servicio de una nueva línea de alta velocidad. La estimación adecuada de este parámetro resulta fundamental porque los ingresos en los primeros años pueden tener un peso significativo en la viabilidad económica de la infraestructura.

En los análisis de las nuevas líneas de alta velocidad en España se considera un periodo de consolidación de la demanda de tres años, con índices de viajeros 0,65 y 0,85 en los dos primeros años, sobre la demanda del año-tipo que corresponde al tercer año.

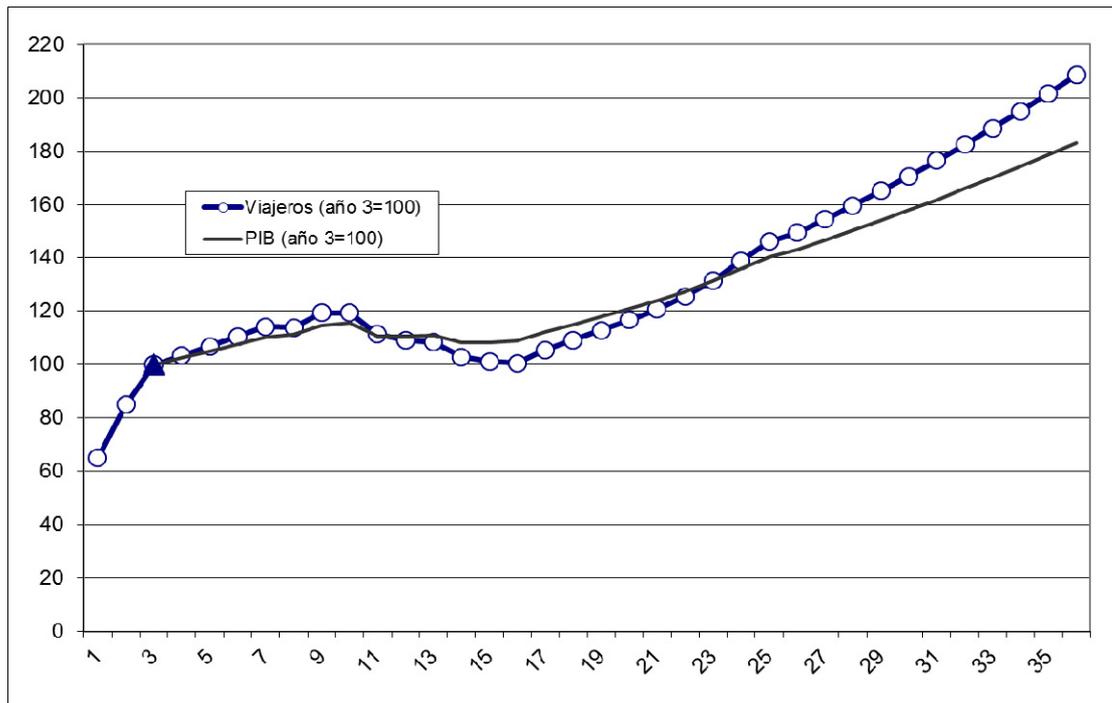
La duración de periodo de retardo y la pendiente del crecimiento de la demanda en él depende de diversos factores, tales como la relevancia e información de los cambios en la oferta, conocimiento que el operador ferroviario tiene del cliente, inercias psicológicas y económicas (coche ya comprado, abonos...).

Si, por ejemplo, tras la introducción de la alta velocidad en lugar del ferrocarril convencional la demanda debiera pasar en una ruta concreta de

500.000 viajeros al año a 2.000.000 de viajeros, la evolución del tráfico sería aproximadamente la siguiente:

Año 0 (último año del servicio convencional): 500.000 viajeros; año 1 (primer año completo de alta velocidad): $2.000.000 \times 0,65 = 1.300.000$ viajeros; año 2: $2.000.000 \times 0,85 = 1.700.000$; año 3 (año-tipo): 2.000.000. A partir del tercer año, a igualdad de oferta en todos los modos, la demanda evolucionaría en función del PIB o de las variables socioeconómicas.

Figura 4. Evolución de la demanda en el tiempo: *ramp up* y correlación con el PIB



Durante los primeros años se produce el *ramp up* o crecimiento retardado de la demanda como consecuencia de la mejora de la oferta. Una vez alcanzado el nivel de demanda coherente con la nueva oferta, la demanda está relacionada con el PIB con la fórmula de Fernández (2015).

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Modelos de reparto modal

El objetivo de los modelos de reparto modal es determinar la parte de los viajes que se realizarán en cada uno de los modos de transporte; es decir, de la demanda global entre dos puntos, cuántos viajeros emplearán el coche, cuántos el tren, cuántos el autobús y cuántos el avión.

Todos los modelos se basan en que la elección de un modo de transporte depende de la percepción que tienen los viajeros de las ventajas del modo elegido frente a los modos competidores, lo que significa conocer y tener en cuenta las características de la oferta de todos los modos de transporte en competencia.

Los modelos de reparto modal más utilizados probablemente sean los modelos que se apoyan en la teoría de elección de modo basada en el concepto de *utilidad aleatoria*.

El punto de partida de un modelo de *utilidad aleatoria* es la hipótesis de que cada individuo elegirá aquella opción que le proporcione el mayor nivel de utilidad (o, lo que es lo mismo, menor desutilidad): al presentársele las distintas opciones como niveles diferentes de tiempo, dinero o molestias; se elegirá la de "menos tiempo", "menos coste", etc., por lo que se habla entonces en términos de *desutilidad*, término evolucionado del concepto *coste generalizado* y muy a menudo identificado con él.

La función de desutilidad

La construcción de la función de *desutilidad* para cada modo de transporte dependerá de la capacidad del planificador a la hora de estimar los parámetros que acompañan a las variables que se incluyan como explicativas del modo.

La expresión más utilizada de la expresión de la *desutilidad* es:

$$D_{um} = K_m + a \times T + b \times P + \frac{c}{Freq} + Otros$$

Donde:

- D_{um} es la desutilidad del modo
- K_m es la constante modal que recoge todos los elementos que no se han modelado y que forman parte de la elección del modo, básicamente aspectos psicológicos o físicos como seguridad, confort, etc.
- a, b, c son parámetros a estimar, que acompañan a las variables.
- T es la variable *tiempo*, que puede descomponerse en los distintos tiempos según los trayectos del viaje.
- P es la variable *precio* o coste monetario para el cliente.
- $Freq$ es la variable *frecuencia*

En el capítulo *Otros* (también denominado a veces *constante modal*) se incluyen otros factores de tiempo o coste que, acompañados con los consiguientes parámetros, definen la función de desutilidad de cada modo.

La aleatoriedad

La desutilidad, tal y como se ha expuesto, adopta un valor para cada persona y es por ello de carácter determinista: Para cada viajero con un valor del tiempo determinado sólo existe una oferta de transporte más ventajosa, que además es la misma para todas las personas que vivan en el mismo lugar (por su distancia a las estaciones), con el mismo *valor del tiempo* (VT). Por ello, conocida la oferta de todos los modos de transporte, y una vez determinando el *Valor del tiempo* de una persona quedaría binunívocamente determinado el modo de transporte que escogería.

Sin embargo, esto no es cierto, por dos limitaciones fundamentales:

- Por una parte, puede haber viajeros a los que resulte más atractiva la oferta de un modo no les sea accesible. Por ejemplo, una persona tiene que ir a un entierro y debe llegar a una hora concreta. Aunque el tren sea para él el modo de transporte más atractivo, si no existe un servicio ferroviario que le permite llegar a la hora adecuada, probablemente tenga que viajar en coche o avión. Otro ejemplo es el de una persona que carece de coche o de carnet de conducir, que no puede emplear el automóvil, aunque para su *Valor del tiempo*, fuese la oferta más atractiva.
- Por otra parte, hemos supuesto que para todos los viajeros con el mismo valor del tiempo, el coste monetario y el tiempo percibido es el mismo, pero ello no

es cierto en algunos casos en los que pueden producirse sesgos importantes de estas variables respecto de la media. Así, para personas que viven cerca del aeropuerto, que disponen de puntos de tarjetas de fidelización, o que tienen pánico al avión, la oferta más atractiva puede ser diferente que para otras personas cuyo valor del tiempo es el mismo.

Todo ello lleva a introducir un cierto carácter aleatorio en el modelo, de forma que la elección modal indicada por el modelo no sea determinada por el *valor del tiempo*, sino que se asigne una cierta probabilidad de que ello sea así. Las oscilaciones respecto a la media reflejan de alguna forma factores no considerados en el planteamiento determinista, tales como los diferentes costes monetarios o incluso en el *tiempo percibido* por personas con el mismo *valor del tiempo*.

Modelo logit

Una vez definidas las funciones de desutilidad para calcular las probabilidades de elección de cada uno de los modos de transporte, el modelo *logit* supone que para cada individuo la desutilidad tiene una parte determinista (la calculada con la función ajustada correspondiente) y una parte aleatoria.

La expresión del modelo *logit* es la siguiente:

$$P_{rob\ m} = \frac{\exp(-\lambda D_{um})}{\sum_m \exp(-\lambda D_{um})}$$

Donde:

- $P_{rob\ m}$ es la probabilidad de que elija el modo m (que coincide con la cuota de mercado que tiene el modo m en el mercado global),
- m son subíndices que designan cada modo de transporte,
- D_{um} es la desutilidad del modo m .
- λ es el parámetro que representa la dispersión de la elección modal. Cuanto mayor es, disminuye la dispersión y aumenta la probabilidad de elegir el modo de menor coste generalizado. Este parámetro debe estimarse en la calibración del modelo.

El número anual de viajeros en un modo de transporte es el resultado de multiplicar el mercado global (los viajeros que se mueven en todos los modos) por la probabilidad de escoger ese modo:

$$V_m = MG \times P_{rob\ m} = \frac{\exp(-\lambda D_{um})}{\sum_m \exp(-\lambda D_{um})}$$

Donde:

V_m es el número anual de viajeros en el modo de transporte m en la ruta considerada

MG es el mercado global anual en dicha ruta

Como puede observarse, al reducirse la desutilidad o coste generalizado medio de un modo, aumenta la probabilidad de que los viajeros escojan ese modo, o lo que es lo mismo, más viajeros utilizarán ese modo.

Estimación de las funciones de desutilidad

El proceso de obtención de las funciones de desutilidad es diferente según la utilización de datos y su procedencia. Los métodos de estimación se pueden clasificar como *desagregados* o *agregados*. Un grupo de métodos atienden al individuo (desagregados) y otro a la colectividad (agregados).

La denominación de análisis *desagregado* proviene de su aplicación directa a las elecciones realizadas por cada uno de los individuos de una muestra, en lugar de al conjunto de elecciones realizadas por un grupo de individuos tratados como tal grupo.

Es por ello que, en análisis desagregados, las elecciones son expresadas como "sí" o "no", o como modo elegido, "coche", "autobús", "tren", a diferencia de los modelos agregados que vienen expresados como la proporción de elegir cada posibilidad relativa al grupo de individuos.

- Los *métodos desagregados* se definen como técnicas que presentan a unos individuos una serie de alternativas a evaluar y en los que las respuestas proporcionan una información sobre la importancia relativa de varios atributos que caracterizan a cada alternativa.
- Los *métodos agregados*, al contrario, presentan las valoraciones que realizan un conjunto de individuos, agrupadas en porcentajes.

3. MODELO DEL COSTE GENERALIZADO

Los modelos globales de demanda responden, como ya se ha expuesto, a la necesidad de conocer la demanda (supuestas unas determinadas características de la oferta) y encuentran su principal aplicación en la planificación global del transporte.

Para la planificación de la oferta (precios, frecuencias, tiempos de viaje) de un modo de transporte determinado, por ejemplo el ferrocarril, es de la máxima importancia aplicar los modelos de reparto modal que permiten (una vez calibrados) estimar los efectos de una variación en la oferta del propio modo o de otros modos en competencia en el número de viajeros que se transportarán.

El modelo del *coste generalizado* es el más empleado y el que expondremos seguidamente en detalle para conocer cómo las variaciones en la oferta se traducen en cambios en el número de viajeros transportados.

El coste generalizado es el “coste total” o la “desutilidad” que tiene una persona para viajar. Este coste o desutilidad incluye por una parte el billete y los costes monetarios necesarios para viajar; pero también considera (y en coherencia con la necesidad de aportar el propio tiempo) el valor del tiempo sacrificado para viajar, convenientemente monetizado. Este tiempo incluye desde luego el tiempo de viaje, pero también los tiempos de desplazamiento hasta y desde las estaciones o terminales, tiempo de espera por falta de frecuencia, etc.

Previamente a la descripción en detalle del modelo se presentarán algunas reflexiones cualitativas sobre los procesos mentales de toma de decisiones por parte de los consumidores.

3.1. Teoría del *Valor por esfuerzo*

La reflexión sobre el comportamiento del consumidor en términos de su decisión de viajar o no, y, si decide viajar en qué modo de transporte decide hacerlo, puede apoyarse en la formulación de Valor por esfuerzo que para las empresas de servicios ha desarrollado Huete (1997). Según esta teoría lo que buscan los consumidores es optimizar el valor que reciben a cambio de su esfuerzo: *“El concepto de valor por esfuerzo describe bien la lógica de los clientes (...). Los clientes toman sus decisiones en función de valor que les proporciona una empresa y del esfuerzo que han de realizar para conseguir ese valor. Es un juicio en la mayoría de los casos inconsciente, el cliente no tiene conciencia de infinidad de factores que influyen en sus decisiones de comprar o no un producto o un servicio”*.

Así, la demanda de transporte en general (o la que genera una oferta concreta) será mayor cuanto más *valor* aporte a la persona que se dispone a viajar y cuanto menor sea el *esfuerzo* de todo tipo que se requiera para obtener este valor.

El valor que tiene un desplazamiento para una persona está asociado, por lo general, al tipo de actividad que va a realizar en destino: si tiene que desplazarse para trabajar, el viaje tiene un alto valor, porque se convierte en elemento necesario para conseguir su salario; si se trata de unas vacaciones muy deseadas después de un largo tiempo de trabajo, igualmente tendrá el viaje un gran *valor*; si es una visita a la familia no ligada a ningún acontecimiento especial, el *valor* será menor. Además del *valor* del servicio que contrata (el desplazamiento), el viajero puede recibir otros *valores* (tangibles o intangibles) que hagan más atractiva la transacción.

Pero el *valor* recibido debe ponderarse en relación con el *esfuerzo* necesario, porque normalmente un viaje no se desea realizar a cualquier coste. El *esfuerzo* necesario

para consumir el viaje está ligado a todos los factores negativos (costes o *desutilidades*) ligados a su realización. En la mayor parte de los casos, se refieren al coste monetario, al tiempo empleado en el viaje (y su posible aprovechamiento para utilidades alternativas) y a las incomodidades físicas o psíquicas que el viaje comporta.

En la medida en que una oferta de transporte vaya reduciendo estos esfuerzos -o *desutilidades*- mayor será la demanda: se habrá mejorado, para un *valor* determinado, el cociente entre *valor* y *esfuerzo*.

Cada persona toma sus propias decisiones de desplazamiento tratando (en general de forma inconsciente) de optimizar el cociente *valor/esfuerzo*. El conjunto de las decisiones que toma individualmente cada una de las personas de una sociedad o colectividad, configura, por agregación, la demanda de transporte.

El esfuerzo y el coste generalizado

La teoría del *valor por esfuerzo* o *desutilidad* es una versión del *coste generalizado* o *desutilidad*. En efecto, el *coste generalizado* sólo toma en cuenta los costes (monetarios o no) en que es necesario incurrir para recibir un servicio de transporte que consiste en el desplazamiento entre dos puntos. El *valor por esfuerzo* contempla un concepto más amplio del servicio, al incluir también los valores añadidos e intangibles que es posible obtener con el servicio.

Por su sencillez, el concepto de *coste generalizado* es especialmente útil para comprender el *esfuerzo* que los viajeros deben de realizar para poder recibir el servicio de transporte. Como expondremos más adelante, la comprensión de la teoría explícita bastante bien los instrumentos que el operador de servicios de transporte puede utilizar para ganar en competitividad.

El *coste generalizado* incluye tanto costes monetarios como otro tipo de costes, y en esencia los diversos componentes del coste podrían resumirse así:

Precio pagado por el transporte

- Otros costes monetarios asociados (desplazamientos complementarios, comidas a bordo en su caso, etc.).
- Valor del tiempo empleado en el viaje en todas sus fases (incluyendo esperas, obtención de billetes, tiempos en terminales, viaje en el vehículo y retrasos). Para evitar confusiones, este tiempo lo denominaremos *Tiempo generalizado*.

Normalmente el *coste generalizado* no contempla otras desutilidades tales como:

- Incomodidades físicas asociadas al desplazamiento (falta de confort en el vehículo, cambios de modos de transporte, movimiento de equipajes, etc.)
- Inconvenientes psíquicos que el viaje (como una actividad fuera de las costumbres habituales de vida) genera: incertidumbre, inseguridad, ansiedad, etc.

La ventaja del *coste generalizado* es que, al *monetizar* tanto el precio del billete como el tiempo de viaje, permite comprender mejor el peso relativo de unos y otros factores en la *impedancia* o *resistividad* al viaje.

3.2. El tiempo en el servicio de transporte

La aportación del tiempo de la persona que viaja constituye un elemento característico y diferencial del transporte de viajeros: el cliente tiene que sacrificar parte de su tiempo para poder recibir el servicio. A diferencia de la compra de un producto material o de otro tipo de servicios (en los que únicamente hay que pagar el precio para recibir el bien o servicio), en el transporte de viajeros no sólo hay que

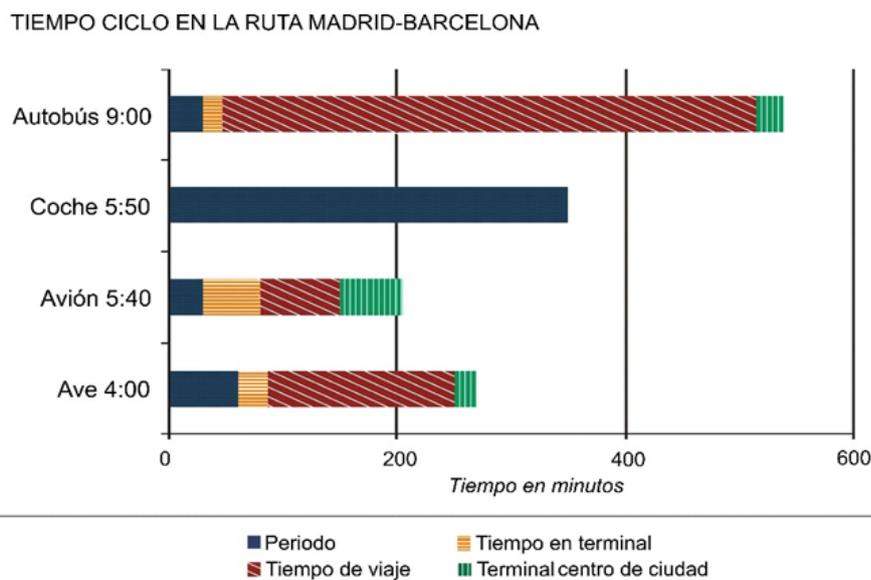
pagar el billete, sino que también hay que aportar el propio tiempo, lo que, por tanto, añade un mayor coste o esfuerzo.

El tiempo a considerar (con diferentes modulaciones, como veremos más adelante) no es solamente el tiempo que se emplea en el desplazamiento o viaje propiamente dicho (es decir, el que el viajero pasa dentro del vehículo mientras éste se mueve), sino que es relevante todo el tiempo que el viajero tiene que dedicar al proceso de viaje en el sentido más amplio. En él se deben de considerar el tiempo de desplazamiento a las terminales, el de espera por falta de frecuencia, el necesario para sacar el billete, etc.

Definimos el *tiempo generalizado* (T_g) como todo el tiempo que el viajero tiene que dedicar a hacer posible su viaje. El *tiempo generalizado* es la suma de varios tiempos elementales:

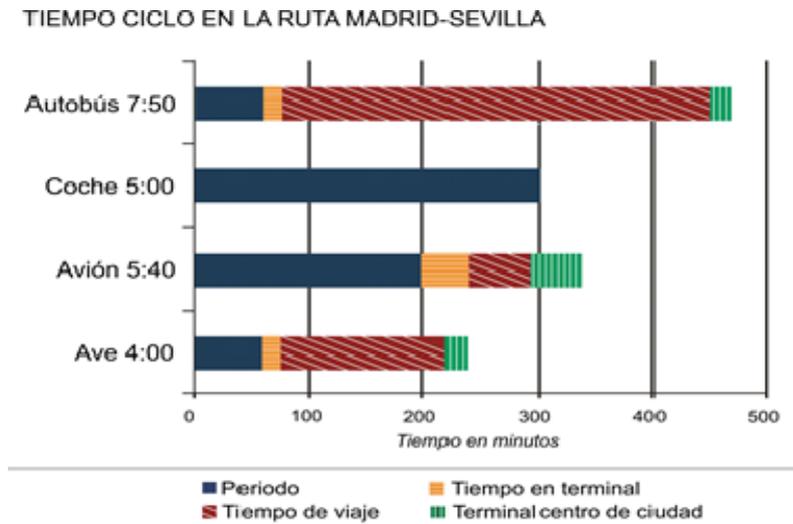
- **Tiempo de compra e información** es el empleado en informarse de las condiciones del viaje, en reservar, comprar y recoger los billetes y en pasar el control de acceso.
- **Tiempo de acceso y dispersión** es el empleado en desplazamientos desde el lugar de origen a la terminal de comienzo del viaje, desde la terminal de destino al lugar final y tiempo de espera en las terminales.
- **Tiempo de espera** del servicio es el tiempo que el viajero tiene que esperar (además del necesario para las gestiones que sea preciso realizar en la terminal) por falta de frecuencia en el servicio. Este tiempo de espera será mayor cuanto menor sea la frecuencia del servicio y cuanto menor sea la información accesible sobre horarios y disponibilidad de plazas.
- **Tiempo de viaje**, entendiéndose por tal el tiempo que el viajero pasa dentro del vehículo de transporte que emplea en desplazarse desde la terminal de origen a la de destino.

Figura 5. Tiempo generalizado en la ruta Madrid Barcelona en diversos modos de transporte



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Tiempo generalizado en la ruta Madrid Sevilla en diversos modos de transporte



Fuente: Elaboración propia.

El tiempo verdaderamente relevante para valorar el esfuerzo que requiere el viaje es el *tiempo generalizado*, no el que hemos denominado *tiempo de viaje*, ya que (como ilustra la experiencia de un viaje en avión) de poco sirve emplear una hora en desplazamiento o viaje propiamente dicho si hay que utilizar otras dos horas para llegar a terminal, hacer colas, etc. En el coche particular normalmente coinciden, como expondremos, el *tiempo generalizado* y el *tiempo de viaje*, pero en el resto de los modos son diferentes en mayor o menor medida. (En la figura se puede comparar el *tiempo generalizado* de diversos modos de transporte para una ruta determinada).

Una vez expuesto el concepto de *tiempo generalizado* (y los diferentes sumandos que lo integran) es preciso conocer el *valor del tiempo* como parámetro necesario para convertir a coste (en unidades monetarias) el *tiempo generalizado* que el cliente debe aportar al proceso de viaje.

3.2.1. El valor del tiempo

El *valor del tiempo* (VT) es la máxima cantidad que una persona está dispuesta a pagar a cambio de no perder una determinada cantidad de tiempo.

Este concepto juega un papel importante en las valoraciones socioeconómicas de los proyectos de transporte, y en ellas su propósito principal es convertir en unidades monetarias las reducciones de tiempo producidas como consecuencia de la introducción de una mejora de la oferta de transporte para tenerlas en cuenta en la evaluación coste-beneficio de las inversiones en infraestructuras.

Pero, además, el *valor del tiempo* sirve para determinar una parte del *coste generalizado* que debe soportar el viajero. En efecto, como hemos señalado, para realizar el viaje es preciso sacrificar una determinada cantidad de tiempo. Por lo tanto, se puede suponer que el coste que se soporta por este concepto, se corresponde con el valor que el viajero atribuye a ese propio tiempo.

La cuantificación de este valor resulta compleja, porque cada persona valora su propio tiempo de manera diferente, e incluso la misma persona puede valorarlo de forma diversa según circunstancias. Así, por ejemplo, no se valora de igual modo el tiempo empleado en la cola de un supermercado que el tiempo de proyección de una película de cine, ya que la satisfacción o utilidad reportada es distinta.

En el transporte sucede lo mismo. La valoración del tiempo es diferente si se realiza un viaje de negocios que si se trata de un viaje por motivos de ocio, en el que la valoración del propio tiempo es inferior al primero.

El *valor del tiempo*, además, depende fuertemente de la frecuencia con que se realice el viaje. Así, se valora mucho el tiempo empleado en un viaje que se realiza todos los días, y menos aquel que se realiza una vez al año. Cambia asimismo con la duración de la estancia en destino: para pasar un fin de semana se valora más el tiempo que ha de sacrificarse en el viaje, que para un viaje de mayor duración.

Puede resumirse lo antedicho, señalando que el *valor del tiempo* propio depende fundamentalmente de tres tipos de factores:

- Factores económicos, que influyen a través de la utilidad del tiempo que se emplea en el viaje; por ejemplo, se puede aprovechar más el tiempo de viaje en el tren que el autobús (por ello, representa un menor coste de oportunidad).
- Factores físicos, como la comodidad, ergonomía, servicios a bordo, que hacen que un transporte sea preferido a otro, o una clase a otra.
- Factores psicológicos, que vendrían determinados por el grado de ansiedad y/o miedo que genera el viaje. La ansiedad surge en los tiempos de acceso y es debida a la incertidumbre de desenvolverse fuera del medio natural. El miedo o tensión nace de estar en un estado percibido como *de riesgo*, y que provoca que en esta situación se incremente el valor del tiempo.

Aproximación cuantitativa al valor del tiempo

Dodgson y González Savignat (1996) estimaron el coste medio de la hora de trabajo en España en 17,9 euros² (que podría ser tomado como indicador apropiado para valorar el tiempo de viaje en horas de trabajo), y aplicando la evidencia empírica observada en Inglaterra, derivan un valor del tiempo de ocio en 5,65 euros/hora. Matas (1990) estimó valores del tiempo para el caso español: el valor del tiempo oscilaba desde 1,62 euros/hora para trabajadores no cualificados, hasta 5,85 euros/hora para el personal cualificado, con una media de 2,22 euros/hora.

En 2004 Renfe encaminó los trenes Altaria de Madrid a Pamplona por la nueva línea de Alta Velocidad de Madrid a Lleida. El mismo tipo de tren y servicio redujo su tiempo de viaje una hora y cuatro minutos, y se produjo un aumento del precio del billete que suponía implícitamente un Valor del tiempo de 12,2 euros/hora. A pesar de la subida de precios, el tráfico aumentó, lo que muestra un valor del tiempo real por encima de éste. En la ruta de Madrid a Logroño el valor del tiempo atribuido fue de 9,52 euros/h aunque en este caso se mejoró el tipo de tren, lo que hace pensar que el valor implícito atribuido al tiempo fuera algo menor; pese a ello, también el tráfico aumentó de forma significativa revelando valores del tiempo superiores a los indicados.

² Las cifras de los trabajos han sido convertidas de pesetas a euros y actualizadas con el IPC del año del dato original (pesetas de 1992 y 1998 a euros de 2016).

Adif en su Manual de Evaluación de inversiones en el ferrocarril (2011) repasa diferentes fuentes para datos del valor del tiempo y los actualiza a precios de 2011:

- El Manual de carreteras del MOPTMA en su última versión (1995) establece un valor unitario del tiempo, para vehículos privados y desplazamientos interurbanos, de 5,26 euros/hora. La actualización a 2011 (con el IPC) ofrece un valor de 8,14 euros/hora.
- El Departamento de Transporte del Gobierno británico (2002) establece unas valoraciones, que actualizadas a 2011 por el IPC, y trasladadas al caso español por la paridad del poder adquisitivo (PPA) muestran los siguientes valores:
 - Conductores de vehículo privado (coche): 14,15 euros/hora
 - Pasajeros de vehículo privado (taxi): 10,14 euros/hora
 - Pasajeros de bus: 10,83 euros/hora
 - Pasajeros de tren: 19,79 euros/hora
 - Pasajeros de metro: 19,25 euros/hora
 - Peatones: 15,88 euros/hora
 - Ciclistas: 9,10 euros/hora

A efectos de evaluación, el Ministerio de Fomento y Adif han utilizado valores de tiempo entre 9 euros/hora y 24 euros/hora (actualizados a 2011) en estudios recientes (véase la tabla siguiente):

Tabla 1. Valores del tiempo en diversos estudios en España

Estudio	Administración	Año	Valor del tiempo €/h		Valor del tiempo €/h (actualizado al 2011)	
			Medio recorrido	Largo recorrido	M. trabajo	M. otros
"Estudio de optimización funcional de la nueva línea de ferrocarril Madrid-Valladolid y sus conexiones con Castilla-León, Galicia, Asturias, Cantabria y el País Vasco"	Ministerio de Fomento	2000	Medio recorrido	12,02	14,68	
			Largo recorrido	14,42	17,62	
"Estudio de rentabilidad del trazado ferroviario de Alta Velocidad Palencia-León-Asturias"	ADIF	2004	Medio recorrido	13,22	15,73	
			Largo recorrido	17,05	20,29	
"Estudio de rentabilidad de la línea de Alta Velocidad Madrid-Segovia-Valladolid"	ADIF	2004	Medio recorrido	13,65	16,25	
			Largo recorrido	17,05	24,38	
"Estudio de mercado y evaluación socioeconómica y financiera de la línea de Alta Velocidad Madrid-Lisboa/Oporto"	Ministerio de Fomento	2004	15,00		17,85	
"Prognosis de demanda y rentabilidad del nuevo acceso ferroviario de Alta Velocidad a la Ciudad de Toledo"	ADIF	2005	7,7		8,90	
"Estudio de mercado y evaluación socioeconómica y financiera de la línea de Alta Velocidad Madrid-Lisboa/Oporto"	ADIF	2011			M. trabajo	26,78
					M. otros	12,77

Fuente: Adif (2011).

Los valores de tiempo se han aplicado según tipo de recorrido, con 8,90 euros/hora para el AVE Madrid-Toledo, de corto recorrido; entre 15 euros/hora y 17 euros/hora en medio recorrido; y entre 20 euros/hora y 24 euros/hora en largo recorrido.

El Banco Mundial (Gwilliam, 1997) recomienda valorar el tiempo en viajes por motivo “trabajo” y “negocio” en función del coste laboral bruto (incluida la seguridad social) por hora; y valorar el tiempo en viajes por otros motivos como el 30% del ingreso del hogar por hora, siempre que no existan datos locales que indiquen otros valores.

En el Manual para la evaluación de inversiones en el ferrocarril de Adif de 2008 se proponía un valor del tiempo por motivos de trabajo de 16,74 euros/hora y por otros motivos de 7,11 euros/hora. Los resultados que se obtenían de aplicar directamente las definiciones del Banco Mundial para valorar el tiempo en viajes por otros motivos eran inferiores a los manejados en otros estudios, por lo que la cuantía finalmente recomendaba tenía en cuenta tal hecho.

En HEATCO (2006) se propone igualmente distinguir para el transporte de viajeros las dos categorías expuestas: por motivos de trabajo y por otros motivos. Se considera que el ahorro de tiempo por motivos de trabajo está relacionado con la productividad marginal del trabajo, mientras que el correspondiente al resto de los motivos es una función de las preferencias personales. Por ello, en el primer caso es habitual obtener el valor del tiempo a partir de los salarios. En el caso del tiempo por otros motivos, dependerá de variables como el objetivo del viaje, la renta del viajero, su edad o la longitud del viaje, entre otros aspectos.

Esta complejidad aconseja recomendar que se utilicen prioritariamente los resultados obtenidos en el estudio de demanda que se haya realizado para la evaluación y que se incluya una valoración del ahorro del tiempo.

En caso de no estar disponibles, se proponen dos valores de tiempo: uno para motivo “trabajo o negocios” y otro para el resto de los motivos. Esta división presenta importantes ventajas con respecto a una segmentación por modos de transporte, tanto conceptuales (el valor de tiempo es una característica del viajero, que no debería variar según el modo de transporte elegido, sino que condiciona la elección modal), como prácticas (complica la valoración de ganancia de tiempo, si el valor de tiempo en el modo original difiere del valor del modo nuevo).

En el Manual de Adif de 2011 se propone considerar los valores del estudio de HEATCO (2006) para España actualizados a 2011, a partir de la renta per cápita.

En concreto, en HEATCO (2006) se presentan los siguientes valores para viajeros:

- Valor del tiempo por motivos de trabajo: 22,34 euros₂₀₀₂/hora.
- Valor del tiempo por otros motivos: 10,94 euros₂₀₀₂/hora.

Se utiliza este criterio tanto para la valoración por motivos de trabajo como por otros motivos, por homogeneidad.

Las cuantías anteriores, actualizadas a 2016, se traducen en 29,8 euros/hora y 14,6 euros/hora, respectivamente para viajes por motivo trabajo y viajes por otros motivos.

Los diferentes valores del tiempo en las diversas fases del viaje

Las investigaciones sobre el valor del tiempo coinciden en que tienen un mayor coste unitario los tiempos accesorios (llegada a la estación o aeropuertos, espera, etc.), y tiene un menor coste el tiempo de viaje en sí mismo, porque este tiempo se puede aprovechar parcialmente y además porque en el viaje hay menos incomodidades e incertidumbres que en la espera.

Varios autores han estudiado las diferencias en el valor del tiempo en las distintas fases del viaje. La primera investigación la realizó Mohring (1972), diferenciando para el transporte en autobús, el tiempo de tránsito y el tiempo de espera. Desde este primer estudio se ha consolidado un cuerpo de doctrina en el que las conclusiones generalizadas han sido que el valor de tiempo de espera puede llegar a ser entre 1,7 a 3,6 veces superior que el tiempo en vehículo; y el tiempo a pie hasta

la parada, entre 1,3 a 2,8 veces superior al tiempo en vehículo, según varios autores citados por Bel (1994).

Puede extrapolarse esta idea indicando que cada una de las fases del viaje el *valor del tiempo* es diferente (incluso para la misma persona y en el mismo momento). El *valor del tiempo* es mayor en situaciones de incomodidad, incertidumbre o en las que no se puede aprovechar el tiempo.

El coste ponderado del tiempo

Con objeto de recoger el hecho (que se traduce en una realidad palpable en la experiencia cotidiana) de que el tiempo se hace *más largo* en los momentos desagradables y *pasa más rápidamente* en los momentos placenteros, García Álvarez, Cillero y Rodríguez Jericó (1998) proponen introducir diferentes coeficientes ponderadores del tiempo en cada una de las fases del proceso. Si una parte del proceso resulta más molesta que otra (por razones físicas o psicológicas), el coeficiente ponderador dará un *mayor coste unitario* a ese lapso de tiempo (o hará que se perciba como un *tiempo más largo*).

Si el *tiempo generalizado* se desagrega en cada una de las fases del viaje, y a cada una se le aplica su respectivo coeficiente, se obtiene el *tiempo percibido total* (T_{ptot}) (que difiere del tiempo generalizado precisamente por haber introducido los cocientes de ponderación en cada fase):

$$T_{ptot} = [(\alpha x T_v) + (\beta x T_b) + (\chi x T_d) + (\phi x \varepsilon x P)]$$

Y, en consecuencia, el *coste del tiempo total* se expresaría de la siguiente manera:

$$C_{tot} = VT x T_{ptot} = VT x [(\alpha x T_v) + (\beta x T_b) + (\chi x T_d) + (\phi x \varepsilon x P)]$$

En donde:

- C_{tot} es el coste total del desplazamiento percibido por el cliente.
- VT es el *valor del tiempo* medio para cada persona. Incluso para una misma persona puede variar de un momento a otro (se expresa en euros/hora),
- α es el coeficiente de ponderación del *tiempo de viaje* en el *tiempo percibido*, y T_v es el *tiempo de viaje* (el tiempo que el viajero pasa en el vehículo),
- β es el coeficiente de ponderación del tiempo en la reserva y adquisición de los billetes y T_b es el tiempo de compra e información.
- χ es el coeficiente de ponderación del tiempo en terminales y de acceso y dispersión, mientras que T_d es el tiempo de acceso y dispersión y de estancia en las terminales.
- ϕ es el coeficiente de ponderación del tiempo de espera desaprovechado a consecuencia de la falta de frecuencia (o de un mayor *periodo entre oportunidades de viaje*).
- ε es el coeficiente que convierte el *periodo entre oportunidades de viaje* en tiempo desaprovechado (ya que no todo el periodo entre servicios es tiempo desaprovechado). P es el *periodo medio* entre los servicios (es decir, el intervalo entre oportunidades de viaje: entre dos salidas de tren o avión). El valor de ε estará siempre comprendido entre 0 y 0,5, ya que aunque no hubiera ninguna información sobre los horarios disponibles, los viajeros irían llegando aleatoriamente a la terminal y, por término medio, esperarían la mitad del periodo entre expediciones. Si hay más información disponible y los viajeros pueden escoger el momento de llegar a la

terminal el valor de ε se reduce y llegaría a 0, por ejemplo, en el caso de un servicio chárter que esperase a los clientes.

Convencionalmente, aplicamos el valor 1 al coeficiente al tiempo en que el cliente no puede realizar una actividad productiva o útil, pero en el que sin embargo no soporta ninguna incomodidad física o psíquica. Entonces los coeficientes de ponderación serían superiores a 1 (lo que *alarga* psicológicamente el tiempo) en los casos en que hay molestias físicas o incertidumbres (falta de climatización, malos olores, ruidos, movimientos, dificultad de información, sensación de inseguridad). Por el contrario, tendrían coeficientes inferiores a 1 (acortando el tiempo de viaje) los tiempos que permitan realizar otras actividades útiles o placenteras (trabajar, leer, ver televisión, comer, etc.).

Evolución del valor del tiempo

El valor del tiempo, incluso con sus diferentes valores, va evolucionando a medida que cambian ciertos indicadores económico-sociales. En concreto, se ha observado una cierta correlación entre el valor del tiempo y la renta per cápita o el Producto Interior Bruto (PIB).

En diversos estudios o análisis se han utilizado elasticidades con valores comprendidos entre 1 y 1,4 para la elasticidad del valor del tiempo con respecto a la variación del PIB (véase Leboeuf, 2014).

Esta variación del valor del tiempo es relevante en estudios que comprendan horizontes temporales amplios, ya que un crecimiento sostenido del PIB, por ejemplo del 2% durante 10 años, producirá un crecimiento del valor del tiempo (en términos reales) del 21% al 31% según el valor adoptado para la elasticidad.

El aumento del valor del tiempo tiene una gran influencia en el reparto modal, porque produce incrementos de la cuota de mercado en los modos de transporte más rápidos (típicamente tren de alta velocidad y avión), y menores cuotas en modos más lentos (autobús y coche, este último, especialmente en distancias largas).

En efecto, si el valor del tiempo aumenta, el viaje se hace “más costoso” para los modos del transporte más lentos, ya que el viajero emplea en ellos más tiempo (cuyo precio sube). Por ello, un aumento del valor del tiempo hace aumentar la cuota modal de los modos de transporte más rápidos (típicamente el avión y el tren de alta velocidad), mientras que perjudica a los modos más lentos (suelen ser el autobús y el tren convencional).

Naturalmente, si ocurriera al revés, es decir, si el PIB disminuyera en el largo plazo y por ello disminuyera el valor del tiempo, cabría esperar que se prefirieran los servicios más lentos y más baratos.

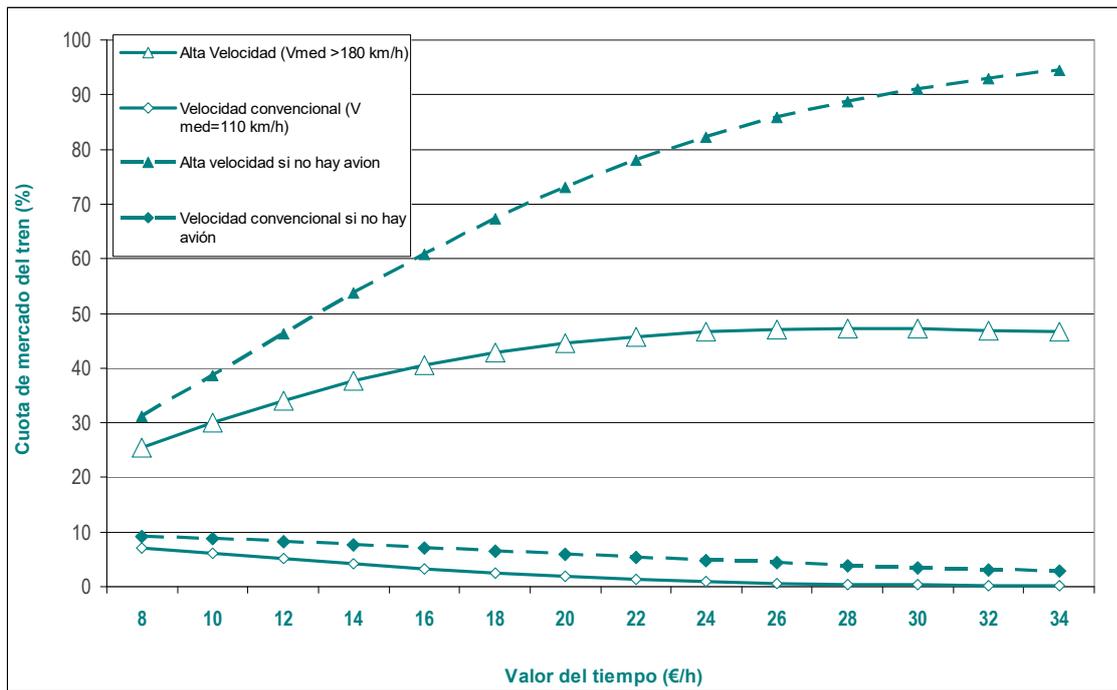
Para tratar de ofrecer una idea de la relación del valor del tiempo con la demanda del tren en función de la velocidad del servicio, se ha aplicado el modelo del coste generalizado a un caso teórico de una ruta de 450 kilómetros de longitud en la que coexisten coche particular, autobús y tren; y se ha comparado con y sin avión en la ruta. Los resultados se muestran en la Figura 7.

Como puede observarse, en el caso de que la oferta ferroviaria sea de alta velocidad, al crecer el valor del tiempo, la cuota de mercado crece, aunque para valores muy altos del tiempo, el crecimiento va siendo menor, puesto que para estos valores altos la oferta del avión va siendo cada vez más atractiva. Pudiera ocurrir que para valores muy altos del valor del tiempo, incluso el tren de alta velocidad perdiera cuota (ocurriría si el tiempo generalizado es superior al del avión). Ello aconseja en las rutas con una fuerte competencia aérea que el tiempo generalizado del tren de alta velocidad sea menor que el del avión, ya que así sólo se asegura una cuota de

mercado inicial muy alta, sino su sostenibilidad en el tiempo. Si no hay avión en la ruta, al aumentar el valor del tiempo la cuota del tren de alta velocidad sigue creciendo, pero llega un punto en que lo hace de forma asintótica, cuando ya llega a monopolizar la totalidad del mercado.

En el caso del tren convencional pierde cuota al crecer el valor del tiempo ya que siendo el tiempo generalizado mayor que el del coche, cuanto mayor sea el valor del tiempo, mayor será el trasvase de viajeros hacia el coche, tanto si hay avión como si no lo hay.

Figura 7. Variación de la cuota de mercado del ferrocarril del ferrocarril por tipo de tráfico para diferentes valores del tiempo (en rutas con y sin avión)



Fuente: García Álvarez (2016).

La incidencia de la puntualidad

En el tiempo de viaje (T_v) debe añadirse al tiempo de viaje programado el retraso que el viajero espera que tenga el servicio de transporte que va a utilizar. Por esta vía es donde la puntualidad (o la percepción subjetiva de la puntualidad) se introduce en el modelo.

Obsérvese que no se trata de incluir el retraso real en el viaje concreto que realiza el viajero, sino el retraso que éste espera o prevé que va a tener, puesto que se está analizando una decisión que se toma *a priori*.

Debe notarse que la expectativa del viajero sobre la puntualidad tiene su raíz en la puntualidad real y en experiencias personales anteriores, pero también en la imagen o percepción que el viajero tiene de la realidad. Más que la puntualidad real (que equivaldría a añadir al tiempo programado el retraso medio) lo que es relevante es la percepción que el viajero tiene de tal puntualidad (lo que lleva a incluir el retraso que él espera).

3.3. La importancia de la frecuencia

Es interesante reflexionar sobre la relación cuantitativa existente entre el tiempo de viaje y la frecuencia de los servicios. Ésta se establece por dos razones fundamentales:

Una, derivada del hecho de que una baja frecuencia obliga a perder tiempo esperando a la oportunidad de viaje, y este tiempo puede ser, para algunos clientes, equivalente al tiempo de viaje. La idea se puede expresar gráficamente señalando que de poco sirve (para el viajero que valora mucho su propio tiempo) el realizar el viaje muy deprisa si luego ha de estar mucho tiempo en la estación esperando que salga un tren³.

La otra interrelación entre la frecuencia y el tiempo de viaje aparece por el hecho de que el cliente lo que necesita normalmente es llegar a destino a una hora determinada. Si un modo de transporte tiene respecto a otro un tiempo muy inferior, podrá ofertar también una menor frecuencia para "salir de su casa" a la misma hora siendo fija la hora de llegada⁴.

En resumen, una baja frecuencia de servicio (o lo que es lo mismo, un alto período entre expediciones), según las necesidades de los clientes, puede tener dos efectos negativos:

- Si el cliente termina su actividad a una hora determinada, tiene que esperar a que haya un servicio de transporte, espera que le supone un coste adicional.
- Si, por el contrario, el cliente tiene fija la hora de llegada, la falta de frecuencia le obligará a salir antes y tener que perder parte de tiempo en destino. En todo caso, desde el punto de vista microscópico, la falta de frecuencia producirá, para estos clientes, un tiempo adicional cuyo coste en general no es muy alto.

Obsérvese que la frecuencia aporta un incremento adicional de viajeros al que puede producirse por otra circunstancia (por ejemplo, por una reducción del tiempo de viaje). Pensemos en la puesta en servicio de una línea de alta velocidad. La reducción del tiempo de viaje (a igualdad de frecuencia y precio) produce una

3. Piénsese, por ejemplo, en un tren de alta velocidad que haga el recorrido entre dos ciudades en 45', mientras que el autobús tarda el doble: 90'. A igualdad de precios y de tiempos en las terminales y al centro, parece que el tren debería tener una cuota de mercado muy superior; pero si hay un autobús cada 30' y un tren cada 4 horas, puede preguntarse un viajero si es preferible tardar 45' menos en el viaje, pero estar esperando tres horas a que haya un tren. Los tiempos generalizados en este caso (suponiendo que la espera es el 50% del periodo entre salidas) serían:

Tren: Tiempo en terminales y al centro + 45' + 0,5 x (60' x 4),

Autobús: Tiempo en terminales y al centro + 90' + 0,5 x 30'.

Es decir, que la diferencia de tiempo generalizado es favorable al autobús en 60', lo que concreta la reflexión citada.

4. Imaginemos una relación determinada en la que en un modo de transporte, por ejemplo un tren de alta velocidad, el tiempo de viaje es de 0:50, mientras que en otro modo de transporte, por ejemplo el autobús, el tiempo de viaje es de 1:50. Para una frecuencia del autobús de 1 hora entre salidas, el tiempo generalizado del viajero será:

$$T_{gbus} = 0,5 \times 1h \text{ (tiempo de espera)} + 1:50 = 2:20.$$

Si se descuentan los 50' del tiempo de viaje del tren de alta velocidad, se obtiene que el periodo entre salidas que conduce al mismo tiempo generalizado es de 3 horas. En definitiva, el viajero tiene las mismas oportunidades de llegar a destino a una determinada hora con una frecuencia cada 3 horas en el caso del tren (con tiempo de viaje de 50') que con una frecuencia de 1 hora en el caso del autobús, siendo su tiempo de viaje de 1:50.

reducción del coste generalizado o desutilidad, y por ello un mayor número de viajeros. Si para atender este aumento del tráfico se programan más trenes (es decir, se aumenta la frecuencia), se reduce nuevamente el coste generalizado y por ello se produce un aumento adicional de viajeros.

3.4. El tiempo generalizado en el coche particular

Para el automóvil de uso particular la frecuencia de servicio es infinita (es decir, el viajero puede iniciar el viaje a la hora que le parezca oportuna), y por tanto el *período* entre salidas es nulo. Además, el coche va de *puerta a puerta*, sin más trámites o pérdidas de tiempo accesorias que las derivadas de las dificultades de aparcamiento. Por ello, para el coche el *tiempo generalizado* coincide con el *tiempo de viaje*, de forma que a la hora de comparar los tiempos de viaje de otros modos de transporte con los que ofrece el automóvil debe considerarse esta ventaja competitiva.

Esta reflexión pone en valor muchas de las ventajas del automóvil particular, y justifica que para viajes cortos el automóvil es el modo de transporte preferido, mientras que a medida que el viaje va siendo más largo, estas ventajas del coche se van diluyendo.

En efecto, en viajes cortos el peso del tiempo de desplazamiento a la terminal, de compra de billete, de acceso al vehículo y de espera por falta de frecuencia tienen un peso elevado (frente al tiempo de desplazamiento propiamente dicho) en el *tiempo generalizado* total; mientras que en viajes largos (para los que estos tiempos accesorios son, en la práctica, los mismos), al aumentar el tiempo de desplazamiento, el porcentaje de aportación de estos tiempos accesorios es menor, y por ello en estas distancias se reduce la ventaja competitiva del coche particular.

Este hecho significa que cuando el operador de transporte público pretenda competir con el coche particular, deberá prestar una atención muy especial al atributo *frecuencia de servicio*.

3.5. Concepto elemental del modelo

Una vez expuestos los conceptos básicos que caracterizan la oferta de transporte, es posible construir un modelo que ayude a predecir el número de viajeros que viajarán (en función de la oferta de todos los modos de transporte) y el reparto modal que es más razonable esperar.

El modelo debe ofrecer resultados cuantitativos adecuados, y además debe permitir simular los efectos (en la demanda y en los ingresos) de las variaciones de la oferta propia o de la competencia (*¿Qué pasaría si subo el precio por euro? ¿Qué pasaría si aumento la frecuencia?, etc.*).

Junto con el conocimiento de las funciones de costes vinculadas a las variables de entrada, el modelo permitirá tomar decisiones tanto de planificación como de operación respecto al diseño de la oferta.

El modelo se expone de forma secuencial, comenzando por los conceptos más sencillos, para ir agregando sucesivamente dimensiones adicionales que aportan una mayor complejidad.

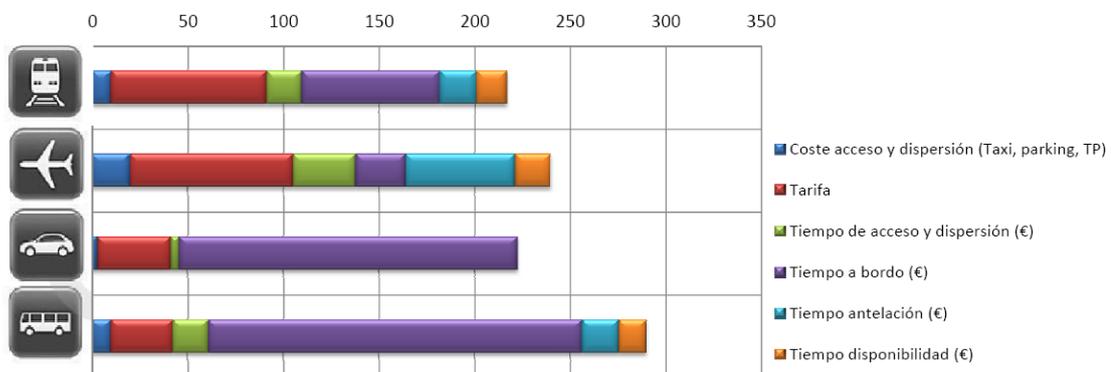
Parte de la consideración de los conceptos que inciden en el comportamiento del consumidor expuestos anteriormente y que se estiman como válidos para sustentar el modelo.

El modelo propuesto comienza evaluando, para cada viajero potencial (designado con el subíndice i), el *coste total* que para él tiene el viaje (C_{Ti}), como resultado de sumar los *costes monetarios* (directos e indirectos) (C_{Mi}) y el *coste del tiempo percibido* (C_{TPi}).

$$C_{Ti} = C_M + C_{TPi} \dots$$

- Los *costes monetarios* (básicamente el coste del billete y los costes de desplazamiento a las terminales) no se correlacionan con la variable independiente que proponemos en esta fase del modelo, que es el *Valor del tiempo* (VT_i) de cada persona, por lo que el *coste monetario* (CM) no se ha figurado con el subíndice i .
- El *coste del tiempo percibido* (C_{TPi}) es el producto del *valor del tiempo*, VT_i (diferente para cada persona), por la cantidad de *tiempo percibido* (T). Este último sumando se compone de diversos sumandos parciales, pero no se puede establecer *a priori* una correlación entre el tiempo total percibido por una persona y su *Valor del tiempo*, razón por la cual, en el modelo, el *Tiempo total empleado* (T) no se ve afectado por el subíndice i .

Figura 8. Coste generalizado en la ruta de Madrid a Barcelona en 2013 en diversos modos de transporte



Fuente: Mcrit (2014).

En suma, la fórmula que para un viajero concreto adopta el coste total si utiliza una oferta de transporte⁵ (designado por el subíndice m) es del tipo:

⁵ En realidad, la elección del viajero se realiza entre varias ofertas de transporte, caracterizadas cada una por unos atributos de precio, frecuencia, tiempo de viaje, puntualidad, etc., (con independencia del modo de transporte que le da soporte). Para cada una de ellas, el consumidor realiza implícitamente la valoración y opta por una de ellas. Cuando nos referimos a elección entre modos de transporte, estamos asumiendo que cada modo de transporte sólo presenta una oferta (lo que puede no ser cierto, ya que en la misma ruta puede haber, por ejemplo, una oferta de avión convencional y una oferta de vuelos low-cost, y en el futuro puede haber varias compañías ferroviarias). Sin embargo, dada la tradición de emplear modelos semejantes para explicar la elección entre modos de

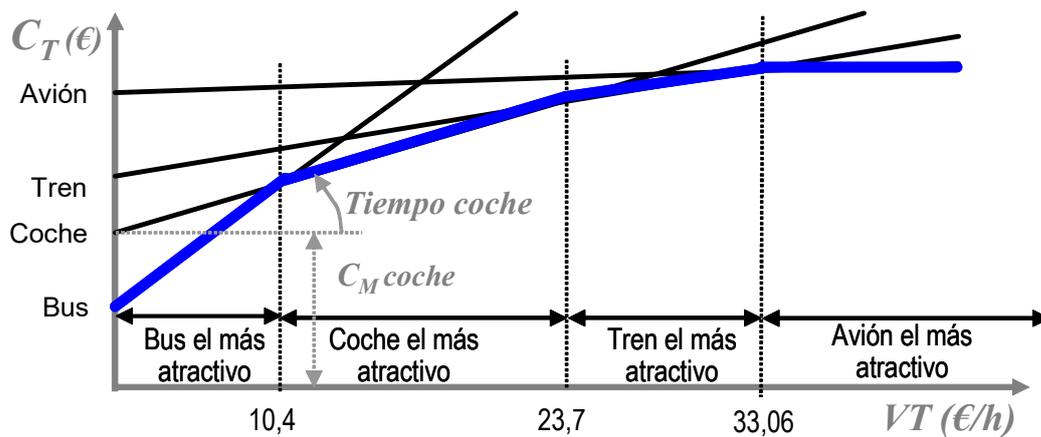
$$C_{Tm,i} = CM_m + VT_{m,i} \times T_m \dots$$

Ello significa que, si representamos en un diagrama cartesiano en ordenadas el coste total de viaje (CT) y en abscisas el Valor del tiempo (VT) para cada viajero, cada una de las ofertas de transporte tendrá un coste, representado por una recta. Tiene una “parte fija” independiente del tiempo percibido (“parte fija” que coincide con los costes monetarios) y una “parte variable”, cuya pendiente es el tiempo percibido. Es forma característica de las curvas de coste de productos con un coste fijo y un coste variable lineal (en este caso, VT).

Ello permite, para una ruta concreta en la que concurren varias ofertas, con una estimación media del coste monetario y del tiempo percibido en cada modo (u oferta) de transporte, trazar las líneas de Coste total de cada modo de transporte en función del Valor del tiempo (VT). Para cada valor del VT , el modo de transporte más atractivo es aquel cuya recta de coste total toma valores más bajos en ese punto.

En la figura, como ejemplo, se ha realizado la aplicación para la ruta Madrid-Barcelona con la oferta vigente en febrero de 2004.

Figura 9. Coste total del viaje Madrid-Barcelona por modos de transporte en función del Valor del tiempo



Puede observarse en la figura que para aquellos viajeros cuyo valor del tiempo esté por debajo de 10,4 euros/hora el modo de transporte con menor coste total (y por ello el más atractivo) es el autobús; para los viajeros que tienen un valor del tiempo entre 10,4 y 23,7 euros/hora, el coche es el modo más atractivo; entre 23,4 y 33,06 euros/hora, es el tren; y para más de 33,06 euros/hora, el avión.

Fuente: Elaboración propia.

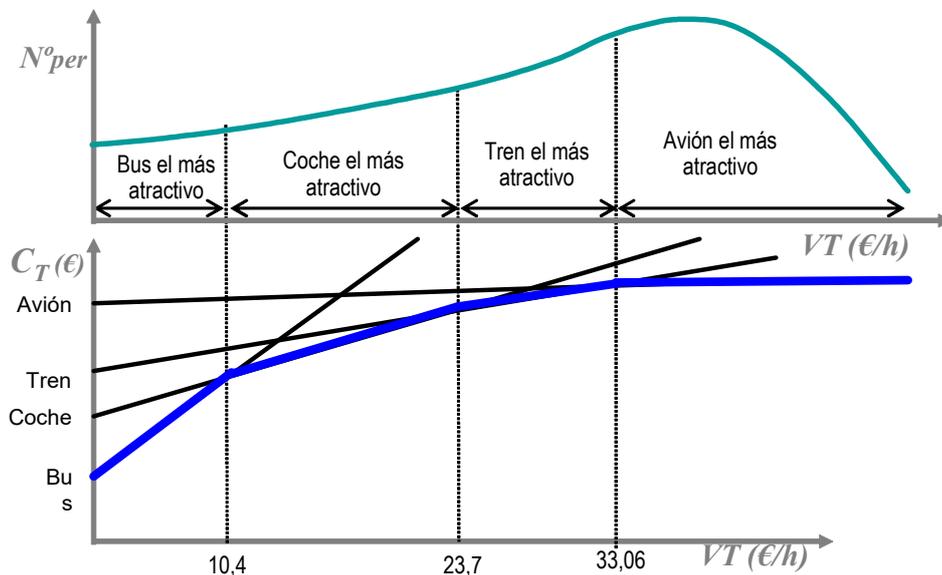
Por otra parte, es posible conocer, mediante encuestas y otro tipo de estudios, el porcentaje de los potenciales viajeros que tienen un Valor del tiempo (VT) concreto.

transporte, nos referiremos indistintamente a oferta o modos de transporte, aunque en rigor el análisis se debe de referir a ofertas de transporte que, como queda expuesto, pueden ser varias diferentes para un mismo modo de transporte.

Así, una encuesta permitiría determinar, por ejemplo, que un 1% de los viajeros tienen un *VT* de entre 2 y 3 euros/hora; un 1,5%, entre 3 y 4 euros/hora; un 2%, entre 4 y 5 euros/hora... y así sucesivamente, lo que permite dibujar una gráfica de la distribución de densidad del *Valor del tiempo*, de forma que en ordenadas se figura el porcentaje de viajeros potenciales cuyo *Valor del tiempo* es el número que corresponde a la abscisa. El porcentaje de viajeros cuyo *Valor del tiempo* está entre dos valores concretos es el área de dicha curva comprendida entre los dos valores. Ello habilita a superponer esta gráfica con las curvas de coste, y determinar así el porcentaje de viajeros potenciales que encuentran más atractiva la oferta de cada uno de los modos de transporte en concreto.

Se ha hecho este ejercicio para la ruta Madrid-Barcelona, para la que se ha supuesto una curva de densidad determinada, resultando lo siguiente:

Figura 10. Segmentación de los viajeros potenciales a los que les resulta más atractivo cada uno de los modos de transporte en la ruta Madrid-Barcelona



Sobreponiendo a la figura anterior la función de densidad del número de viajeros que tiene un *Valor del tiempo* determinado, el número de viajeros para los que un modo de transporte es más atractivo es proporcional al área que queda bajo dicha curva entre los valores de corte de las curvas de costes.

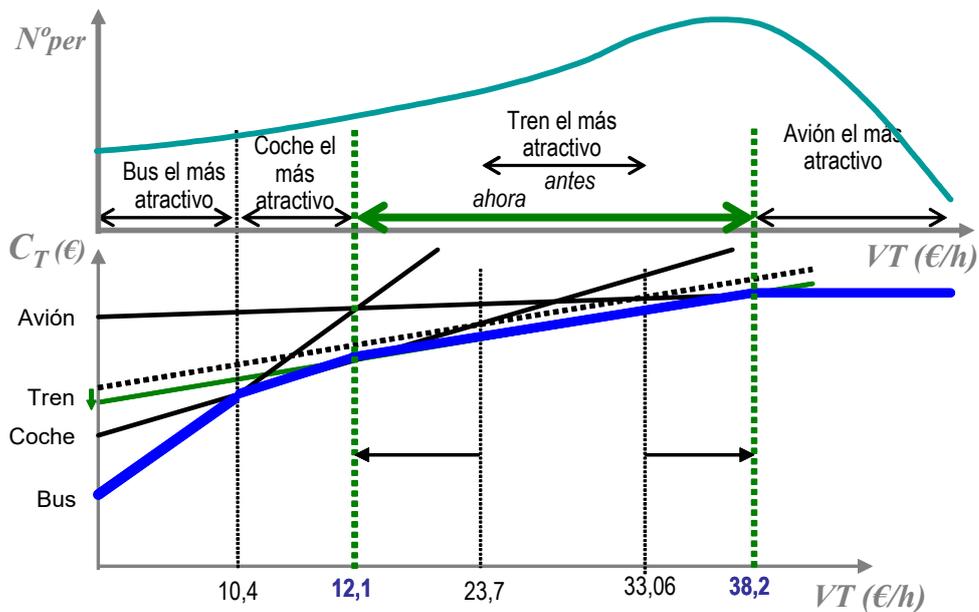
Fuente: Elaboración propia.

El modelo permite comprobar con relativa facilidad el efecto que sobre la competitividad con respecto a la oferta de otros modos de transporte tiene una variación de la oferta propia en cualquiera de sus variables. Así, por ejemplo, si se baja el precio del billete de una oferta de transporte (utilizaremos el modo ferroviario como referencia), bajan los costes monetarios y, por ello, la curva de costes totales se desplaza paralelamente a la anterior hacia abajo, con lo que se amplía el ámbito en el que el ferrocarril es más competitivo. Si se reduce el tiempo de viaje (o de la compra de billetes, o se aumenta la comodidad reduciéndose así el *tiempo percibido*), la pendiente de la línea se hace menor, por lo que también

mejora la competitividad de la oferta (ocurre, obviamente, lo contrario en el caso de subir el precio o aumentar el tiempo percibido).

En la figura se comprueba gráficamente el efecto de una bajada del precio del billete de tren, que se traduce en una ampliación de la banda de *Valores del tiempo* para los que el ferrocarril resulta más competitivo.

Figura 11. Incidencia de un cambio de la oferta en la segmentación de los viajeros potenciales a los que les resulta más atractivo cada uno de los modos de transporte en la ruta Madrid-Barcelona



Una variación de la oferta de un modo de transporte (por ejemplo del ferrocarril) en el sentido de bajar su precio supone un desplazamiento en paralelo de su curva de coste total hacia abajo, ampliando el ámbito de su competitividad, y por ello el número de viajeros para los que resulta más atractivo.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo hace posible, por ello, conocer el número de viajeros potenciales a los que cada una de las ofertas de transporte les resulta más atractiva (podría conceptuarse como un modelo de reparto modal), y además permite aproximarse de forma sencilla e intuitiva a las variaciones de competitividad al cambiar las variables básicas de la oferta.

4. APLICACIÓN DEL MODELO DE COSTE GENERALIZADO

Una vez expuesto el modelo del coste generalizado y cómo su formulación *logit* conduce a la predicción de las cuotas de mercado de cada modo, se va a analizar la sensibilidad de la demanda a las variaciones de las tres variables fundamentales que caracterizan la oferta (precio, frecuencia y tiempo de viaje) según el modelo, así como a presentar el llamado *efecto de las tres horas* y a desarrollar un ejemplo de aplicación del modelo.

4.1. Sensibilidad de la demanda al precio, frecuencia y tiempo de viaje

La demanda depende, como se ha expuesto, fundamentalmente del precio pagado por el viajero, de la frecuencia ofertada y del tiempo generalizado. Seguidamente se van a presentar algunas reflexiones extraídas de la aplicación del modelo sobre las relaciones entre cada una de estas tres variables y los ingresos, ilustrándolas con resultados de la simulación para disponer de una idea del orden de magnitud de las elasticidades respectivas según los casos.

En el caso de la sensibilidad o elasticidad al precio, se analiza también el efecto de la variación del precio en los ingresos, lo que es relevante en este caso, mientras que en los otros dos casos no lo es tanto, pues al mantenerse el precio fijo, las variaciones de la demanda que se derivan de cambios en la frecuencia o en el tiempo generalizado se trasladan proporcionalmente a los ingresos.

Recordemos que en el modelo de reparto modal tipo *logit*, la probabilidad de que un viajero escoja un modo de transporte i de entre los n modos disponibles viene dada por la expresión:

$$P_i = \frac{e^{(-\lambda \cdot C_i)}}{\sum_{i=1}^n e^{(-\lambda \cdot C_i)}}$$

Donde:

- P_i : probabilidad de escoger el modo i ;
- C_i : coste generalizado de viaje con el modo i (tarifa T_i más otros costes);
- n : número de modos de transporte;
- λ : parámetro de sensibilidad del modelo.

El número de viajeros de cada modo de transporte, del tren, por ejemplo, depende del “coste generalizado” (la suma de la tarifa y otros costes monetarios y del tiempo utilizado) del propio modo y de cada uno de los demás.

4.1.1. Sensibilidad al precio

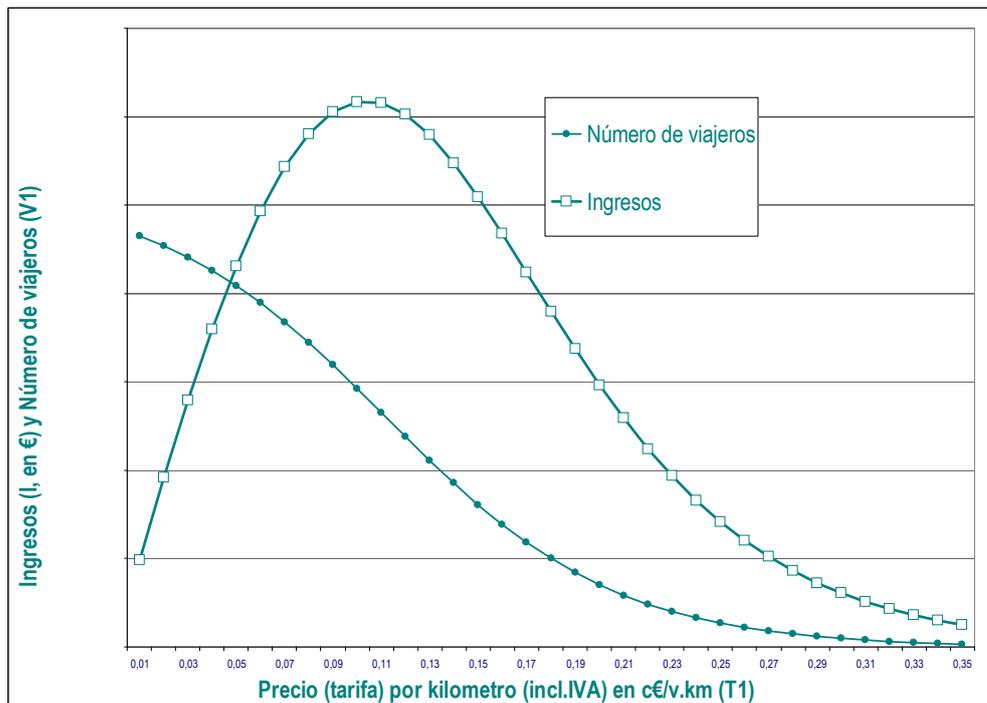
Una reducción de la tarifa del tren, manteniendo idénticas todas las demás características de la oferta (tanto del tren como de otros modos de transporte) produce una reducción del “coste generalizado” del servicio ferroviario, y por ello un aumento de su cuota modal y del número de viajeros que transporta.

Ello significa que el número de viajeros (que se obtiene multiplicando el mercado global por la cuota del modo ferroviario) siempre se reduce al aumentar la tarifa. La curva que representa la variación de la demanda al variar la tarifa es monótona decreciente y tiene dos tramos: en valores bajos de la tarifa es cóncava, y en valores más altos, pasa a ser convexa. Cuando la tarifa se reduce mucho, por debajo de cierto valor, el crecimiento del número de viajeros “se agota” debido a que quedan pocos viajeros a captar en otros modos de transporte y la inducción de nuevos viajeros pasa a ser muy débil (García y Rubio, 2016).

Los ingresos del servicio de transporte se obtienen multiplicando el número de viajeros por la tarifa media aplicada. La curva de variación de ingresos con la tarifa no es monótona: puede comprobarse matemáticamente que tiene un máximo y sólo uno, y se compone de tres tramos: para tarifas bajas, al crecer las tarifas, los ingresos también crecen hasta llegar a un punto de ingreso máximo; desde este punto, al crecer la tarifa, los ingresos decrecen en una curva que tiene dos tramos: uno cóncavo hasta un cierto valor de la tarifa y otro convexo a partir de ese valor.

En la figura se representan las formas de las curvas-tipo de variación del número de viajeros y de los ingresos al cambiar la tarifa.

Figura 12. Variación del número de viajeros y de los ingresos al cambiar la tarifa

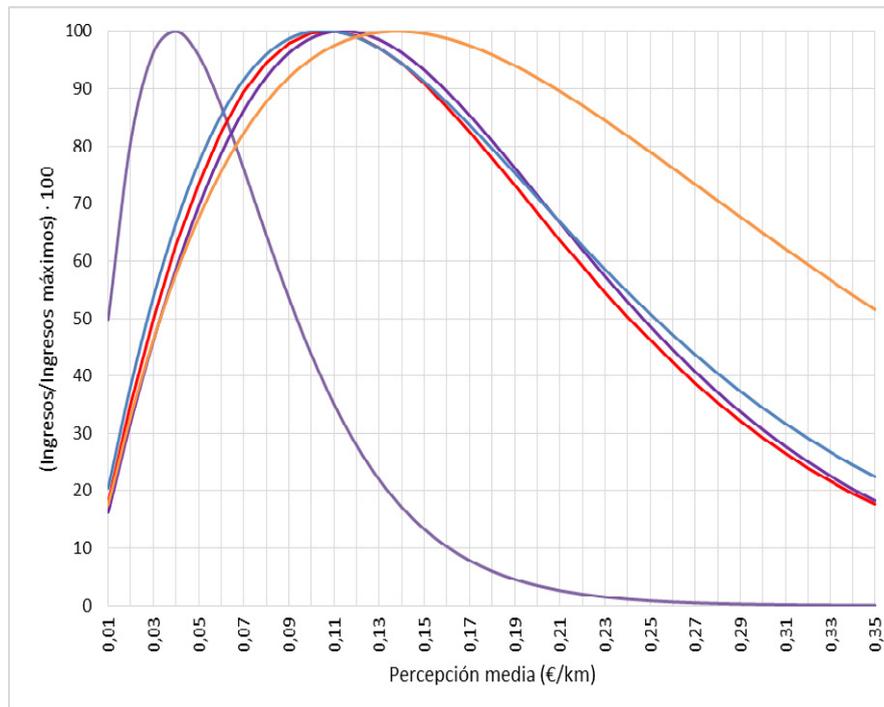


El número de viajeros siempre aumenta al bajar la tarifa, mientras que los ingresos tienen un máximo (y sólo uno) al variar la tarifa,

Fuente: García Álvarez y Rubio García (2016).

En la siguiente figura se representa la curva de ingresos en función del precio en diversas rutas. Puede comprobarse cómo la curva es diferente en cada ruta, pero todas las curvas se ajustan a las características enunciadas: tienen un máximo y dos tramos, uno creciente hasta que la tarifa llega al punto que produce el máximo ingreso, y otro tramo decreciente para tarifas más altas.

Figura 13. Variación de los ingresos al cambiar la tarifa en el caso tipo



El valor 100 corresponde al máximo ingreso que se puede obtener en la ruta al variar la tarifa. Cada curva corresponde a una ruta española con diferente distancia.

Fuente: Mcrit (2016).

4.1.2. Sensibilidad a la frecuencia

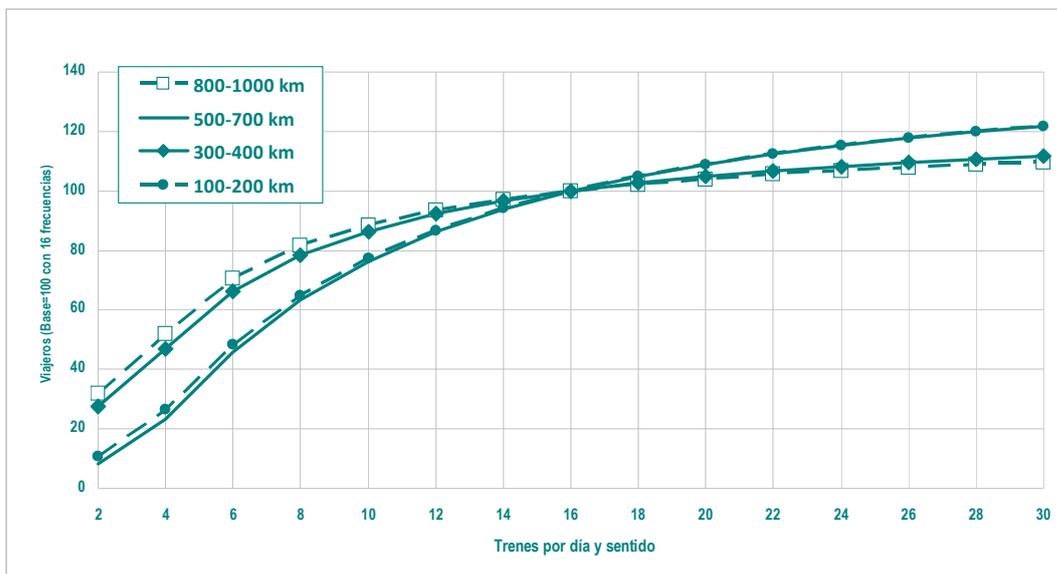
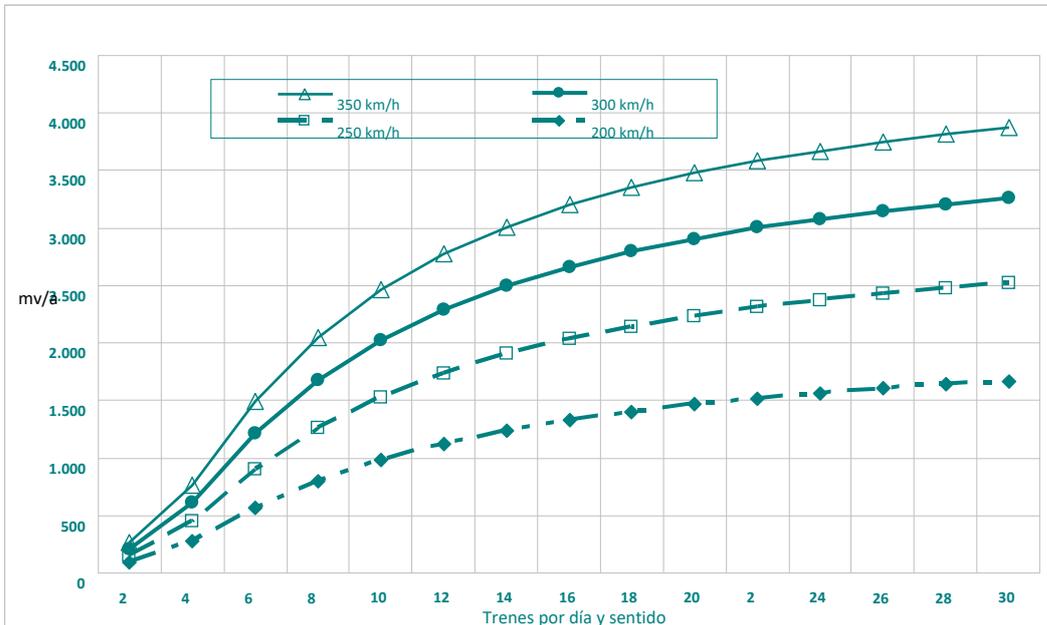
Un aumento de la frecuencia supone una reducción del tiempo de espera y, por ello, del coste generalizado. Consecuentemente, se produce un aumento de demanda. La elasticidad de la demanda con respecto a la frecuencia es siempre positiva.

Con respecto a la elasticidad entre frecuencia y demanda, puede señalarse lo siguiente:

- Los servicios con una baja demanda inicial son siempre más sensibles al aumento de la frecuencia. A medida que la frecuencia va siendo mayor, cada expedición adicional aporta menos viajeros. A partir de 16 frecuencias diarias, el aumento de la frecuencia produce incrementos inapreciables de la demanda.
- Los servicios de recorridos cortos (de menos de 300 kilómetros) y de distancias entre 500 y 700 kilómetros en los que es fuerte la competencia del coche particular (que, recordemos, tiene una frecuencia “infinita”) y del avión, la sensibilidad a la frecuencia es alta. En segmentos de distancias muy largas, la variación del tiempo de espera no resulta relevante con respecto al tiempo de viaje, y en distancias entre 300 y 400 kilómetros no hay competencia real con el avión, por lo que la elasticidad es más baja.
- La sensibilidad de la demanda a la frecuencia será mayor cuanto mayor sea la velocidad del tren. Ello se debe a que cuanto mayores sean las velocidades,

menor será el tiempo de viaje y, por ello, mayor será el peso del tiempo de espera en el coste generalizado.

Figura 14. Variación del número de viajeros al cambiar la frecuencia



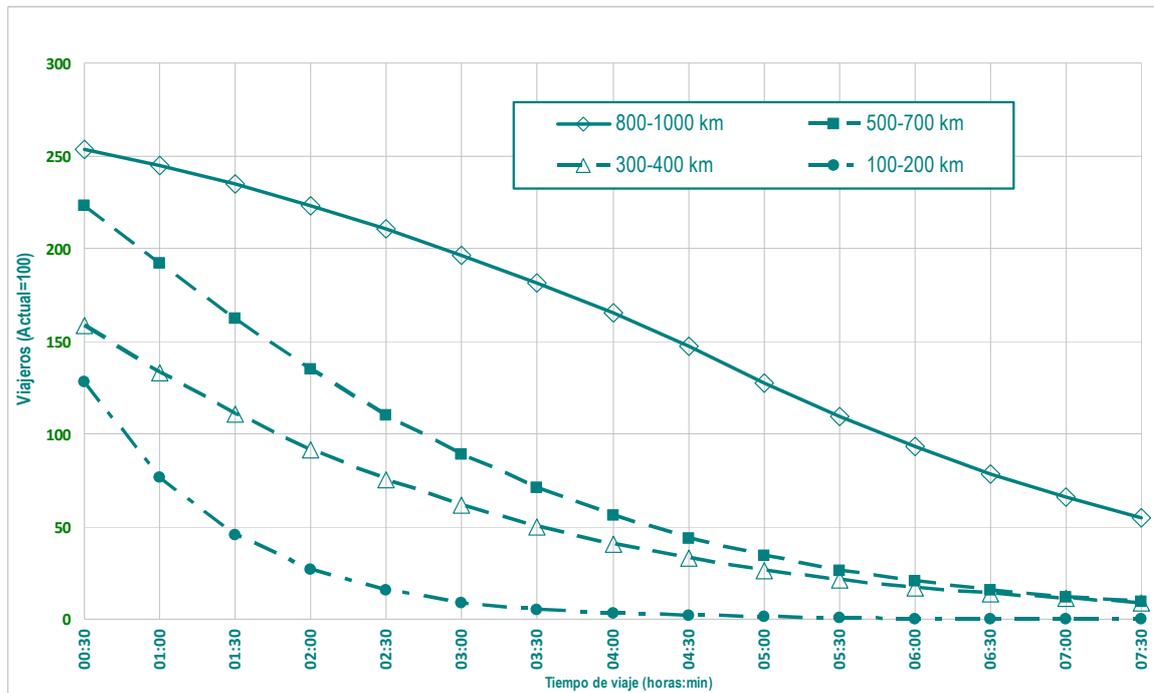
Arriba: variación del número de viajeros en una ruta de 500-700 km al cambiar la frecuencia para diferentes velocidades máximas del servicio. Puede observarse que la elasticidad de la demanda a la frecuencia es mayor cuando la frecuencia es baja. También que la elasticidad es mayor con velocidades más altas. Abajo: variación comparada de la demanda al cambiar la frecuencia en rutas de diferente longitud. Para rutas cortas y entre 500 y 700 km, en las que la competencia es fuerte con el coche y el avión, la elasticidad es mayor que para rutas de longitud muy larga y de distancias entre 300 y 400 km.

Fuente: Mcrit (2016).

4.1.3. Sensibilidad al tiempo de viaje

Un menor tiempo de viaje supone una reducción del coste generalizado y, por tanto, un aumento de la demanda. La elasticidad de la demanda con respecto al tiempo de viaje es siempre negativa.

Figura 15. Variación del número de viajeros al cambiar el tiempo de viaje

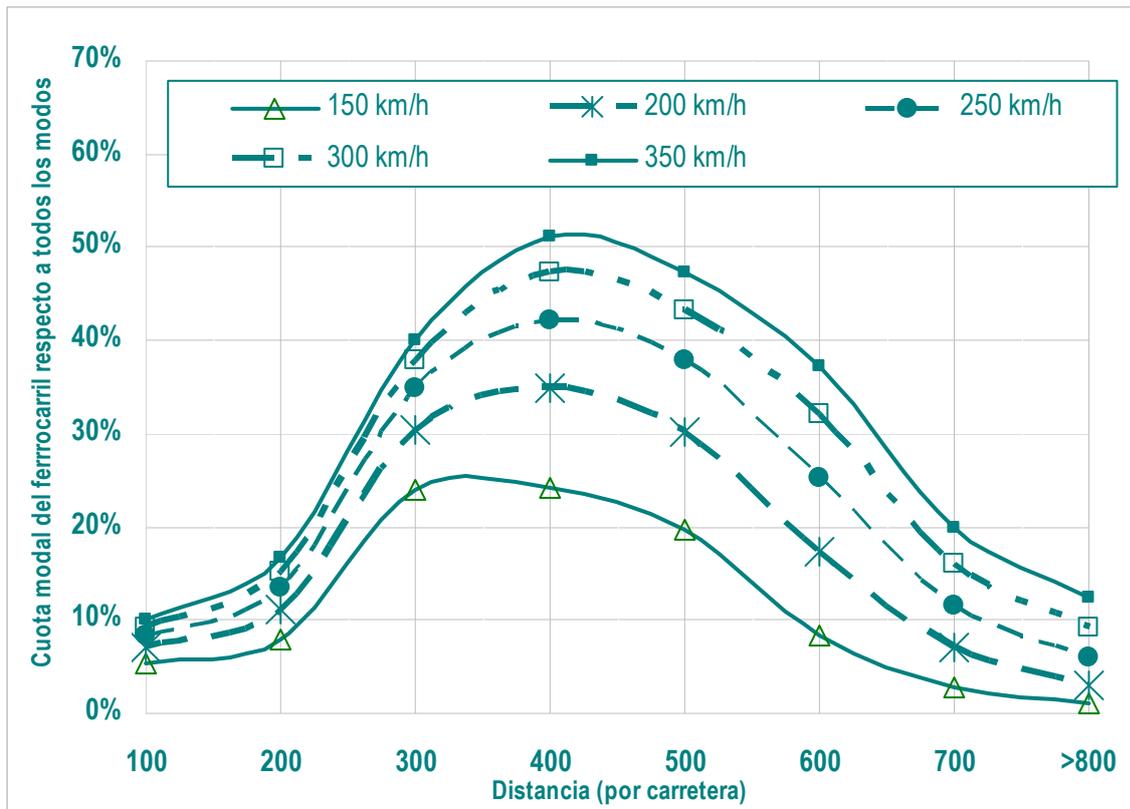


El número de viajeros siempre aumenta al reducirse el tiempo de viaje. La base 100 es el número de viajeros correspondiente a una velocidad media normal en servicios de alta velocidad.

Fuente: Mcrit (2016).

La velocidad máxima tiene un efecto importante en la demanda. Para ponerlo de relieve se analiza la cuota de mercado del ferrocarril en el conjunto de todos los modos de transporte para diversas velocidades máximas y en función de la distancia por carretera. Puede observarse que, para distancias del orden de 500 kilómetros, que son las más representativas de la movilidad de larga distancia en España (véase Galán et al., 2015), si se pasa de una velocidad máxima de 200 km/h a la de 350 km/h (esto es, de una línea mejorada a una nueva línea de alta velocidad) la cuota de mercado pasa del 30 al 47%.

Figura 16. Sensibilidad de la demanda del tren a la velocidad en función de la longitud de la ruta



Se ha aplicado un modelo de coste generalizado a rutas reales representativas de cada rango de distancia, aunque aplicándoles la misma oferta a todas ellas para aislar el efecto de la velocidad: 20 frecuencias y un precio medio de 0,13 euros/km aplicado sobre distancia ferroviaria. En realidad, a velocidades menores suelen aplicarse tarifas también menores, con lo cual las cuatro líneas tenderían a aproximarse. Para pasar de velocidad de proyecto a velocidad media se ha aplicado un factor 0,7. Todas las relaciones escogidas a partir de 400 km tienen oferta aérea. De no ser así, las cuotas ferroviarias serían mayores.

Fuente: Mcrit (2016).

4.2. El efecto de las tres horas en el reparto modal tren-avión

La reflexión expuesta sobre el comportamiento del consumidor debe complementarse con una idea adicional que resulta de gran importancia a la hora de anticipar la demanda y analizar su comportamiento. El tema es de actualidad en la medida que se está diseñando y construyendo un número importante de líneas de alta velocidad: se trata de la pérdida de cuota de mercado (en distancias de entre 300 y 600 km) que sufre el ferrocarril frente al avión cuando el tiempo de viaje se sitúa por encima de las tres horas, y que denominamos el *efecto de las tres horas*.

El efecto consiste en que, si en una ruta determinada el tiempo de viaje está por debajo de las 2,5 horas, la cuota de participación del ferrocarril en el mercado que

integran el tren y el avión es siempre superior al 80%. Cuando el tiempo de viaje del tren supera las 3,5 horas, su cuota se sitúa por debajo del 50%, y con tiempos de alrededor de tres horas alcanza valores del orden del 60%. Ello significa que, en este entorno de tiempo, una reducción del tiempo de viaje puede representar la captación de un número importante de viajeros.

Este hecho ha sido contrastado empíricamente (como puede verse en la figura), y puede ilustrar el hecho de que el valor del tiempo (en cada momento y para cada persona) no es el mismo, sino que puede aumentar en función del tiempo dedicado al transporte. En efecto, en este caso, el reparto modal sugiere que el valor del tiempo aumenta en el entorno de las dos a tres horas, mientras que vuelve a reducirse para tiempos superiores.

Ello puede ser importante en este segmento caracterizado por esta distancia y tiempo, en el que la más importante motivación del viaje es la realización de negocios, el avión es el principal competidor del ferrocarril, y por ello resulta significativo comparar la cuota del tren a la del mercado integrado por el tren y el avión (sin considerar en el mercado, a estos efectos, el coche particular ni el autobús).

Formulación clásica

La cuota de mercado del tren y la del avión en una ruta en el mercado conjunto de ambos modos suele referirse a la variable básica “Tiempo de Viaje del Tren” (t) y responde a la llamada “curva de las tres horas”, cuya ecuación (según Martín Cañizares, 2011) es una polinómica de orden tres:

$$TS(t) = 4,686 \times t^3 - 41,182 \times t^2 + 89 \times t + 40,5$$

$$Y \quad TS(a) = 100 - TS(t)$$

En donde $TS(t)$ es la cuota de mercado del tren (en porcentaje) en el conjunto formado por tren y avión; t es el tiempo de viaje del tren (en horas) y $TS(a)$ es la cuota de mercado del modo aéreo en el conjunto formado por tren y avión.

Adaptación para valores extremos

Judith Fernández (2012) señala que esta formulación se comprueba que se ajusta a los datos reales para valores del tiempo de viaje (t) comprendidos entre 1,5 y 4,25 horas.

Valores por debajo de 1,5 horas no suelen tener sentido, pues en estos casos la oferta aérea suele desaparecer -en el caso español la ruta de Madrid a Zaragoza es un ejemplo representativo-.

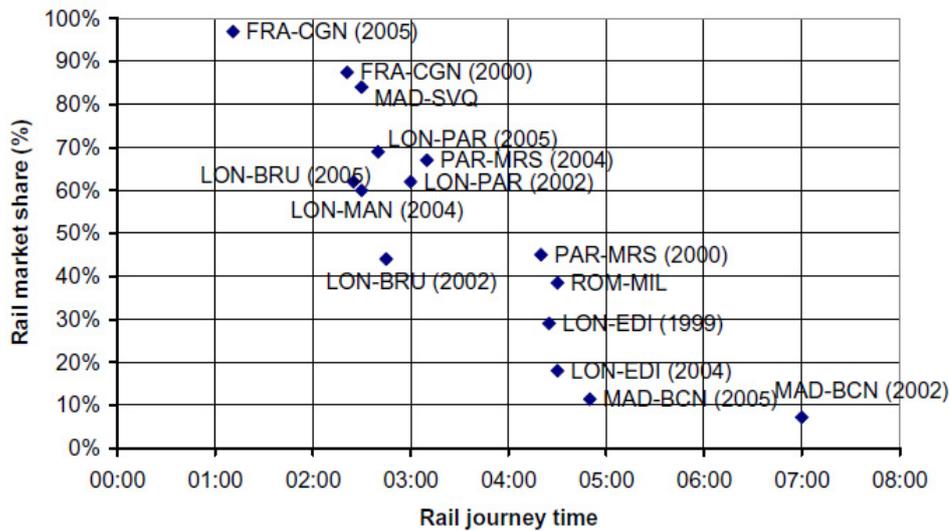
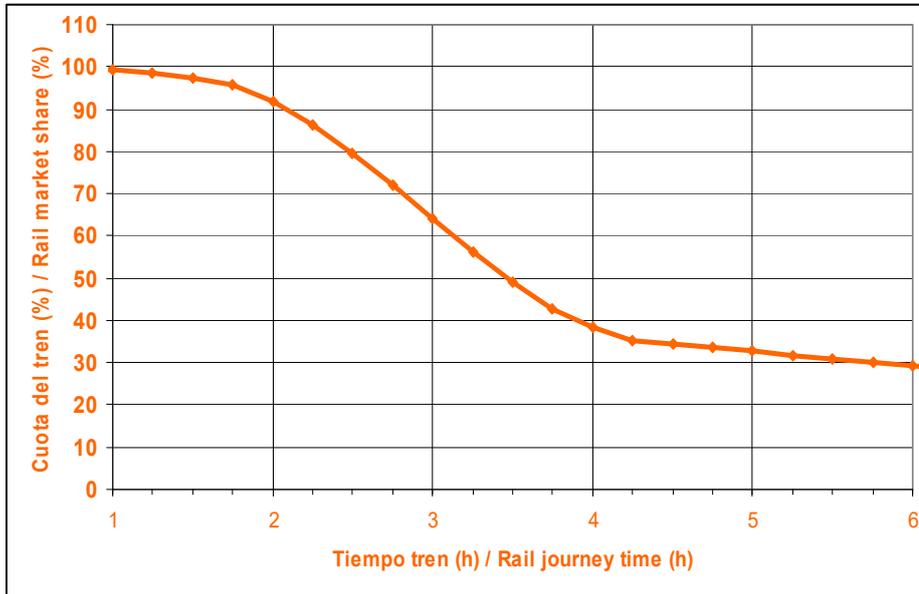
Para valores por encima de 4 horas 15 minutos es más útil una representación lineal, que, aplicando datos de la experiencia internacional -siempre según Fernández (2012)-, puede expresarse como:

$$TS = 34,35 - 3,5 \times (4,25 - t)$$

Características generales de la curva

Esta ecuación permite estimar la cuota de mercado “normal” del tren en función de su tiempo de viaje.

Figura 17. Curva de las tres horas: Relación entre la cuota del tren en el mercado Tren+Avión y tiempo de viaje en las principales rutas mundiales y españolas entre 400 y 600 kilómetros



Fuente: Figura superior: Martín Cañizares (2011) para menos de 4,25 horas y Fernández Jánez (2012) para más de 4,25 horas; Figura Inferior: Steer Davies Gleave.

La curva de las tres horas, estimada a partir de datos de casos reales, tanto de España como internacionales, muestra cómo cuando el tren tiene un tiempo de viaje de menos de dos horas debe obtener cuotas de mercado por encima del 90%, y si tiene un tiempo de viaje de más de tres horas y media, las cuotas están por debajo del 50%.

La mayor ganancia de cuota de mercado se produce con reducción del tiempo de viaje del tren cuando éste queda entre las tres horas quince minutos y las dos horas quince minutos; y más en concreto, en intervalos de 15 minutos, la mayor ganancia es al pasar de 3 horas a 2 horas 45 minutos, intervalo en el que se ganan 7,85 puntos porcentuales de cuota.

Horquilla en las cuotas explicadas por la curva de las tres horas

López Pita (2008) afirma la existencia de esta curva de tendencia general, concluyendo que es análoga para relaciones nacionales e internacionales, pero advierte de la existencia de una horquilla importante. Indica, por ejemplo, que para un tiempo de viaje de en torno a cuatro horas, la cuota de mercado del ferrocarril puede variar 30 puntos. En la misma línea, Steer Davies (2006) señala que, en rutas con tiempo de viaje del tren de alrededor de dos horas y media, las cuotas del tren varían entre 44% y el 85%.

Judith Fernández ha explicado (2015) que, en parte, estas variaciones pueden deberse a diferencias en el precio, y muestra cómo en España desde la reducción de tarifas del AVE practicada en febrero de 2013 las cuotas modales se han acercado bastante a las predecibles por la curva de las tres horas.

4.3. Ejemplos de aplicación del modelo

Para una mejor comprensión del modelo de coste generalizado se incluye por una parte un ejemplo de los costes unitarios aplicados para el cálculo del coste generalizado, y por otra, la aplicación a una ruta en la que se implanta un tren de alta velocidad en sustitución de un tren convencional.

4.3.1. Ejemplo de costes unitarios aplicados como integrantes del coste generalizado

La aplicación del modelo de coste generalizado requiere estimar diversos costes que forman parte del mismo para cada modo de transporte, como son los costes operativos del coche, precios, tiempos de acceso y de espera.

En la tabla se figuran como ejemplo de valores utilizados los costes aplicados en el estudio de Mcrit (2012) para el proyecto Optired.

Tabla 2. Ejemplo de valores unitarios de costes aplicados en un modelo de coste generalizado

	Costes directos					Costes indirectos						
	Coste Acceso al modo (€)	Coste de Viaje			Coste Acceso del modo al destino (€)	Tiempo Acceso al Modo (min)	Disponibilidad de servicio (min)	Tiempo de antelación (min)	Tiempo a bordo (min)	Factor de Comodidad	Acceso del modo de transporte hasta el destino (min)	
		Tarifa	Costes Op.	Peaje								
Coche	0	-	0,11 (€/km)	Peaje del itinerario óptimo por carretera para ese trayecto	10	5	0	0	Tiempo por carretera del recorrido óptimo para cada trayecto	1,25	5	
Bus	Long <800 km	0,066 (€/km)	-	-					30% superior al tiempo en coche	1,1		
	Long >800 km								20% superior al tiempo en coche			
Ferrocarril	Tren Tipo 1: AVE	5	Tarifa estándar para cada recorrido según la Web de Renfe reducida un 28,85% en concepto de bonos y descuentos.	-	-	5	20 minutos para los residentes del Área Metropolitana de la capital y 40 minutos para el resto.	Mitad del tiempo entre salidas (máx.:100 min)	20	De acuerdo con los horarios publicados por Renfe.	1	20 minutos para los residentes del Área Metropolitana de la capital y 40 minutos para el resto.
	Tren Tipo 2: Alvia, Alaris, Euromed, Altaria										1	
	Tren Tipo 3: resto de trenes convencionales y enlaces										1,2	
Modo aéreo	<3 exp/días entido	15	100 €	-	-	20	20 minutos para los residentes del Área Metropolitana de la capital y 40 minutos para el resto. 60 minutos si no existe aeropuerto en la provincia		60	Según la Relación (ecuación que relaciona el tiempo de viaje con la distancia en línea recta)	1	20 minutos para los residentes del Área Metropolitana de la capital y 40 minutos para el resto. 60 minutos si no existe aeropuerto en la provincia

Fuente: Mcrit (2012).

4.3.2. Ejemplo de aplicación modelo en una ruta

Se desarrolla seguidamente un caso-ejemplo simplificado de la aplicación del modelo del coste generalizado para predecir los cambios de reparto modal y volúmenes de transporte por modos tras la introducción del tren de alta velocidad. No se ha considerado la demanda inducida ni variaciones en la oferta de los modos de transporte en competencia.

Como puede observarse, al pasar el tren de un tiempo de viaje de 6,5 horas a 2,5 horas, subiendo el precio de 35 a 70 euros y aumentando la frecuencia de forma que el periodo medio entre salidas pase de 5 horas (tres frecuencias diarias) a 1 hora (17 frecuencias), el número de viajeros anuales se multiplica por 5,96 y los ingresos por 11,93.

Tabla 3. Ejemplo de aplicación del coste generalizado para predecir el reparto modal en una ruta: implantación del tren de alta velocidad

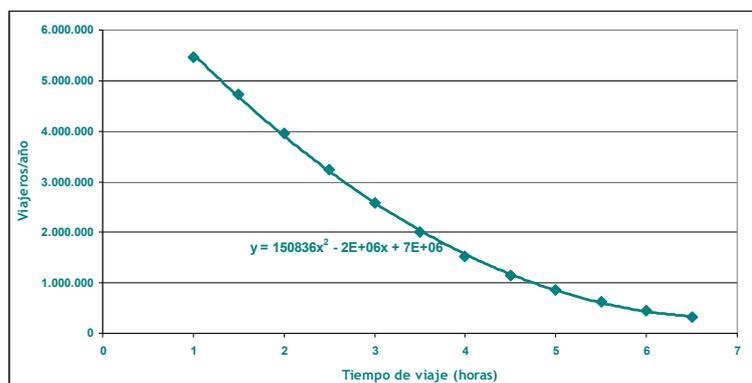
	Tiempo viaje (h)	Precio (€)	Periodo medio (1/F) (h)	Tiempo espera (C=0,4) (h)	Tiempo acceso disp y terminal (h)	Tiempo total (h)	Coste en tiempo (€)	Coste generalizado (€)	Cuota modo (%)	Viajeros/ año en el modo $J=(I/100) \times$ Mercado total	Ingresos (sin IVA) (M€) $K=JxB/ (1,1 \times 1.000.000)$
CASO 1 (Tren convencional)											
Tren	6,5	35	5	2	0,75	9,25	138,75	173,8	6,36	572.353	18,21
Coche (1,8 pax)	6,25	35	0	0	0,1	6,35	95,25	130,3	44,77	4.029.038	128,20
Autobus	8,5	32	2	0,8	0,8	10,10	151,50	183,5	4,11	369.572	10,75
Avión	1,2	80	1,25	0,5	1,65	3,35	50,25	130,3	44,77	4.029.038	293,02
CASO 2 (Tren de alta velocidad)											
Tren	2,5	70	1	0,4	0,75	3,65	54,75	124,8	37,96	3.416.402	217,41
Coche (1,8 pax)	6,25	35	0	0	0,1	6,35	95,25	130,3	29,66	2.669.372	84,93
Autobus	8,5	32	2	0,8	0,8	10,10	151,50	183,5	2,72	244.854	7,12
Avión	1,2	80	1,25	0,5	1,65	3,35	50,25	130,3	29,66	2.669.372	194,14
Mercado total:		9.000.000		viajeros /año		Landa	0,045	Valor del tiempo		15	euros/hora

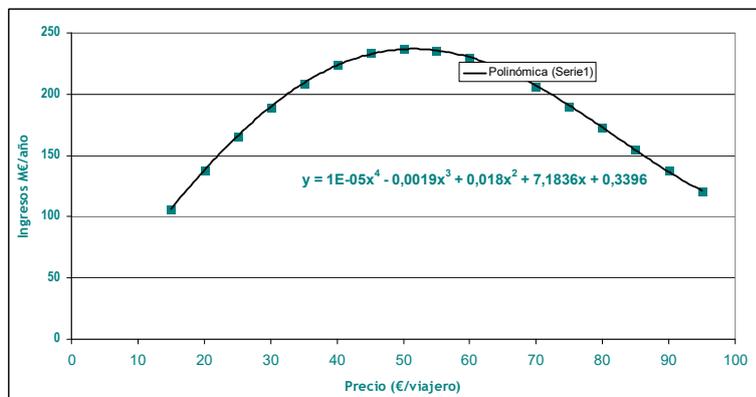
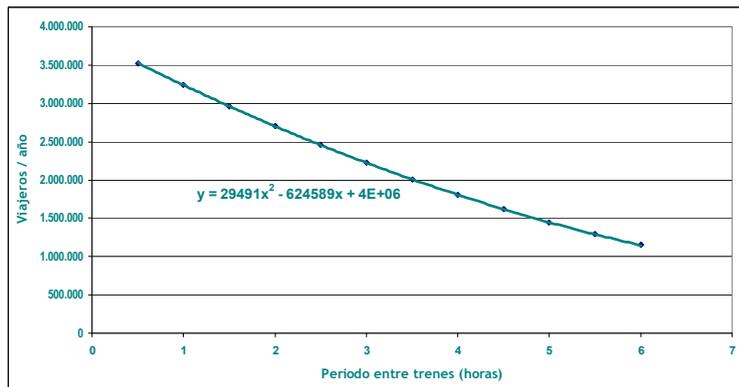
Puede observarse (comparando el caso 1 con el caso 2) cómo una reducción del tiempo de viaje del tren, manteniendo igual la oferta de todos los modos, supone una mayor cuota de mercado.

Fuente: Elaboración propia.

Como muestra de la sensibilidad al tiempo de viaje, precio y frecuencia, en las figuras siguientes se recoge la variación del número de viajeros al cambiar cada una de estas variables (pero sólo la variable en cuestión). En el caso de la variación del precio se ha estimado más ilustrativo figurar los ingresos resultantes en lugar del número de viajeros, lo que permite apreciar las zonas en las que elasticidad es mayor y menor que -1.

Figura 18. Ejemplo de variaciones de la demanda al cambiar el tiempo de viaje y la frecuencia, y variación de los ingresos al variar el precio





La curva superior (a) muestra el número anual de viajeros en el tren al cambiar el tiempo de viaje de éste entre 1 y 6,5 horas. La curva central (b) muestra la variación del número de viajeros anual del tren al cambiar la frecuencia expresada a través del periodo entre salidas medido en horas (valores de 1 a 6 horas). En la curva de abajo (c) aparece la variación de ingresos (sin IVA) al cambiar el precio entre 15 y 95 euros por viajero. Esta curva tiene un máximo en el precio de 50 euros. Por debajo de este precio, la elasticidad de la demanda al precio tiene valores (absolutos) mayores que -1, y por encima menores.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Parte del crecimiento explicado por cada factor

Cuando entra en servicio un tren de alta velocidad sustituyendo a uno convencional, desde luego se reduce el tiempo de viaje, pero normalmente a la vez aumenta el precio y se incrementa la frecuencia para poder atender el crecimiento de la demanda.

Cada una de estas variaciones tiene su aportación al crecimiento del número de viajeros y de los ingresos. En la tabla se figura, para el caso del ejemplo anterior, qué número de viajeros incrementales e ingresos se deben a la disminución del tiempo de viaje (a igualdad de precio y de frecuencia); de ellos, qué parte se reduce en número de viajeros y se aumenta en ingresos por el aumento del precio; y finalmente cuál es la variación debida al aumento de la frecuencia.

Esta separación es importante porque los incrementos del número de viajeros e ingresos derivados de la entrada en servicio de una nueva línea de alta velocidad no vienen sólo de la variación del tiempo y del precio, sino que el crecimiento en número de viajeros es tan importante que requiere la implantación de más frecuencias, lo que significa además un nuevo incremento del número de viajeros (al que habrá que sumar, además la demanda inducida) y de los ingresos.

Tabla 4. Desglose del incremento del número de viajeros e ingresos al implantar una nueva línea de alta velocidad

	Demanda		Ingresos	
	Viajeros/año	%	M€/año	%
Ganancia por tiempo (6,5 a 2,5 horas)	6.041.675	1142	192	1142
Reducción por subida de precio (35 a 70 €)	-5.122.988	-968	-117	-695
Ganancia combinada por precio y tiempo	918.687	174	75	447
Ganancia adicional por frecuencia (periodo pasa de 5 a 1h)	1.792.667	339	114	678
Ganancia total	2.711.353	513	189,37	1125

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Ejemplo de la evolución de la demanda en el tiempo a igualdad de oferta

Ya se ha señalado que el mercado global evoluciona con los indicadores socioeconómicos, mostrándose como más representativa en los servicios de larga distancia una relación con la evolución del PIB.

El crecimiento del PIB también supone un aumento del valor del tiempo y por ello una mejora de la cuota de los modos de transporte más rápidos (que generalmente son el tren de alta velocidad y el avión).

Como ejemplo para comprobar el efecto del aumento del valor del tiempo se ha realizado una proyección de la demanda del tren de alta velocidad del ejemplo anterior a 30 años, suponiendo una variación anual del PIB del 2% anual.

Como puede observarse, como consecuencia de la evolución del PIB, el mercado global crece cada año un 2,27%; mientras que el crecimiento del valor del tiempo provoca el aumento de la cuota de mercado del ferrocarril, que pasa del 36 al 41,2%.

Figura 19. Evolución de la demanda del ferrocarril en el tiempo al crecer el PIB sin cambios en la oferta

Año	Variación PIB (%)	Var demanda (JF) (%)	Demanda global <i>Mv</i>	Valor del tiempo <i>€/h</i>	Cuota tren <i>36,00</i>	Viajeros tren <i>Mv</i>	Tasa crecimiento <i>Año 0=100</i>
			9,00	15,0	36,0	3,24	100
1	2	2,28	9,20	15,3	36,4	3,35	103
2	2	2,28	9,41	15,6	36,7	3,46	107
3	2	2,28	9,63	15,9	37,0	3,57	110
4	2	2,28	9,85	16,2	37,4	3,68	114
5	2	2,28	10,07	16,6	37,7	3,80	117
6	2	2,28	10,30	16,9	38,0	3,91	121
7	2	2,28	10,54	17,2	38,3	4,04	125
8	2	2,28	10,78	17,6	38,6	4,16	128
9	2	2,28	11,02	17,9	38,9	4,28	132
10	2	2,28	11,27	18,3	39,1	4,41	136
11	2	2,28	11,53	18,7	39,4	4,54	140
12	2	2,28	11,79	19,0	39,6	4,67	144
13	2	2,28	12,06	19,4	39,9	4,81	148
14	2	2,28	12,34	19,8	40,1	4,94	153
15	2	2,28	12,62	20,2	40,3	5,08	157
16	2	2,28	12,90	20,6	40,4	5,22	161
17	2	2,28	13,20	21,0	40,6	5,36	165
18	2	2,28	13,50	21,4	40,8	5,50	170
19	2	2,28	13,81	21,9	40,9	5,65	174
20	2	2,28	14,12	22,3	41,0	5,79	179
21	2	2,28	14,44	22,7	41,1	5,94	183
22	2	2,28	14,77	23,2	41,2	6,08	188
23	2	2,28	15,11	23,7	41,2	6,23	192
24	2	2,28	15,45	24,1	41,3	6,38	197
25	2	2,28	15,80	24,6	41,3	6,53	202
26	2	2,28	16,16	25,1	41,3	6,68	206
27	2	2,28	16,53	25,6	41,3	6,83	211
28	2	2,28	16,91	26,1	41,3	6,98	215
29	2	2,28	17,29	26,6	41,2	7,13	220
30	2	2,28	17,69	27,2	41,2	7,28	225

Puede observarse cómo el mercado global crece al aumentar el PIB (se multiplica por 1,98 en 30 años si el PIB crece anualmente un 2%) y cómo el crecimiento del valor del tiempo hace pasar la cuota de mercado del tren desde 36 hasta el 41,2%. La combinación de ambos efectos hace aumentar el número de viajeros del ferrocarril de alta velocidad, que se multiplican por 2,25 en 30 años.

Fuente: Elaboración propia.

5. LA DEMANDA INDUCIDA

El modelo del coste generalizado, hasta donde se ha expuesto, sólo explica qué modo (u oferta) de transporte es (con una determinada probabilidad) el más atractivo para cada viajero (caracterizado por su *valor del tiempo*). Pero ello no permite juzgar si va a viajar o no; tan sólo permite predecir (con las limitaciones que acabamos de exponer) que si viaja empleará, probablemente, el modo cuya oferta le resulta más atractiva (si le es accesible). Así, por ejemplo, si para una persona el *valor del tiempo* es de 25 euros/hora y está considerando viajar de Madrid a Barcelona, para él la oferta más atractiva (según acabamos de ver en los ejemplos anteriores) es el tren; pero el viaje en tren le supone un coste total del orden de 100 euros y no viajará si para viajar no está dispuesto a sacrificar esa cantidad.

La experiencia muestra que la aparición de nuevas líneas de alta velocidad representa un cambio sustancial de la oferta de movilidad del corredor, y a consecuencia de ello aparece una *demanda inducida* por el servicio (viajes que no provienen de otros modos de transporte o de cambios en la distribución espacial de los viajes, que antes de la entrada en servicio del AVE no se producían).

El modelo, tal como se ha expuesto hasta aquí, sólo explica el reparto modal, pero no el tamaño del mercado ni la existencia de la demanda inducida, que es aquella demanda nueva que se produce por el aumento del atractivo de la oferta.

Como señala Mcrit (2012), la inducción de nuevos viajeros generada por un servicio AVE se produce por la reducción en el coste generalizado que experimenta el modo ferroviario. Esta reducción procede normalmente de la mejora en el tiempo de viaje, pero también puede proceder de una reducción de tarifas o de un aumento de frecuencias que suponga una reducción del tiempo de espera.

Begoña Guirao (2002), en su tesis doctoral (probablemente el trabajo sobre la demanda inducida más completo que se ha elaborado hasta la fecha), distingue hasta cuatro tipos de viajeros nuevos en una ruta ferroviaria como consecuencia de una mejora de la oferta (que ejemplificaremos al referirnos a la puesta en servicio de una nueva línea de alta velocidad):

- Tráfico reasignado, integrado por viajeros que antes viajaban en tren convencional y se pasan al nuevo tren de alta velocidad.
- Tráfico reasignado modalmente, que son los viajeros que antes utilizaban otro modo de transporte, por ejemplo el avión, y se pasan al nuevo tren de alta velocidad).
- Tráfico redistribuido, integrado por los viajeros que antes viajaban en otra ruta y cambian de ruta por el atractivo de la nueva oferta.
- Nuevos viajeros, que utilizan el servicio y que de otra forma no hubieran viajado.

Los dos últimos grupos son los que se corresponden con la llamada “demanda inducida”.

Dentro de los *nuevos viajeros*, se distingue en ocasiones entre viajeros *de primera generación*, que pasan a utilizar el nuevo servicio inmediatamente después de su puesta en funcionamiento; y *viajeros de segunda generación*, que pasan a utilizar el servicio más adelante, tras cambiar sus hábitos de movilidad, e incluso a veces de residencia.

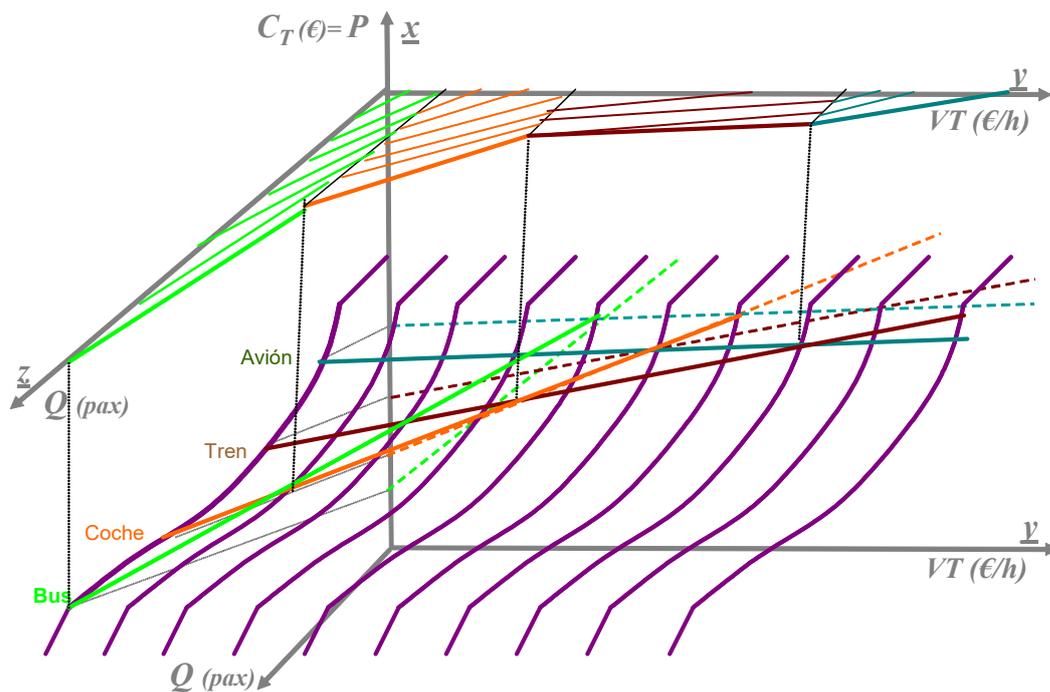
5.1. Marco teórico

Para conocer el tamaño del mercado (y explicar la *demanda inducida*) es preciso conocer las *curvas de demanda*, que relacionan la cantidad que los consumidores están dispuestos a comprar de un bien o servicio con el precio que deben sacrificar.

Estas curvas pueden representarse gráficamente utilizando una tercera dimensión (cantidad comprada) en los gráficos expuestos anteriormente y que relacionaban el coste generalizado con la demanda.

Si suponemos inicialmente que la *curva de demanda* es la misma para todas las personas sea cual fuere su *valor del tiempo*, el conjunto de curvas para todas las personas compone una superficie generada por la curva cóncava que es, además, su proyección sobre un eje transversal. Dibujando sobre esta superficie las líneas de coste de todos los modos, se obtiene para cada *valor del tiempo* la cantidad que es demandada (cantidad proporcional a la distancia del eje a la proyección el plano Q , VT). La cantidad total demandada será la suma de las cantidades demandadas por todas las personas que tienen el *valor del tiempo* de que se trate; es decir, la superficie del área en dicho plano comprendida entre la proyección citada y las líneas que delimitan la indiferencia entre las ofertas de transporte.

Figura 20. Curvas de demanda precio para los diversos modos de transporte y personas con diferente valor del tiempo (sin considerar el número de personas en cada grupo)



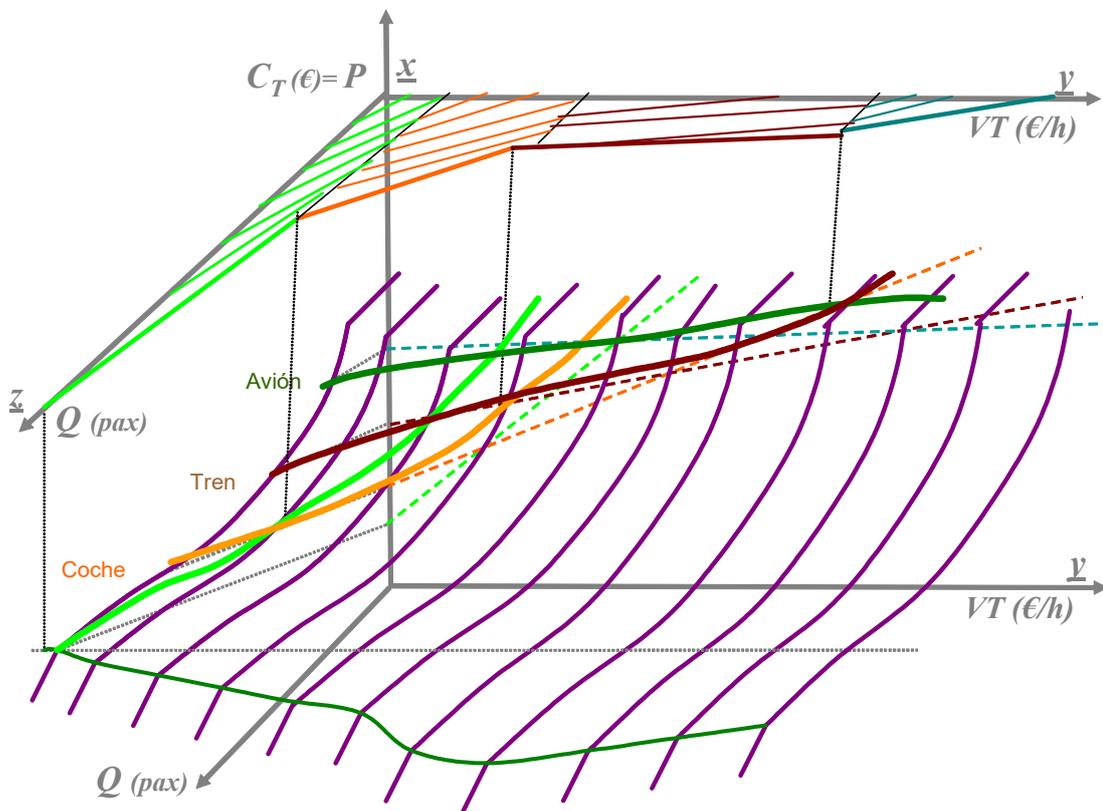
Para un grupo de personas (caracterizado por determinado *valor del tiempo*) existe una *curva demanda precio* que constituye su límite de compra. La intersección de la superficie que forman estas curvas con las líneas de coste total para los viajeros (que es el precio que han de sacrificar) ofrece información sobre la cantidad demandada.

Fuente: Elaboración propia.

Ciertamente una ampliación lógica del modelo debe tener en cuenta que la *curva de demanda* no es la misma para todos los grupos de personas con el mismo valor del tiempo. Y ello, por dos hechos fundamentales:

- Por una parte, el número de personas incluido en cada segmento de *valor del tiempo* es diferente, según ya expusimos. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de personas incluido en uno de estos segmentos, mayor será la cantidad demandada para el mismo nivel de precio (la *curva de demanda* está más desplazada hacia la izquierda cuanto mayor sea el número de personas con ese *valor del tiempo*).
- Por otra parte, la sensibilidad de las personas al precio es diferente. Puede suponerse (aunque es preciso encuestarlo en cada caso) que, a mayor *valor del tiempo*, menos sensibilidad al precio; por lo que, para mayores *valores del tiempo*, cabe esperar curvas de demanda más horizontales, reflejando la menor sensibilidad al precio.

Figura 21. Curvas de demanda precio para los diversos modos de transporte y personas con diferente valor del tiempo (considerando el número de personas en cada grupo)



En realidad, la curva que representa la función de densidad de las personas con cada *valor del tiempo* no es uniforme, por lo que hay *valores del tiempo* en los que la población es mayor (ello hace desplazarse las curvas en sentido positivo del eje Q). Además, normalmente las personas con mayor valor del tiempo tienen menos sensibilidad al precio (las curvas de *demanda precio* se hacen más verticales al desplazarse en el sentido positivo del eje VT).

Fuente: Elaboración propia.

Se pretende representar gráficamente estos dos efectos en la figura anterior, en la que se comprueba que, respecto a la situación teórica anterior, se ven beneficiadas las ofertas de transporte en cuyos ámbitos tienen ventajas competitivas.

5.2. Aplicación práctica

No hay ningún método que se aplique de forma generalizada para cuantificar la demanda inducida por un cambio importante de la oferta. Para dar una idea del orden de magnitud se presentan dos enfoques cuantitativos: uno basado en la elasticidad de la demanda al coste generalizado y otro de carácter empírico.

5.2.1. Enfoque del menor coste generalizado

Una posible aplicación práctica del modelo teórico presentado consiste en relacionar el menor coste generalizado con la demanda total. Debe advertirse que este modelo no está contrastado ni calibrado, y sólo pretende reflejar numéricamente una idea que resulta poco intuitiva. Debe señalarse además que este modelo no recoge el carácter probabilístico (aleatorio) de la elección modal, aunque pensamos que supone una simplificación útil a efectos didácticos.

Llamaremos “menor coste generalizado” al correspondiente al modo de transporte que presenta una oferta con menor coste en la ruta, es decir, la oferta más atractiva para el cliente. Puede suponerse que demanda global se relaciona con el menor coste generalizado con la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta D_{ij}}{D_{ij}} = \varepsilon \times \frac{\Delta \min[Cgm_{ij}]}{\min[Cgm_{ij}]}$$

Donde

- D_{ij} es la demanda entre los puntos ij ,
- ε es la elasticidad de la demanda al menor coste generalizado. Necesariamente $\varepsilon \leq 0$,
- Cgm_{ij} es el coste generalizado del modo m entre los puntos i y j .

El enfoque para cuantificar la demanda inducida es construir la curva del menor coste generalizado (es decir, el coste generalizado del modo que tenga menor coste en la nueva situación) y estimar una elasticidad determinada (por ejemplo, -0,8) para la demanda en función del menor coste generalizado.

Entonces, al “mejorar” una variable de la oferta de un modo (por ejemplo ese modo baja el precio, o el tiempo de viaje, o aumenta la frecuencia), se reduce su coste generalizado, aunque el coste generalizado de los demás modos permanece invariable. Si el modo que ha mejorado su oferta sigue sin ser el modo con menor coste generalizado, no hay ningún viajero potencial que “vea” una oferta con menor coste que antes, y por ello no aumenta la demanda.

Por el contrario, si al reducir en un modo de transporte el coste generalizado, el nuevo coste resulta ser más bajo que el de los otros modos, el sistema global de transporte habrá “mejorado” su oferta anterior y por ello se atrae nuevos clientes, y lo hace en función de la elasticidad al menor coste generalizado.

Como ejemplo analizaremos un caso en el que se implanta un tren de alta velocidad en sustitución del tren convencional y a la vez el avión reduce su frecuencia.

En la situación inicial el menor coste generalizado corresponde al coche con 126,5 euros. Al ir bajando el tiempo de viaje del tren desde las 6 horas

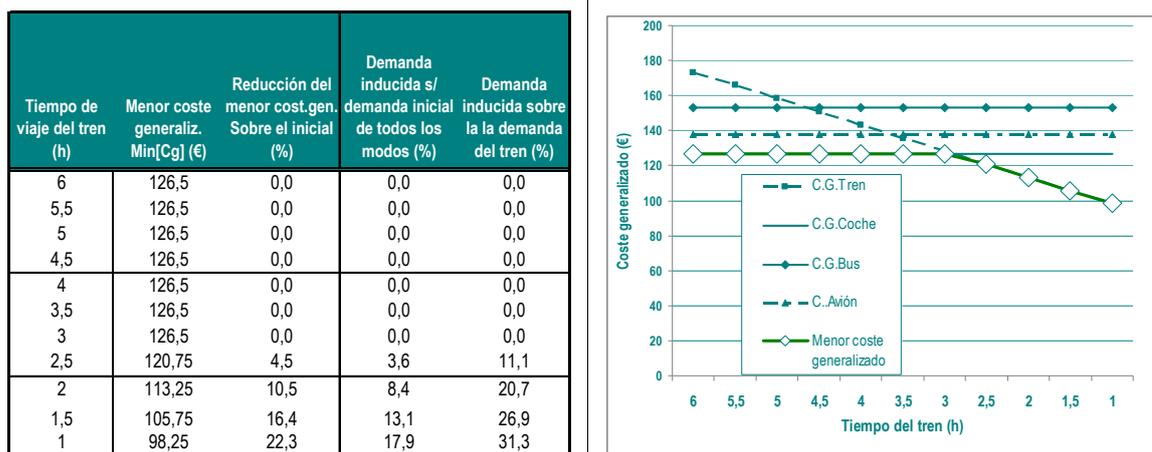
iniciales, el coste generalizado del tren va bajando desde los 156,3 euros iniciales, y cuando el tiempo de viaje es inferior a las 2,5 horas el coste generalizado del tren ya es inferior al del coche; a partir de entonces se produciría la demanda inducida.

Tabla 5. Ejemplo de determinación de la demanda inducida al implantarse un tren de alta velocidad

	Tiempo viaje (h)	Precio (€)	Periodo medio (1/F) (h)	Tiempo espera (C=0,4) (h)	Tiempo acceso disp y terminal (h)	Tiempo total (h)	Coste en tiempo (€)	Coste generalizado (€)	Cuota modo (%)	Viajeros/año en el modo	Ingresos (sin IVA) (M€)	
												A
CASO 1 (Tren convencional)												
Tren	6	25	5	2	0,75	8,75	131,25	156,3	12,14	1.092.712	24,83	
Coche (1,8 pax)	6	35	0	0	0,1	6,10	91,50	126,5	40,70	3.662.784	116,54	
Autobus	7,25	20	2	0,8	0,8	8,85	132,75	152,8	16,56	1.490.180	27,09	
Avión	1	90	1,75	0,7	1,5	3,20	48,00	138,0	18,03	1.622.465	132,75	
CASO 2 (Tren de alta velocidad)												
Tren	2,33	60	2	0,8	0,75	3,88	58,20	118,2	43,24	3.891.530	212,27	
Coche (1,8 pax)	6	35	0	0	0,1	6,10	91,50	126,5	29,80	2.681.677	85,33	
Autobus	7,25	20	2	0,8	0,8	8,85	132,75	152,8	9,18	825.965	15,02	
Avión	1	90	1,75	0,7	1,5	3,20	48,00	138,0	17,79	1.600.828	130,98	
Mercado total:	7.000.000 viajeros/año					Landa	0,045	Valor del tiempo	15	euros/hora		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Ejemplo de determinación de la demanda inducida al implantarse un tren de alta velocidad



Al reducirse el tiempo de viaje del tren, se reduce su coste generalizado; y sólo con menos de 2,5 horas pasa a ser el menor coste generalizado. Sólo entonces la reducción del coste del tren induciría nueva demanda.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Enfoque de la curva empírica

Como se ha expuesto, el caso en el ámbito del ferrocarril en que resulta más útil conocer la demanda inducida corresponde a aquel en el que se construye una línea de alta velocidad que sustituye al ferrocarril convencional y que genera, además de una redistribución modal, una nueva demanda inducida.

Mcrit (2016) ha presentado un método de carácter práctico basado en los escasos datos disponibles, que se expone a continuación.

Hay que partir de la idea de que el modelo del coste generalizado con la calibración empírica que suele utilizarse reproduce cuotas ferroviarias reales, que siempre llevan incorporada una cierta demanda inducida con respecto a un determinado escenario “sin proyecto”.

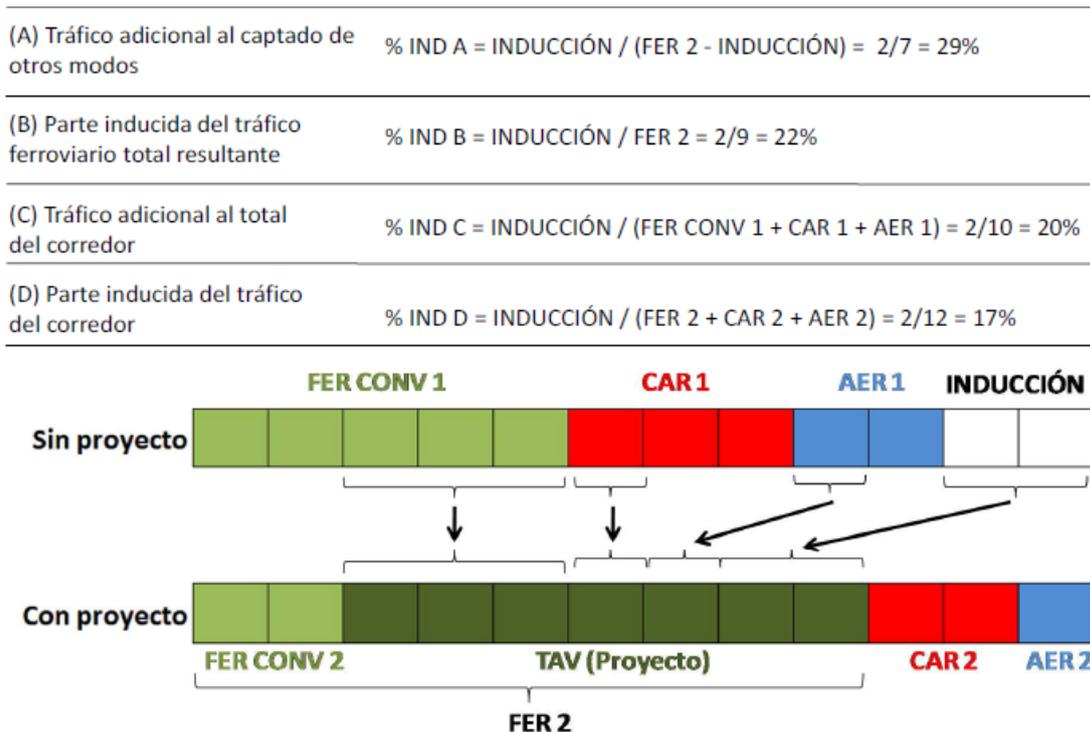
Si se define un escenario de referencia para cada ruta correspondiente a la oferta ferroviaria previa a la entrada en servicio de la alta velocidad, la inducción calculada corresponderá exclusivamente a la alta velocidad (se desprecia el efecto de cambios en la oferta de los demás modos de transporte).

El modelo se calibra para la situación inicial, donde un gran número de rutas ya disponen de alta velocidad y, por lo tanto, las cuotas modales que debe reproducir el modelo llevan implícita la demanda inducida atribuible a la alta velocidad.

Posibles formas de expresar la inducción

No hay una manera única de expresar la inducción, y debe acordarse una entre las cuatro posibilidades que se presentan a continuación en la figura:

Figura 23. Formas de expresar la demanda inducida



Fuente: Mcrit (2016).

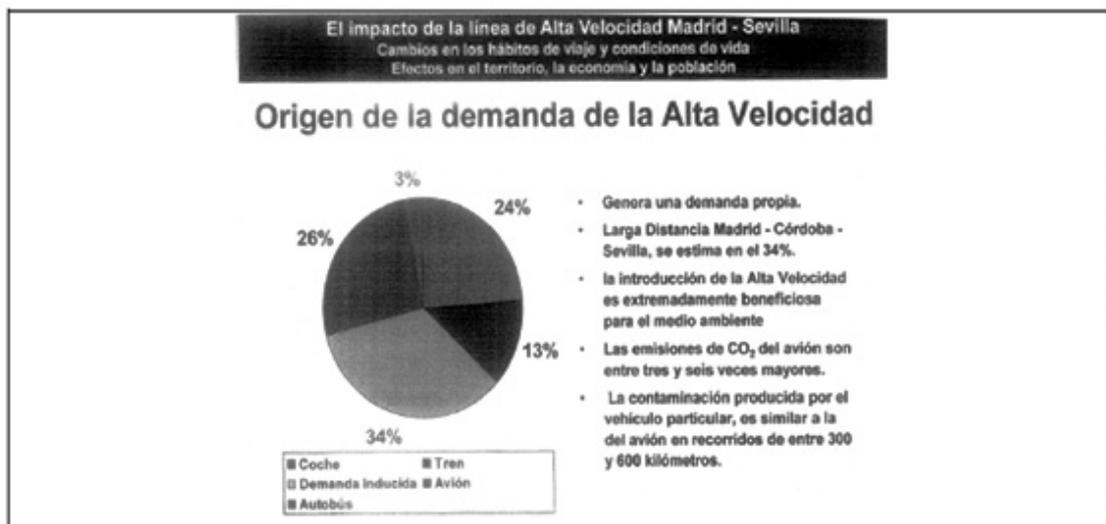
Se opta por la posibilidad B, es decir, expresar la inducción como el porcentaje que supone la demanda inducida sobre la nueva demanda de ferrocarril.

El modelo proporciona directamente la demanda ferroviaria con la inducción incluida, y se calcula a posteriori qué parte de esta demanda es inducida. Es la manera más intuitiva de expresarla, puesto que los pocos datos de inducción de los que se dispone se han obtenido con encuestas en los trenes (Madrid-Sevilla o París-Lyon) y los resultados publicados de estas encuestas hacen referencia a qué parte de la demanda que viaja en alta velocidad no viajaba anteriormente.

Estudios disponibles de cuantificación de la demanda inducida

Un estudio realizado en 1993 en la línea Madrid-Sevilla muestra cómo poco más de un año después de la entrada en servicio de la línea, el porcentaje de la demanda inducida del AVE, medida en los términos descritos anteriormente, era de 34%, porcentaje que se alcanzó con una reducción del 43% del coste generalizado del ferrocarril.

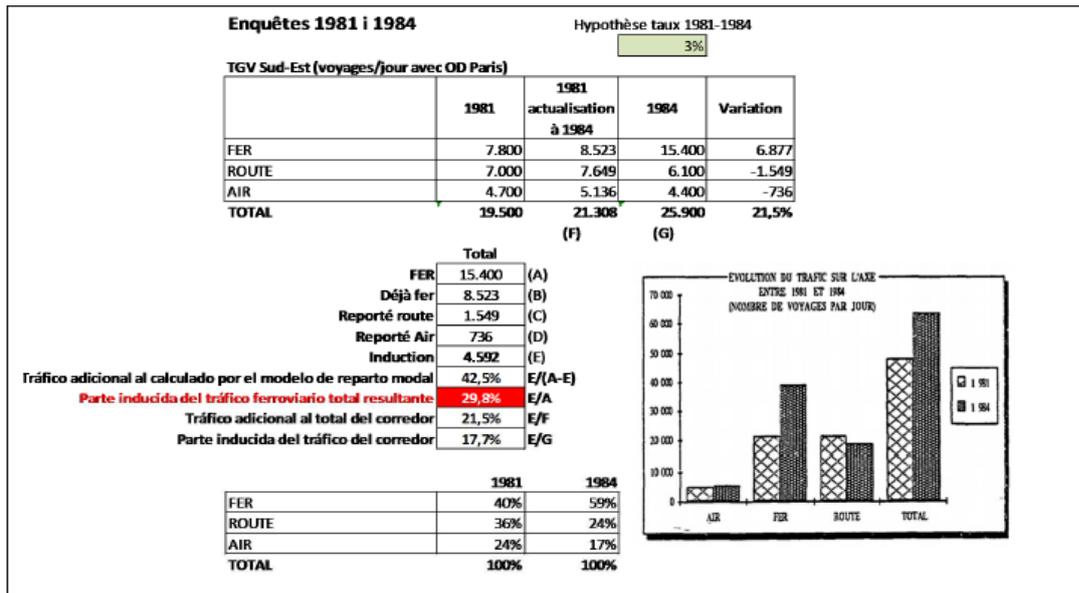
Figura 24. Origen de la demanda de la demanda del AVE Madrid Sevilla (1993)



Fuente: Mcrit (2016).

Estudios realizados en 1984 para la línea París-Lyon por el *Observatoire Economique et Statistique des Transports* concluyen que este mismo porcentaje fue de un 29,8%, muy próximo al 34% del Madrid-Sevilla.

Figura 25. Origen de la demanda de la línea de París a Lyon (1984)

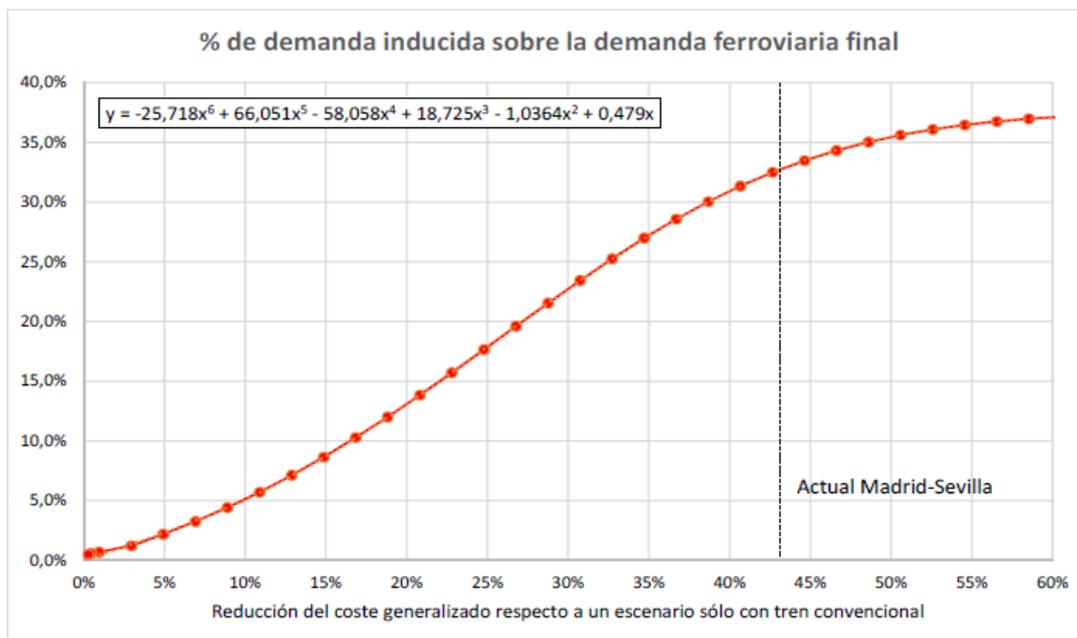


Fuente: Mcrit (2016).

Curva de inducción y aplicación a las rutas de Madrid a Sevilla y de Madrid a Barcelona

Con estas referencias, se construye la curva de inducción representada en la figura, calibrada con las observaciones disponibles, principalmente Madrid-Sevilla.

Figura 26. Curva de inducción sobre la demanda ferroviaria final en función de la reducción del coste generalizado del tren

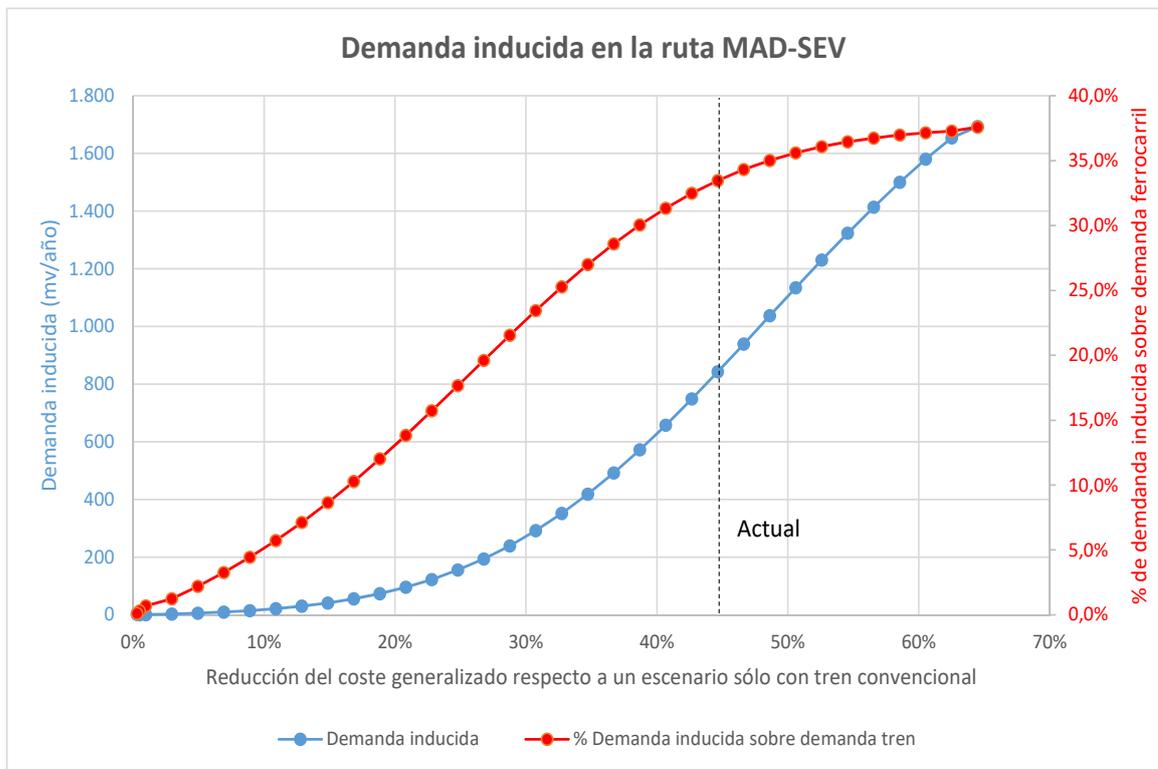


Fuente: Mcrit (2016).

La curva relaciona el porcentaje de demanda inducida respecto a la reducción del coste generalizado del viaje en ferrocarril con el coste que tendría en un escenario de tren convencional de bajas prestaciones. La reducción del coste generalizado ferroviario puede producirse por una disminución de cualquiera de sus componentes: tarifa, tiempo de viaje o tiempo de espera (frecuencia). Un porcentaje de reducción de cada uno de estos componentes tendrá, pues, un efecto de inducción diferente para cada ruta, en función del peso de cada componente en el coste generalizado de la ruta.

El gráfico presenta la aplicación de la curva de inducción a la ruta Madrid-Sevilla y la obtención del valor absoluto de demanda inducida.

Figura 27. Aplicación de la curva de inducción sobre la demanda ferroviaria en la línea de alta velocidad de Madrid a Sevilla

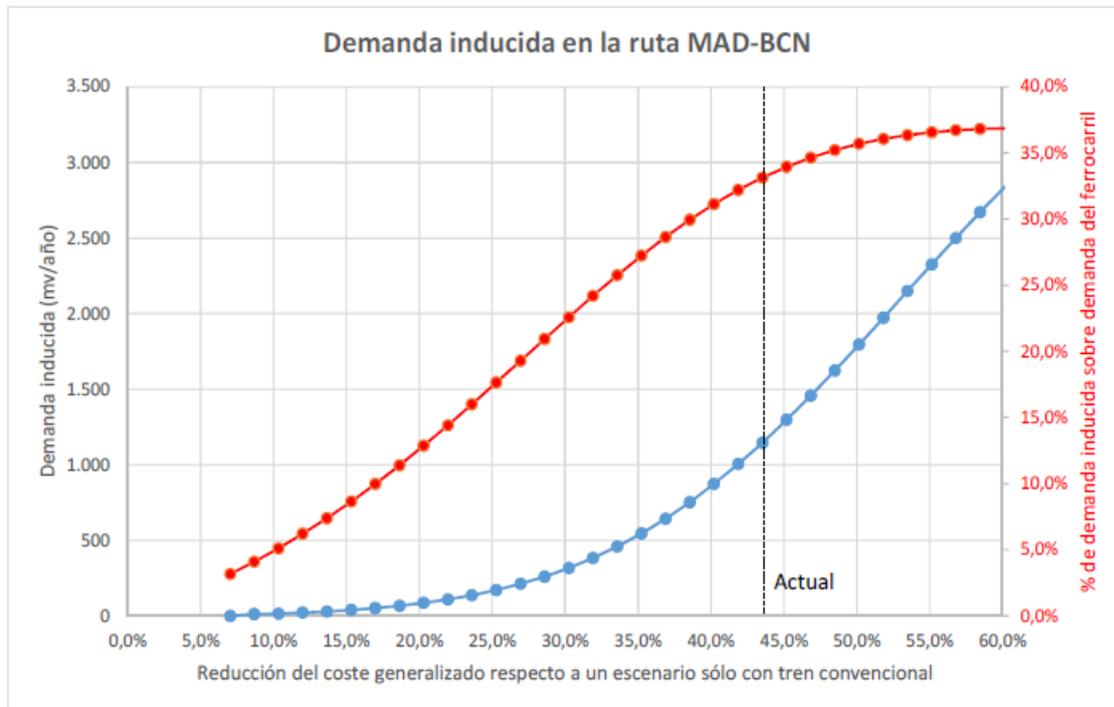


Fuente: Mcrit (2016).

Algo más de 800.000 viajeros actuales del AVE en la ruta Madrid-Sevilla serían inducidos por la Alta Velocidad. Con valores muy bajos de tarifa llegaría a duplicarse la demanda inducida en términos absolutos, mientras que el porcentaje respecto a la demanda ferroviaria total subiría hasta 38%. Por otro lado, valores altos de tarifa reducirían progresivamente la demanda inducida hasta llegar a cero en un escenario sin AVE.

El resultado para la ruta Madrid-Barcelona se presenta en el gráfico siguiente: 1,1 millones de viajeros actuales del AVE Madrid-Barcelona serían inducidos.

Figura 28. Aplicación de la curva de inducción sobre la demanda ferroviaria en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona



Fuente: Mcrit (2016).

BIBLIOGRAFÍA

- Adif (2011). *Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril*.
- Bel, G. (1994). *La demanda de transporte en España. Competencia intermodal sobre el ferrocarril interurbano*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Dodgson, J. y González Savignat, M. (1995). Un marco de análisis coste-beneficio para el transporte ferroviario. En Herce, J. A. y Ginés de Rus (Coord.), *La regulación de los Transportes en España*. Madrid: Civitas. Fedea. 389-426.
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid e Instituto Universitario de la Investigación del Automóvil (2000). Estudio del Sector de Transporte en España: Visión de la movilidad. Madrid.
- Fernández Jáñez, J. (2012). Análisis de la cuota captable por el tren de alta velocidad al avión en España. Informe Optired.
- Fernández Jáñez, J. (2015). Una visión actualizada de la competencia entre el tren de alta velocidad y el avión. *360. Revista de Alta Velocidad*, 3, 19-32.
- Fundación de los Ferrocarriles Españoles y Fundación Fedea (2001). *Balance global de la actividad ferroviaria en España*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A., Cillero, A. y Rodríguez Jericó, P. (1998). *Operación de trenes de viajeros*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A. y Rubio García, A. (2016). La optimización de las tarifas de alta velocidad. *360. Revista de alta velocidad*, 4, 3-19.
- González Franco, I. (2015). *Metodología para la estimación de la combinación de velocidades máximas que permiten alcanzar el tiempo de viaje comercialmente requerido en una infraestructura ferroviaria*. Tesis doctoral inédita. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gwilliam, K.M. (1997). The Value of Time in Economic Evaluation of Transport Projects. *Transport NO. OT-5*, Worldbank, 12 pág. (<http://www.worldbank.org/transport/publicat/td-ot5.htm>).
- HEATCO D5 (2006): Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Proyecto realizado por IER (Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy), Stuttgart, financiado por la Comisión Europea.
- Huete, L.M. (1997). Factores que determinan la calidad del servicio que prestan las empresas. En Huete, L.M. y Ribera, J., *Empresas de servicios: Un mundo de posibilidades*. Barcelona: Biblioteca IESE de Gestión de Empresas.
- Leboeuf, M. (2014). *High Speed Rail*. Paris: Le Cherche Midi.
- Martín Cañizares, M. P. (2011). Determinación de la velocidad óptima de los trenes de muy alta velocidad para minimizar las emisiones de dióxido de carbono en un corredor. *360. Revista de Alta Velocidad*, 1, 51-59.

-
- Matas, A. (2002). *El transporte urbano: análisis de la eficiencia y factores condicionantes de la demanda*. Tesis doctoral. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
 - Mcrit (2012). Aproximación a la cuantificación del volumen de mercado de transporte en las rutas nacionales de media y larga distancia y estimación de la posible participación del ferrocarril en función del tiempo de viaje, la frecuencia y el precio. Informe para el proyecto Optired.
 - Mcrit (2016). Elementos para la determinación de la demanda y optimización de la oferta en servicios ferroviarios de alta velocidad (versión 4). Estudio realizado para la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
 - Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *American Economic Review*, 62, 4, 591-604.
 - Muruzábal, J.J. (2016). Modelos de demanda de viajeros en proyectos de inversión. *Infraestructuras de transporte. Aplicación al caso de los ferrocarriles*. Apuntes del curso online de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
 - Vega Galán, J., Mesa Santos, L. y Palacio Vijande, I. (2015). Ubicación de la población en el territorio de España y su relación con la densidad topología de la red de alta velocidad. 360. *Revista de alta velocidad*, 3, 55-71.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un Modelo General de Movilidad	8
Figura 2. Relación observada en España entre la demanda de viajes de larga distancia y PIB (2003-2012)	10
Figura 3. Evolución del mercado en función de la variación del PIB	12
Figura 4. Evolución de la demanda en el tiempo: <i>ramp up</i> y correlación con el PIB .	13
Figura 5. Tiempo generalizado en la ruta Madrid Barcelona en diversos modos de transporte	19
Figura 6. Tiempo generalizado en la ruta Madrid Sevilla en diversos modos de transporte	20
Figura 7. Variación de la cuota de mercado del ferrocarril del ferrocarril por tipo de tráfico para diferentes valores del tiempo (en rutas con y sin avión).....	26
Figura 8. Coste generalizado en la ruta de Madrid a Barcelona en 2013 en diversos modos de transporte	29
Figura 9. Coste total del viaje Madrid-Barcelona por modos de transporte en función del <i>Valor del tiempo</i>	30
Figura 10. Segmentación de los viajeros potenciales a los que le resulta más atractivo cada uno de los modos de transporte en la ruta Madrid-Barcelona.....	31
Figura 11. Incidencia de un cambio de la oferta en la segmentación de los viajeros potenciales a los que les resulta más atractivo cada uno de los modos de transporte en la ruta Madrid-Barcelona.....	32
Figura 12. Variación del número de viajeros y de los ingresos al cambiar la tarifa ...	34
Figura 13. Variación de los ingresos al cambiar la tarifa en el caso tipo	35
Figura 14. Variación del número de viajeros al cambiar la frecuencia.....	36
Figura 15. Variación del número de viajeros al cambiar el tiempo de viaje	37
Figura 16. Sensibilidad de la demanda del tren a la velocidad en función de la longitud de la ruta	38
Figura 17. Curva de las tres horas: Relación entre la cuota del tren en el mercado Tren+Avión y tiempo de viaje en las principales rutas mundiales y españolas entre 400 y 600 kilómetros	40
Figura 18. Ejemplo de variaciones de la demanda al cambiar el tiempo de viaje y la frecuencia, y variación de los ingresos al variar el precio	43
Figura 19. Evolución de la demanda del ferrocarril en el tiempo al crecer el PIB sin cambios en la oferta.....	46
Figura 20. Curvas de demanda precio para los diversos modos de transporte y personas con diferente valor del tiempo (sin considerar el número de personas en cada grupo)	48
Figura 21. Curvas de demanda precio para los diversos modos de transporte y personas con diferente valor del tiempo (considerando el número de personas en cada grupo)	49

Figura 22. Ejemplo de determinación de la demanda inducida al implantarse un tren de alta velocidad.....	51
Figura 23. Formas de expresar la demanda inducida	52
Figura 24. Origen de la demanda de la demanda del AVE Madrid Sevilla (1993)	53
Figura 25. Origen de la demanda de la línea de París a Lyon (1984)	54
Figura 26. Curva de inducción sobre la demanda ferroviaria final en función de la reducción del coste generalizado del tren.....	54
Figura 27. Aplicación de la curva de inducción sobre la demanda ferroviaria en la línea de alta velocidad de Madrid a Sevilla	55
Figura 28. Aplicación de la curva de inducción sobre la demanda ferroviaria en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del tiempo en diversos estudios en España	22
Tabla 2. Ejemplo de valores unitarios de costes aplicados en un modelo de coste generalizado	42
Tabla 3. Ejemplo de aplicación del coste generalizado para predecir el reparto modal en una ruta: implantación del tren de alta velocidad	43
Tabla 4. Desglose del incremento del número de viajeros e ingresos al implantar una nueva línea de alta velocidad.....	45
Tabla 5. Ejemplo de determinación de la demanda inducida al implantarse un tren de alta velocidad.....	51



Este libro es una de las siete partes de *Explotación comercial y operación de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril*. En esta edición (la número 8) adopta una nueva denominación actualizada y adecuada a los nuevos contenidos. Aborda una cuestión de la máxima importancia, tanto para las decisiones relativas a la inversión en infraestructuras como para el diseño y planificación de la oferta de servicios de transporte, y se centra en el modelo del coste generalizado en su formulación *logit*, que permite diseñar la oferta y conocer los efectos en la demanda y en los ingresos de las variaciones en la oferta.

Alberto García Álvarez es doctor en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte y doctor en Ciencias Económicas y Empresariales. Profesor de diversos másteres sobre Alta Velocidad y Explotación Ferroviaria, es autor de más de una docena de publicaciones sobre temas ferroviarios y del transporte. Trabaja de 1981 en el mundo del ferrocarril, habiendo desempeñado puestos de responsabilidad en Renfe, GIF y la Fundación los Ferrocarriles Españoles.

El origen de este libro está en otro, *Operación de trenes de viajeros. Claves para la gestión avanzada del ferrocarril*, que el autor publicó junto con Alberto Cillero y Pilar Jericó en marzo de 1998, y que fue editado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en el marco de las actividades que se desarrollaron para celebrar el 150 aniversario del ferrocarril en España. Los nuevos conocimientos y el rápido desarrollo de los servicios de viajeros en España, al igual que de las nuevas políticas comerciales y de oferta de Renfe, aconsejaban la redacción de una nueva publicación, que recogiera las nuevas experiencias y últimos datos disponibles.