

Investigación FFE
Memoria de artículos, publicaciones y
conferencias 2009-2010

Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte

© De esta 2ª edición, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2011

ISBN:978-84-89649-67-5

Depósito legal: M-50668-2010

La Fundación de los Ferrocarriles Españoles

La Fundación de los Ferrocarriles Españoles a través de su dirección de Investigación, Formación y Colaboración Científica tiene como misión la realización de actividades orientadas a potenciar el desarrollo del ferrocarril, proporcionando las herramientas necesarias para la formación, la promoción de la imagen positiva del ferrocarril, el estudio y la investigación, al servicio de los intereses conjuntos del sector ferroviario, tanto en el ámbito nacional como en el internacional y, especialmente, en los países del entorno Iberoamericano, coordinación y promoción sectorial; actividades de formación y comunicación; actividades de cooperación con Iberoamérica y publicaciones.

En este sentido desarrolla diversas líneas de investigación que realizan los grupos de estudios e investigación que se han formado:

1. Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
2. Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
3. Grupo de estudios e investigación de geografía y tráfico ferroviarios
4. Grupo de estudios e investigación de sociología del transporte

Entre los proyectos, finalizados y/o en curso, en los últimos años por estos grupos cabe destacar: EnerTrans, ElecRail, Reactiva, Observatorio del Ferrocarril Español, Securemetro, "Hope in Stations", Viadintel, Aeroave, Balasto artificial, etc.

Se presenta en este volumen los estudios, ponencias y conferencias que en el ámbito de investigación se han realizado a lo largo de los años 2009 y 2010.

Estos estudios se han realizado en el marco de la actividad de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, entidad constituida en 1985 por Renfe –actualmente

desdoblada en Renfe Operadora y el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y FEVE. Desde 2002 es una Fundación del sector público estatal (artículo 44 de la Ley 50/2002, de 26 de diciembre, de Fundaciones).

La FFE tiene como misión la promoción del conocimiento y la utilización del ferrocarril mediante el desarrollo de actividades de: investigación y formación, de servicios tecnológicos, recuperación y uso alternativo del patrimonio ferroviario, culturales, publicaciones periódicas y libros especializados.

También gestiona la Biblioteca, el Archivo Histórico Ferroviario y el Centro de

Documentación Ferroviaria, así como los Museos del Ferrocarril de Madrid Delicias y de Catalunya (en Vilanova i la Geltrú, Barcelona).

En la actualidad componen el Patronato de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles: Renfe Operadora; Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE), Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC), Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana (FGV), Eusko Tren; Metro de Madrid S.A., Ferrocarril Metropolità de Barcelona S.A., Asociación de Empresas Constructoras de Ámbito Nacional (SEOPAN), Serveis Ferroviaris de Mallorca (SFM), Euskal Trenbide Sarea, Ferrocarriles de la Junta de Andalucía (FJA); Asociación Ferroviaria de Certificación, CETREN e INECO.

ÍNDICE

PARTE I. ARTÍCULOS DEL GRUPO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIÓN DE ECONOMÍA Y EXPLOTACIÓN DEL FERROCARRIL Curso 2009-2010..... 7

Herramienta para el dimensionamiento de la red para el tráfico de mercancías 9

M^a Pilar Martín Cañizares, Vicente Rallo Guinot, Ismael Borregón de la Fuente, Lorenzo Jaro Arias, Cristina Barbero Ruiz

Relación entre el precio básico medio del billete de tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero 27

Alberto García Álvarez, Beatriz Luceño Ramos

Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros 45

Alberto García Álvarez, Luis Arranz Peña

Desarrollo de un modelo de regulación optimizado para la apertura del mercados de servicios interurbanos de transporte de viajeros por ferrocarril en España..... 61

Alberto Cillero Hernández, Alberto García Álvarez, Rodolfo Ramos Melero

Principales aspectos a considerar para el desarrollo del marco regulador para la apertura a la competencia del transporte interurbano de viajeros por ferrocarril en España..... 71

Rodolfo Ramos Melero, Alberto García Álvarez, Alberto Cillero Hernández

Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos..... 83

M^a Pilar Martín Cañizares, Alberto García Álvarez

Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de la ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias 101

Alberto García Álvarez, Alberto Barreiro Martínez

La línea de alta velocidad a Asturias resolverá los problemas de los trenes de mercancías 119

Alberto García Álvarez, Vicente Rallo Guinot

Barreras a la entrada en el ferrocarril español 129

Rodolfo Ramos Melero

PARTE II. ARTÍCULOS DEL GRUPO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIÓN DE ENERGÍA Y EMISIONES EN EL TRANSPORTE Curso 2009-2010..... 151

Energía y trazado ferroviario 153

Alberto García Álvarez

Influencia de la arquitectura y el tamaño de los trenes en sus costes operativos y su consumo de energía..... 167

Alberto García Álvarez, Ignacio González Franco, M^a Pilar Martín Cañizares

Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y en el confort de los viajeros..... 181

Ignacio González Franco, Alberto García Álvarez

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad..... 195

Ignacio González Franco, Alberto García Álvarez

Análisis comparativo del consumo de energía y emisiones de trenes eléctricos, diesel y duales..... 209

M^a Pilar Martín Cañizares, Ignacio González Franco

Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones del transporte 221

Alberto García Álvarez

PARTE III. MEMORIA DE PUBLICACIONES, CONGRESOS CONFERENCIAS, Y ACTIVIDADES DE DOCENCIA Curso 2009-2010..... 235

Reseña de publicaciones: libros, capítulo de libros y papers en revistas de impacto 2009 - 2010 237

Conferencias pronunciadas en el curso académico 2009 - 2010..... 239

Ponencias presentadas en congresos 2009 - 2010 241

Clases impartidas en centros de enseñanza reglada en el curso académico 2009 - 2010..... 243

**PARTE I.
ARTÍCULOS DEL GRUPO DE
ESTUDIOS E
INVESTIGACIÓN DE
ECONOMÍA Y EXPLOTACIÓN
DEL FERROCARRIL**

Curso 2009-2010

Herramienta para el dimensionamiento de la red para el tráfico de mercancías

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Vicente Rallo Guinot

Colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ismael Borregón de la Fuente

Jefe de Planificación y Estudios, ADIF

Lorenzo Jaro Arias

Director de Coordinación de programas de inversión y Cuenta Estado, ADIF

Cristina Barbero Ruiz

Técnico de Planificación y explotación ferroviaria, ADIF

El presente documento es una aplicación de la ponencia “Análisis del consumo de energía de los trenes de mercancías” que fue presentada en Vilanova i la Geltrú, el 15 de junio de 2010. Esta ampliación desarrolla un caso-ejemplo de agrupación de cargas y estudia también la sensibilidad a diversos parámetros de la infraestructura y el tren. Se basa en la herramienta desarrollada por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles y Adif para la conversión de volúmenes de demanda de mercancías en unidades de oferta, ofreciendo otros resultados adicionales como los consumos de energía y los costes de explotación asociados.

Herramienta para el dimensionamiento de la red para el tráfico de mercancías

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Vicente Rallo Guinot

Colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ismael Borregón de la Fuente

Jefe de Planificación y Estudios, Adif, España

Lorenzo Jaro Arias

Director de Coordinación de programas de inversión y Cuenta Estado, Adif

Cristina Barbero Ruiz

Técnico de Planificación y explotación ferroviaria, Adif

RESUMEN

En esta ponencia se presenta la herramienta desarrollada por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles y Adif para la conversión de volúmenes de demanda de mercancías en unidades de oferta, ofreciendo otros resultados adicionales como los consumos de energía y los costes de explotación asociados. Se muestra un caso-ejemplo realizado con la herramienta, en el que para una carga anual de diferentes productos, se calcula el número de vagones y trenes necesarios y se estudia también la sensibilidad a diversos parámetros de la infraestructura (longitud admisible de los trenes, carga por eje,...) y de la tracción del tren.

1. HERRAMIENTA PlanCargoRail

Para la planificación de la red ferroviaria, sus equipamientos y capacidades resulta necesario conocer cualitativa y cuantitativamente el tráfico que va a soportar. En el caso particular del transporte de mercancías, es preciso conocer las cantidades de productos a transportar y sus orígenes-destinos, datos que pueden ser determinados mediante análisis de mercado con técnicas convencionales. Se presenta la dificultad de que lo relevante para la producción, los costes y el dimensionamiento de la red no son los volúmenes y naturaleza de las mercancías, sino el número y tipo de los vagones y trenes en que se agrupan las mercancías y sus características. El fin de la herramienta desarrollada es convertir el volumen de la demanda de mercancías en unidades de oferta (vagones, trenes cargados y trenes vacíos) adecuadas para atenderla.

A partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), la herramienta PlanCargoRail permite obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes. Adicionalmente, se puede obtener el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

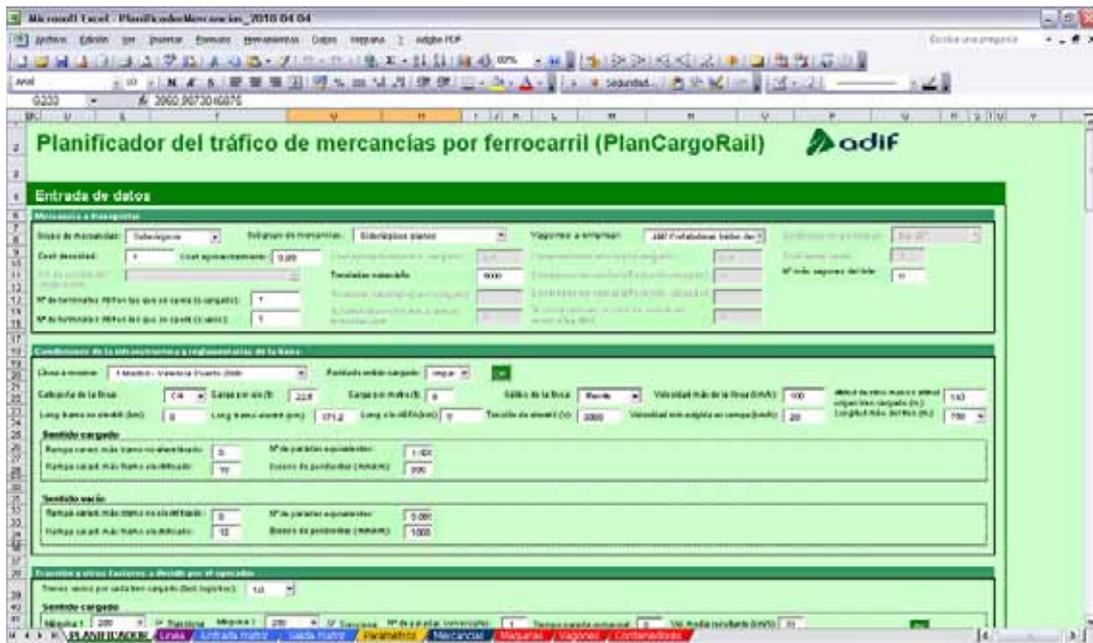


Fig. 1. Entrada de datos en la herramienta PlanCargoRail

La herramienta permite modificar el valor de algunos parámetros como el peso por eje, aprovechamiento de los vagones, número máximo de vagones por lote, locomotoras que traccionan (número y tipo), longitud máxima del tren, etc. Por ello, se puede medir la sensibilidad del grado de utilización de la infraestructura, del coste y del consumo de energía a cada una de estas variables.

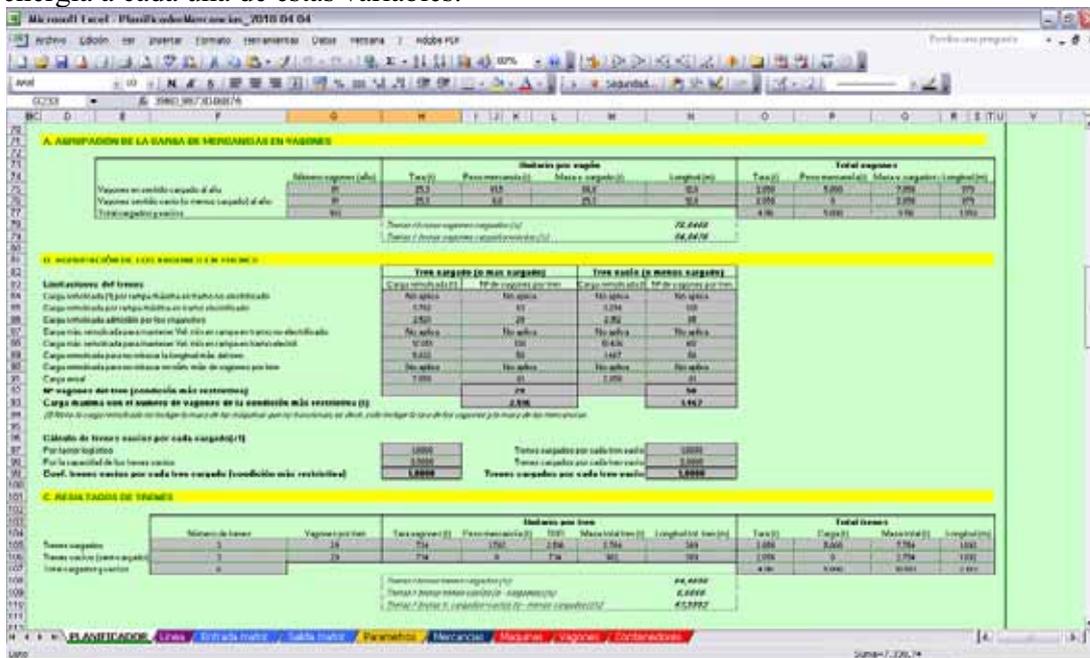


Fig. 2. Presentación de resultados en la herramienta PlanCargoRail. Agrupación de la carga en vagones, limitación de carga y resultados de trenes

Esta herramienta ha sido desarrollada por Adif y la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, con la colaboración un grupo de expertos en transporte de mercancías y explotación ferroviaria. Se han tenido en cuenta factores como la densidad y el aprovechamiento según los productos, el tipo de vagón más adecuado para cada tipo de

mercancía, el porcentaje de vacíos y las limitaciones de carga (por rampa máxima, longitud de los trenes,...)

Los datos de costes empleados han sido tomados de (Rallo, 2008). Los consumos se obtienen mediante el simulador de consumos ALPI2810 en su versión 9, desarrollado por el Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, conforme a la Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias (FFE e IDAE, 2010).

Los algoritmos de cálculo están programados en “Visual Basic” para Excel y el interfaz de usuario está desarrollado en Excel, lo que facilita la entrada de datos al usuario familiarizado con dicha aplicación y la hace compatible con el resto de herramientas del paquete “Office”.

2. PROCESO DE CÁLCULO

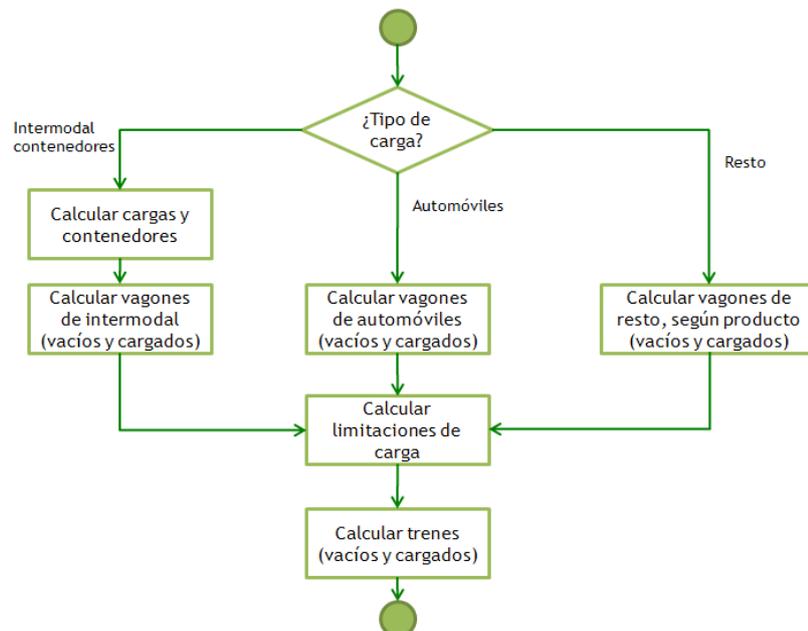
Una vez el usuario ha introducido los datos de la mercancía a transportar, condiciones de la infraestructura, características de la tracción y otros factores, se pueden iniciar los cálculos.

Lo primero es agrupar la carga en vagones, siendo este procedimiento diferente para el transporte intermodal de contenedores, para el de automóviles y para el resto de cargas. En el caso del transporte intermodal hay que realizar un paso previo, el de la conversión de la carga en contenedores.

Se puede escoger el tipo de vagón, ofreciéndose para cada subgrupo de mercancías un catálogo de vagones y entre ello, uno recomendado.

Una vez se conoce el número de vagones para ambos sentidos y la carga unitaria del vagón, se calculan las limitaciones de carga del tren, teniendo en cuenta las características de la línea, la tracción y las restricciones de la operación.

Conocido el número de vagones que puede llevar cada tren cargado y cada tren vacío se calcula el número de trenes así como sus características.



Una vez el usuario ha introducido los datos de la mercancía a transportar, condiciones de la infraestructura, características de la tracción y otros factores, se pueden iniciar los cálculos.

Lo primero es agrupar la carga en vagones, siendo este procedimiento diferente para el transporte intermodal de contenedores, para el de automóviles y para el resto de cargas. En el caso del transporte intermodal hay que realizar un paso previo, el de la conversión de la carga en contenedores.

Se puede escoger el tipo de vagón, ofreciéndose para cada subgrupo de mercancías un catálogo de vagones y entre ello, uno recomendado.

Una vez se conoce el número de vagones para ambos sentidos y la carga unitaria del vagón, se calculan las limitaciones de carga del tren, teniendo en cuenta las características de la línea, la tracción y las restricciones de la operación.

Conocido el número de vagones que puede llevar cada tren cargado y cada tren vacío se calcula el número de trenes así como sus características.

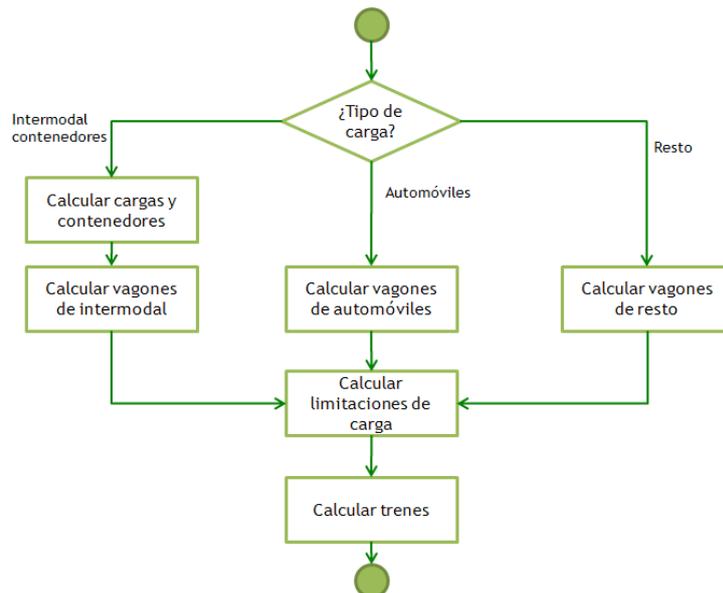


Fig. 3. Procedimiento de cálculo del número de trenes

2.1.1 Conversión de volúmenes de transporte en vagones

Para cada uno de los subgrupos de producto se tienen en cuenta los requerimientos del tipo de vagones que se necesitan para su transporte. Es decir, se considera la tara y carga máxima del vagón, el volumen que puede transportar y su longitud.

En muchos subgrupos de mercancías será preciso considerar además un “coeficiente de aprovechamiento” del vagón, ya que por ser piezas de tamaño discreto (no continuo) o por las peculiaridades de la forma del vagón, resulta imposible conseguir el 100% de la carga teórica.

En el caso de transporte de automóviles es preciso determinar cuántos vehículos caben por vagón, para lo cual se tienen en cuenta dos limitaciones, la longitud y la masa de los vehículos, siendo siempre la más restrictiva (en este tipo de transporte) la longitud.

Se asume la hipótesis, contrastada por la experiencia y la realidad actual, de que (en el tráfico de vagón completo) cada vagón cargado en una determinada relación de tráfico comporta el recorrido de ese mismo vagón vacío en la dirección opuesta. Es decir, sintéticamente, cada vagón cargado origina un vagón vacío. Ello no ocurre así en el tráfico intermodal, para el que se suponen los mismos movimientos de vagones (plataformas) en ambos sentidos.

2.1.1 Transporte intermodal de contenedores

En el caso de transporte intermodal de contenedores puede definirse la carga a transportar de cuatro formas distintas:

- Toneladas del sentido más cargado.
- Toneladas y contenedores vacíos del sentido más cargado.
- Toneladas de ambos sentidos
- Toneladas y contenedores vacíos de ambos sentidos.

A partir de los datos definidos por el usuario hay que llegar a determinar las toneladas transportadas en ambos sentidos y el número de contenedores cargados y de contenedores vacíos para cada uno de los sentidos.

El número de contenedores se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de densidad y la carga máxima de los mismos.

2.2 Cálculo de las limitaciones de carga del tren

Una vez se han calculado los vagones necesarios para transportar la carga, hay que agruparlos para la formación de trenes, atendiendo a ciertas limitaciones.

Las limitaciones de carga se calculan, tanto para el tren en el sentido más cargado como para el sentido menos cargado, conforme se detalla a continuación.

Las limitaciones que se tienen en cuenta son: la rampa máxima, el esfuerzo admisible en los enganches, la velocidad mínima exigida en rampa, la longitud máxima del tren y el número máximo de vagones por lote.

2.2.1 Carga remolcada limitada por la rampa máxima

Una vez se conoce la rampa característica máxima de la línea, las cargas máximas se determinan consultando una tabla publicada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias en la que figura la carga máxima de las distintas locomotoras en función de la rampa característica.

Esta tabla tiene en cuenta la carga máxima arrancable en régimen máximo y por adherencia; la carga máxima remolcable en régimen continuo, unihorario y limitada por adherencia en la marcha (Estrada, 2010).

2.2.1 Carga remolcada limitada por el esfuerzo admisible por los enganches

Cada vez es más frecuente el acoplamiento de locomotoras para remolcar trenes de mayor masa con el mismo consumo de capacidad de infraestructura (de surcos) y con mayor productividad del personal de conducción. Dos locomotoras acopladas en cabeza de tren posibilitan el remolque de casi el doble de carga. En estas circunstancias tan solo la capacidad máxima del esfuerzo en el gancho limita el número de locomotoras que pueden ir en cabeza, ya que podría llegarse a la rotura del gancho del primer vagón por superar el esfuerzo de tracción al que sería sometido.

2.2.1 Carga remolcada limitada por la velocidad mínima en rampa

En los trenes de mercancías es necesario tener en cuenta la velocidad mínima en función de la tracción y de la carga. La influencia de la carga en el tiempo de recorrido es notable, especialmente en el caso de la tracción diésel. El incremento del tiempo de recorrido incide

directamente en el uso de la capacidad de línea, especialmente en los casos de vía única. Por ello el administrador de infraestructuras puede establecer una velocidad mínima de circulación en rampa.

2.2.1 Carga remolcada limitada por la longitud máxima del tren

En la mayor parte de las líneas ferroviarias existe una limitación de longitud derivada de la capacidad de estacionamiento de las vía de apartado en las que los trenes de mercancías deben situarse para facilitar el cruce y adelantamiento con otros trenes que circulan por la línea o entre ellos mismos. Esta limitación también existe en líneas dotadas de vía doble por los adelantamientos, establecimiento de vías únicas temporales por trabajos o estacionamiento de trenes averiados.

Normalmente es el gestor de la infraestructura el que establece la limitación de la longitud, indicándola en la *Declaración sobre la red*.

2.2.1 Carga remolcada limitada por el número máximo de vagones por lote

El cliente puede establecer el número máximo de vagones a transportar en cada tren, por ejemplo por las características de los apartaderos de carga o descarga, y dicha limitación se debe considerar a la hora de efectuar el transporte.

2.3 Cálculo de número de trenes

Conocido el número de vagones a transportar y los vagones por tren, según las limitaciones anteriormente calculadas, se determina el número de trenes para el sentido más cargado.

A partir del número de trenes cargados se determina el número de trenes vacíos teniendo en cuenta el “factor logístico” (trenes vacíos/trenes cargado) definido por el usuario, que indica cuántos trenes vacíos hay por cada tren cargado.

3. CASO EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

A continuación se desarrolla un caso de ejemplo en el que se muestra la agrupación de la carga anual en vagones y trenes cargados y vacíos considerando las limitaciones de carga y variándose algunos parámetros del tren y la infraestructura. Para los mismos casos se realiza un análisis de sensibilidad del consumo de energía y costes.

3.1 Parámetros de la simulación

A continuación se detallan los productos, líneas y material motor y remolcado que se han empleado para realizar las simulaciones.

3.1.1 Productos

Se han empleado dos productos de mercancías, los automóviles como representativos de mercancías “ligeras”, de baja densidad de carga, y siderúrgicos planos, como muestra de productos “densos”.

En el caso de los automóviles se ha supuesto una carga anual de 5.000.000 vehículos y para los siderúrgicos de 5.000.000 toneladas.

3.1.1 Líneas

Para realizar las simulaciones se han empleado dos líneas, una representativa de los trazados montañosos, León-Gijón, y otra de perfil más llano, Valladolid-León.

La línea León-Gijón tiene una longitud de 171,6 km y la rampa característica máxima es en el sentido León-Gijón de 23 milésimas y en el opuesto de 22 milésimas.

La línea Valladolid-León tiene una longitud de 171,2 km y la rampa características máxima es en el sentido Valladolid-León de 12 milésimas y en el contrario 10 milésimas.

Se ha supuesto que los trenes cargados circulan de Gijón hasta León y desde Valladolid a León y los vacíos lo hacen en el sentido opuesto.

3.1.1 Material

Para traccionar los trenes simulados se ha empleado la locomotora diésel serie 333.300 y la eléctrica serie 250, ambas utilizadas habitualmente en el transporte de mercancías en España.

La locomotora eléctrica 250 no dispone de freno regenerativo, pero como se ha querido tener en cuenta el efecto de esta tecnología, se han realizado simulaciones suponiendo su existencia.

En la tabla se muestran las características principales de las máquinas empleadas y las cargas que pueden remolcar en rampa, conforme a (Adif, 2010).

Tabla 1. Características de las locomotoras empleadas para la simulación

		Locomotoras	
		333.300 Diésel	250 Eléctrica
Fabricante		Vossloh	MTM-CAF
Rodaje		Co'Co'	C'C'
Tara	<i>t</i>	120	124
Longitud	<i>m</i>	22,330	20,000
Potencia	<i>kW</i>	2.237	4.600
Carga remolcable en rampa de 0mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 5mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 10mm/m	<i>t</i>	1.950	2.090
Carga remolcable en rampa de 15mm/m	<i>t</i>	1.410	1.530
Carga remolcable en rampa de 20mm/m	<i>t</i>	1.100	1.190
Carga remolcable en rampa de 25mm/m	<i>t</i>	880	970

Para el transporte de automóviles se han empleado las plataformas de dos pisos MA 5 y para el transporte de siderúrgicos planos los vagones portabobinas con toldo deslizante JJ92.

Tabla 2. Características de los vagones empleados para la simulación

	Vagones	
	MA5 Porta automóviles 2 pisos	JJ92 Portabobinas toldos deslizantes
Ejes	4	4
Carga máxima (t)	22	65
Tara media (t)	28	25
Peso por eje (t)	12	23
Longitud entre topes (m)	27	12
Longitud interior caja (m)	52	11
Altura máxima interior (m)	4	3
Anchura máxima interior (m)	3	3
Velocidad máxima (km/h)	100	120

3.1.1 Unidades

Las emisiones se han medido en kilogramos de dióxido de carbono por tonelada neta kilómetro y los costes de explotación en céntimos de euro por tonelada neta kilómetro. En todos los casos se tienen en cuenta los recorridos en vacío, ya que como hipótesis se ha establecido que todo tren cargado genera un tren vacío con un número de vagones inferior o igual que viene determinado por el coeficiente de vacíos. A este coeficiente se le ha dado el valor de 0,8 en transporte de automóviles y 1 para los siderúrgicos planos.

Los costes de explotación contemplan los costes de alquiler o amortización y mantenimiento de las locomotoras y vagones; canon por el uso de la infraestructura; costes de operación en los que se incluyen los costes de personal y de energía.

3.2 Determinación de la capacidad de la infraestructura consumida

3.2.1 Simulación del transporte de automóviles

La limitación de carga en el caso de transporte de automóviles no es la masa sino la longitud de los mismos. Las limitaciones por “carga en rampa máxima”, “velocidad mínima en rampa” y “esfuerzo de los enganches” son siempre menos restrictivas que la de longitud máxima del tren. Por ello, en este caso tiene sentido analizar la sensibilidad al tipo de tracción y a la longitud del tren y no a la carga por eje.

Tipo de tracción en trenes ligeros

Se realizan los cálculos para ambas líneas, con locomotora eléctrica y diésel, como hipótesis de simulación se ha supuesto que la carga por eje es 22,5 toneladas, la longitud máxima del tren 450 metros y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 3. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

Línea	Vallad.-León		León-Gijón	
	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Locomotora				
Vagones cargados / año	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos / año	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados /año	28.381	28.381	28.381	28.381
Trenes vacíos /año	28.381	28.381	28.381	28.381
Vagones tren cargado	15	15	15	15
Vagones tren vacío	12	12	12	12
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta / masa tren cargado	0,2462	0,2475	0,2462	0,2475
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,1503	0,1513	0,1503	0,1513

Como puede observarse, en caso de trenes ligeros el número de vagones admisibles por tren es el mismo en ambas líneas y con los dos tipos de tracción, pues la condición restrictiva es la longitud máxima del tren.

Longitud máxima del tren en trenes ligeros

Se muestran a continuación los cálculos para longitudes máximas de tren de 450, 600 y 750 m, en ambas líneas con la locomotora eléctrica 250, considerándose como hipótesis de simulación que la carga por eje es de 22,5 t y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 4. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la longitud máxima admisible del tren

Línea	Vallad.-León			León-Gijón		
	450	600	750	450	600	750
Longitud máxima						
Vagones cargados / año	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos / año	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados /año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Trenes vacíos /año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Vagones tren cargado	15	21	27	15	21	26
Vagones tren vacío	12	16,8	21,6	12	16,8	20,8
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta / masa tren cargado	0,2462	0,2590	0,2667	0,2462	0,2590	0,2656
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,1503	0,1600	0,1659	0,1503	0,1600	0,1651

Puede observarse que en ambas líneas el aumento de la longitud de máxima admisible del tren supone incrementar el número de vagones que puede llevar el tren y por ello reducir el número de trenes y el uso de la capacidad de la infraestructura.

3.2.1 Simulación del transporte de siderúrgicos planos

En el transporte de mercancías “densas” las limitaciones de carga del tren son la carga máxima en rampa, la fuerza de los enganches y la carga admisible para mantener la velocidad mínima en rampa establecida. Sin embargo, la limitación de longitud del tren es siempre la menos restrictiva. Por ello a continuación se muestran los resultados de vagones y trenes con distintos tipos de tracción y carga por eje.

Tipo de tracción en trenes “densos”

Se han simulado en ambas líneas trenes remolcados por la locomotora eléctrica y la diésel, como hipótesis se ha supuesto que la carga por eje es de 22,5 toneladas, la fuerza de los enganches 360 kN y la longitud máxima del tren 600 metros.

Tabla 5. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Locomotora				
Vagones cargados / año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos / año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados /año	3.389	3.698	6.779	7.395
Trenes vacíos /año	3.389	3.698	6.779	7.395
Vagones tren cargado	24	22	12	11
Vagones tren vacío	24	22	12	11
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Rampa max
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Rampa max	Rampa max
Carga neta / masa tren cargado	0,6686	0,6665	0,6330	0,6293
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,5022	0,4998	0,4631	0,4591

Puede observarse que en ambos líneas los trenes remolcados por la máquina eléctrica pueden remolcar mayor número de vagones, esto es debido a que el factor que limita la carga del tren es la carga remolcable en rampa máxima y la máquina eléctrica puede remolcar mayor carga que la diésel. Si se comparan los resultados de ambas líneas se aprecia que los trenes de León-Gijón llevan la mitad de vagones los de Valladolid-León pues el perfil de esta última línea es mucho más favorable.

El mismo análisis se muestra a continuación en el caso de que los trenes sean remolcados por dos locomotoras.

Tabla 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300
Locomotora				
Vagones cargados / año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos / año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados /año	2.805	2.805	6.257	6.257
Trenes vacíos /año	2.805	2.805	6.257	6.257
Vagones tren cargado	29	29	13	13
Vagones tren vacío	29	29	13	13
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta / masa tren cargado	0,6449	0,6467	0,5807	0,5841
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,4759	0,4779	0,4092	0,4125

Estos trenes no llevan el doble de carga que los remolcados por una única máquina debido a que están condicionados por la fuerza de los enganches.

Carga por eje en trenes “densos”

Para estudiar la influencia de la carga por eje en trenes densos se han considerado cargas por eje de 20, 22,5 y 25 t y se ha empleado la máquina eléctrica, suponiéndose que la fuerza de los enganches es de 360 kN y la longitud máxima de los trenes es 600 m

Tabla 7. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León
Carga por eje	20	22,5	25
Vagones cargados / año	96.219	81.347	70.457
Vagones vacíos / año	96.219	81.347	70.457
Trenes cargados /año	3.564	3.389	3.355
Trenes vacíos /año	3.564	3.389	3.355
Vagones tren cargado	27	24	21
Vagones tren vacío	27	24	21
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Long max
Carga neta / masa tren cargado	0,6348	0,6686	0,6946
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,4650	0,5022	0,5321

Puede observarse que conforme se incrementa la carga por eje van siendo necesarios menos trenes al año y con un menor número de vagones y de trenes, pues cada vagón puede transportar mayor carga.

El mismo análisis se realiza con doble tracción.

Tabla 8. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje en doble

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León
Carga por eje	20	22,5	25
Vagones cargados / año	96.219	81.347	70.457
Vagones vacíos / año	96.219	81.347	70.457
Trenes cargados /año	3.007	2.805	2.710
Trenes vacíos /año	3.007	2.805	2.710
Vagones tren cargado	32	29	26
Vagones tren vacío	32	29	26
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación del tren vacío	Long max	Long max	Long max
Carga neta / masa tren cargado	0,6112	0,6449	0,6707
Carga neta / (masa tren cargado + masa tren vacío)	0,4401	0,4759	0,5046

Vuelve a apreciarse que la doble tracción no supone duplicar la carga transportada por cada tren pues esta se encuentra limitada por la fuerza de los enganches.

3.3 Análisis de sensibilidad del coste y emisiones tráfico de mercancías a parámetros de la infraestructura y el tren

Para mostrar la funcionalidad de la herramienta se ha desarrollado con ella un estudio complementario sobre la sensibilidad de los costes económicos y las emisiones de dióxido de carbono a la variación de parámetros característicos de la infraestructura, como la longitud admisible de los trenes y la carga por eje; y a la variación de la tracción (diésel o eléctrica, simple o doble).

Simulación del transporte de automóviles

Se analiza a continuación la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y a la longitud del tren.

Tipo de tracción en trenes ligeros

Como se puede observar en la siguiente figura, en el caso de la línea León-Gijón las emisiones de CO₂ de la máquina eléctrica con freno regenerativo son muy inferiores a las de

la misma máquina sin freno regenerativo. Esta diferencia es debida a las fuertes pendientes que presenta esta línea, en las que es necesario frenar para no superar la velocidad máxima admisible y por ello se puede regenerar más energía. Sin embargo, si se realiza la misma comparación en la línea Valladolid-León las emisiones son bastante similares.

En ambas líneas las emisiones del tren remolcado por la máquina diésel aproximadamente tres veces superiores a las de la tracción eléctrica, como ya señalaba (García Álvarez, 2009). En la línea León-Gijón las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son 0,0379 kgCO₂/tmeta.km frente a los 0,0937 kgCO₂/tmeta.km del tren diésel.

En cuanto a los costes de explotación, los del tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo son algo menores que los del remolcado por la máquina sin freno regenerativo (en la línea Valladolid-León 9,906 c€/tmeta.km y 9,962 c€/tmeta.km respectivamente) debido al menor consumo neto de energía. Los costes del tren diésel son siempre superiores debido al mayor coste de mantenimiento de estas máquinas y de la energía, y a que la máquina diésel puede remolcar menos toneladas por lo que son necesarios más trenes para realizar el mismo transporte.

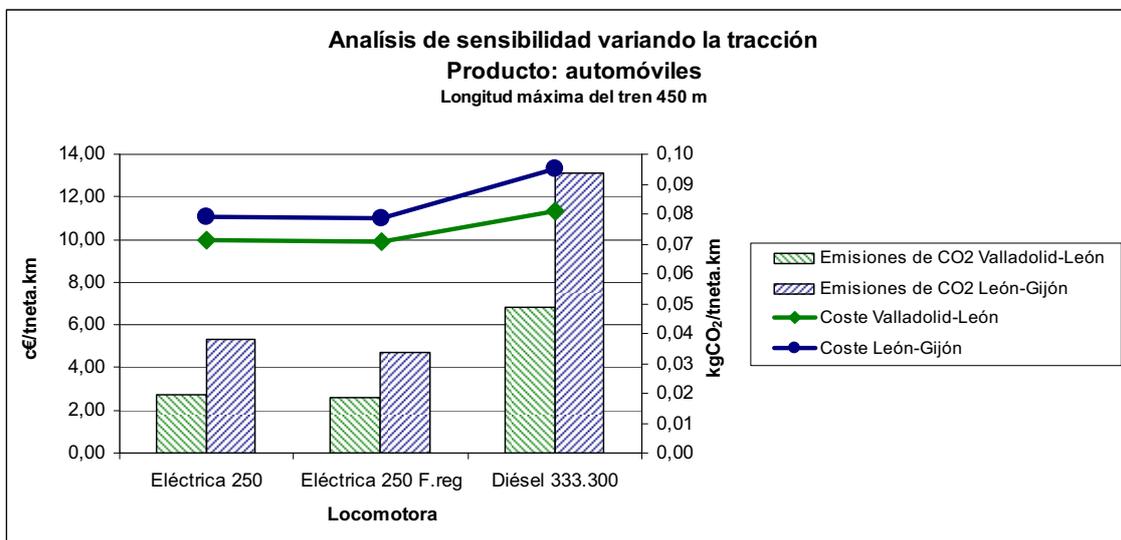
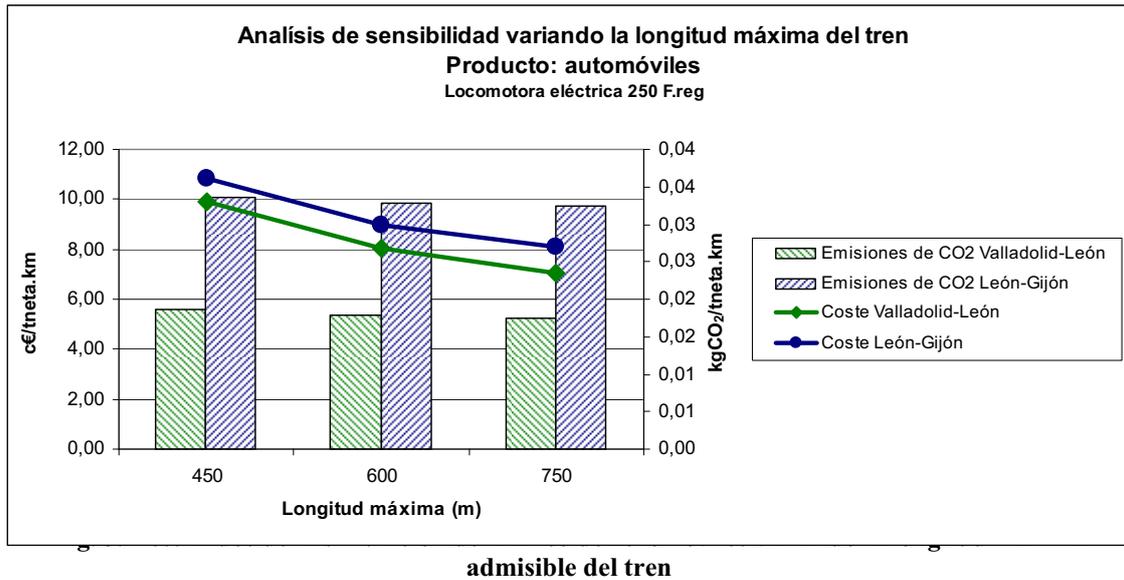


Fig. 4. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

Longitud máxima del tren en trenes ligeros

Los resultados de la simulación muestran que en ambas líneas al incrementarse la longitud del tren se produce una pequeña disminución de las emisiones. Sin embargo, el efecto de este factor se aprecia en los costes que decrecen considerablemente al incrementarse la longitud. Ello es debido a que los costes de las locomotoras, personal y canon por el uso de la infraestructura se mantienen y se dividen entre un mayor número de toneladas netas transportadas. Un incremento de la longitud del tren del 33% supone una reducción de costes del 19% en la línea Valladolid-León y del 17% en la línea León-Gijón.



3.3.1 Simulación del transporte de siderúrgicos planos

A continuación se estudia la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y la carga por eje.

Tipo de tracción en trenes densos

Las emisiones de CO₂ en la línea montañosa (León-Gijón) son siempre superiores a las de la línea llana (Valladolid-León), debido al trazado más desfavorable que presenta la primera y a la necesidad de frenar en las pendientes. Por la misma razón que se expuso en el caso del transporte de automóviles, las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son inferiores a las del tren eléctrico sin freno regenerativo. Las emisiones del tren diésel son muy superiores a las del eléctrico; por ejemplo en la línea León-Gijón 0,0098 kgCO₂/tneta.km para el tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo y 0,0271 kgCO₂/tneta.km para el tren traccionado por la máquina diésel.

Los costes de explotación del tren eléctrico son siempre inferiores a los del tren diésel (2,659, 2,598 y 3,455 c€/tneta.km respectivamente). Si se comparan los costes en ambas líneas se puede apreciar que son muy superiores en la línea León-Gijón (en el caso de tracción eléctrica sin freno regenerativo 1,468 c€/tneta.km frente a 2,659 c€/tneta.km), ello es debido a que las limitaciones de carga por rampa máxima, que son las que en este caso determinan el tamaño del tren, son más restrictivas en esta línea y por lo tanto se requiere un mayor número de trenes para realizar el transporte, lo que implica mayores costes de explotación por tren.km y consecuentemente por tonelada neta.km.

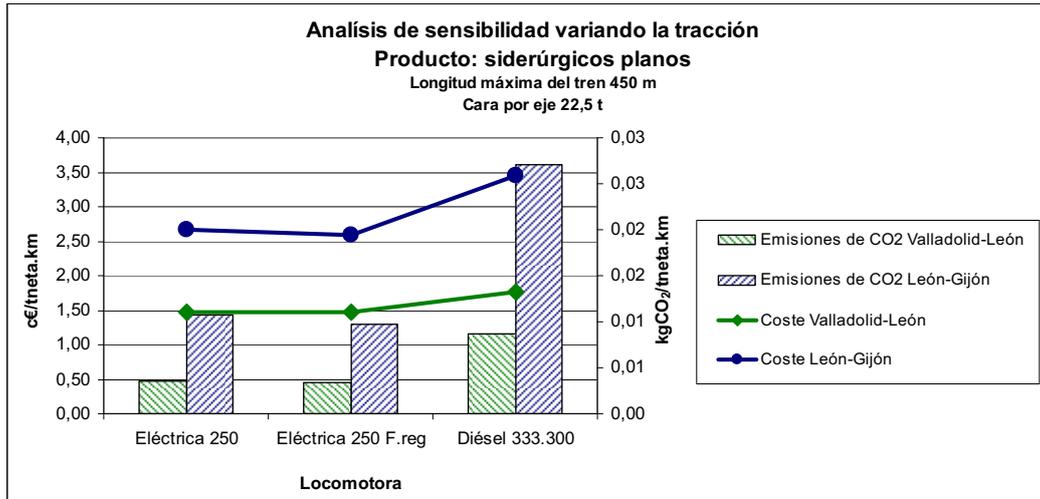


Fig. 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción

A continuación se ha estudiado el efecto que tiene el empleo de doble tracción, que permite remolcar mayores cargas. Los costes aumentan en mayor proporción que la carga que se puede transportar que no llega al doble pues aparece una limitación por el esfuerzo que admiten los enganches.

Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.

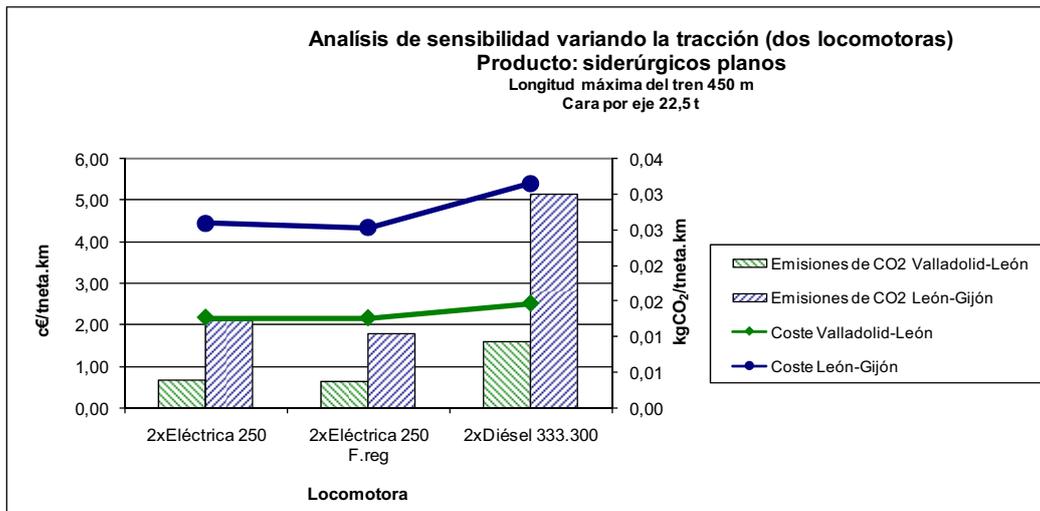


Fig. 7. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción

Carga por eje en trenes densos

Como se observa en la gráfica el incremento de la carga por eje admisible supone en este producto una reducción de los costes de explotación y de las emisiones, aunque esta última no es muy significativa. Un incremento del 11% de la carga por eje se traduce en una reducción de las emisiones del 7% y un 10% de los costes.

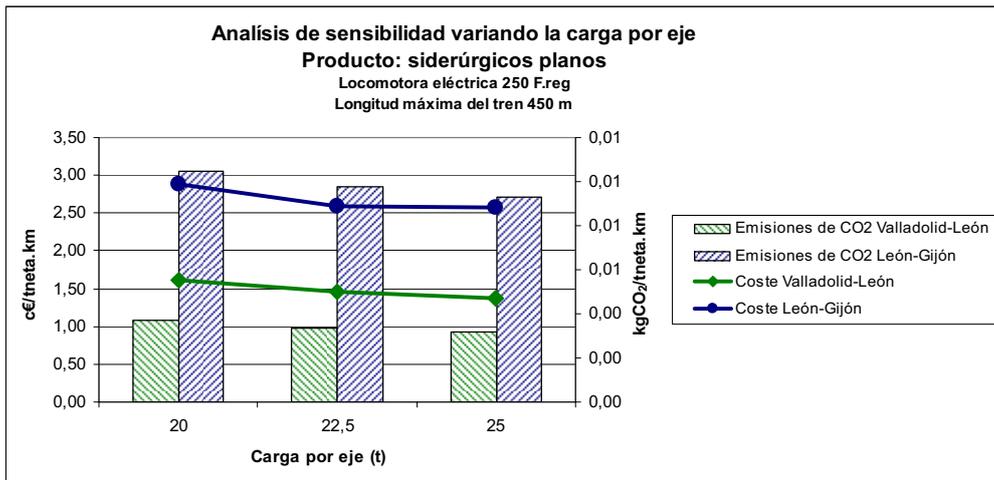


Fig. 8. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje

4. CONCLUSIONES

La herramienta de simulación presentada permite a partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes.

Adicionalmente, *PlanCargoRail* obtiene el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

En cuanto al caso ejemplo mostrado, se pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La distribución de la carga en vagones depende de las características de estos y los coeficientes de densidad y aprovechamiento; la distribución de los vagones en trenes depende de numerosos factores: unos de infraestructura (rampa, electrificación, carga por eje...); otros del tren (tracción, fuerza de los enganches) y otros de la explotación (velocidad mínima en rampa). Según los casos unos u otros inducen una caracterización del tren muy diferente.
2. Los costes de explotación y las emisiones de los trenes remolcados por máquina diésel están siempre muy por encima de los de los trenes remolcados por máquinas eléctricas, por lo que su uso solo está justificado en el caso de líneas no electrificadas.
3. El incremento de la longitud admisible de los trenes, despliega sus efectos positivos para trenes de productos ligeros y vacíos y afecta principalmente a los costes de explotación, con una reducción en torno al 18% al realizarse un incremento de la longitud del 33%.
4. La doble tracción para remolcar trenes muy pesados supone un incremento de los costes y las emisiones que no llega a ser el doble de los trenes traccionados por una única locomotora. Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.
5. El incremento de la carga por eje es interesante en el caso de trenes densos pues supone una reducción de los costes y las emisiones. Un incremento del 11% de

la carga por eje supone una reducción de las emisiones del 7% y de los costes del 10%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIF (2010). *Cuadro de cargas máximas*. Adif, Madrid.

ESTRADA GUIJARRO, J. (2010). *Conceptos generales de gestión de capacidad*. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Master Universitario en Sistemas Ferroviarios.

RALLO GUINOT, V. (2008). Monografía del Observatorio del Ferrocarril. Costes del transporte de mercancías por ferrocarril. Una primera aproximación para su estudio sistemático Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑÓLES e IDAE (2010). *Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril. *Revista Anales de mecánica y electricidad*, enero-febrero 2009.

Relación entre el precio básico medio del billete de tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Beatriz Luceño Ramos

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento es una ampliación de la ponencia, que con el mismo título, fue presentada en Madrid en el IX Congreso de Ingeniería del Transporte "CIT 2010", el 8 de julio de 2010. Esta ampliación desarrolla todo el iter metodológico de dicho estudio, además de completar el aparato econométrico del modelo descrito en el mismo.

Relación entre el precio básico medio del billete de tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

Beatriz Luceño Ramos

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un estudio sobre la relación existente entre el precio del transporte de tren (medido por el indicador Percepción media por viajero.kilómetro), la velocidad media del transporte y la distancia media recorrida por el viajero.

El estudio incluye la construcción de un modelo econométrico, a partir de datos de sección cruzada. Mediante el establecimiento de la correlación lineal entre la variable dependiente “Percepción media homogeneizada” (expresada en céntimos de euro por viajero.kilómetro) y las variables independientes “Velocidad media alcanzada” y “Distancia media recorrida por el viajero”, se llega a una fórmula que permite estimar el precio básico medio de un servicio ferroviario en el entorno de oferta y de mercado de 2008.

Se parte del hecho de que el precio del transporte de viajeros no se puede anticipar teniendo en cuenta únicamente el valor nominal de la tarifa, ya que sobre ella se practican múltiples descuentos e incluye tributos. Por ello, en el modelo, el indicador Percepción media por viajero.km, da una idea más ajustada del ingreso medio realmente percibido por el servicio de transporte.

Se parte de las siguientes hipótesis (García Álvarez, A. 2006):

A medida que la velocidad del servicio aumenta, la Percepción media por viajero.km también crece, debido a que los viajeros atribuyen un valor económico al tiempo empleado, que pasa a formar parte de la “desutilidad” del viaje.

La Percepción media tiende a descender cuanto mayor es la distancia recorrida, en coherencia con la estructura de costes del operador y con la predisposición al pago del mercado, así como la menor competencia al coche particular al crecer el recorrido.

1. OBJETO Y METODOLOGÍA

1.1 Objeto

El objetivo último de este estudio es disponer de una estimación de los precios medios esperables en el transporte de viajeros y su sensibilidad al tiempo de viaje. De cara a la planificación de servicios o de líneas permite conocer a cuánto se puede vender (como media) el producto en transporte interurbano y cuáles son las variables que más inciden en ese precio medio. Conocer anticipadamente el precio medio del transporte en cada útil para los estudios previos de rentabilidad socioeconómica de las infraestructuras, etc. Para este tipo de estudios, normalmente se emplea la “Percepción media” (c€/viajero-kilómetro) obtenida de la experiencia para el tipo de servicio de que se trate (AVE, Avant, etc.) pero no se tienen en cuenta las peculiaridades de cada ruta en concreto (distancia y velocidad media), por lo que en ciertas rutas (en aquellas en las que la distancia y/o velocidad son

sensiblemente diferentes de la media del servicio) se pueden producir distorsiones importantes.

1.2 Conceptos Previos

1.2.1 Definiciones

Se entiende por Percepción media por viajero.km, el indicador que permite relacionar el ingreso y el precio del transporte de tren por unidad de distancia recorrida. Es el resultado de dividir el monto total de los ingresos comerciales producidos por un tren o por un grupo de trenes en un periodo de tiempo (excluido IVA) entre los viajeros por kilómetro transportados en los mismos trenes y periodos de tiempo. Su unidad de medida son céntimos de euro por viajero.kilómetro (c€/v.km).

Es preciso tener en cuenta que el precio pagado por el cliente incluye en muchos casos, restauración, aparcamiento, prensa y otras atenciones al cliente. En algunos servicios se incluyen estas prestaciones y en otros servicios no, por lo que es preciso realizar una homogeneización.

Por otra parte, algunos trenes disponen de varias clases (club, preferente y turista,...), mientras que otros sólo ofrecen una única clase, siendo obviamente mayor el precio medio en los primeros, lo que también sugiere la necesidad de homogeneización.

Definimos, a la vista de ello, como Percepción media homogeneizada por viajero.km, el cociente entre el ingreso total minorado con el coste de la atención al cliente y homogeneizado para la suposición de que el tren únicamente ofreciese la clase turista, y los viajeros.kilómetro transportados.

Para comparar el ingreso de un tren que ofrece varias clases con el que tendría si únicamente ofreciese clase turista, se define el Coeficiente mayorador del espacio (CME), como el cociente entre las plazas que tendría el tren si todo él fuese clase turista y las que realmente tiene, siendo su valor, por tanto, mayor que la unidad.

$$\text{Percepción media homogeneizada} = \left(\frac{\text{Ingresos Totales} - \left(\text{Viajeros} \cdot \left(\frac{\text{Coste atenciónal cliente}}{\text{Viajero}} \right) \right)}{\text{Viajeros} \cdot \text{km}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\text{CME}} \right)$$

Mercado y fijación de precios

Salvo en el caso de las tarifas fijadas administrativamente, los precios son establecidos por el mercado. Por lo tanto, cada situación de mercado tiene un distinto nivel de precios. Ello difiere del escenario anterior, en el que los precios del transporte estaban enteramente regulados. También (en cuanto al nivel de precios) es diferente de la previsible situación futura, en la que el escenario actual cambiará, debido a la liberalización del sector y al aumento del nivel de competencia intermodal y de la oferta, que posiblemente presionará los precios a la baja.

El establecimiento de precios por el mercado, viene a su vez marcado por la estructura del propio mercado: competencia intermodal en cada corredor y monopolio en la operación del transporte de viajeros por ferrocarril.

La fijación de precios ha pasado por cuatro etapas:

Relación entre el precio básico medio del billete del tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero

1ª Etapa: Con tarifa oficial regulada y descuentos regulados en todos los servicios, hasta los años 80, persistiendo todavía en Cercanías y servicios regionales. Estas tarifas suelen ser de “base kilométrica” con escala decreciente (a mayor recorrido, menor precio por kilómetro).

2ª Etapa: Los llamados “precios globales”, que se fijan punto a punto y tren a tren, sobre los que además, ha habido descuentos y que incorporan la lógica del mercado. Estos “precios globales” se han mantenido en España hasta principios del siglo XXI en los servicios de larga distancia como sistema casi único.

3ª Etapa: Los “precios variables”. A su vez, presentan dos versiones:

- La que emplea el ferrocarril, variable con descuentos y que puede adquirir distinta modulación, dependiendo del tipo de tarifa de que se trate (por ejemplo, en el caso del AVE, las tarifas “Web”, “Estrella”,...). Esta variabilidad se realiza en consonancia con los usos del mercado.
- La de las compañías aéreas de bajo coste, que se establece según el mercado, y que en el caso del ferrocarril encuentra ejemplo en el servicio ID del TGV francés.

4ª Etapa: El contexto actual: tanto las Cercanías como los trenes regionales cuentan con tarifas fijadas por el regulador con descuentos propuestos por el operador, y con una cierta lógica del mercado. El resto de servicios tiene “precios globales” con descuentos subjetivos y con descuentos derivados de las condiciones de mercado.

Se puede observar que la variabilidad del precio para un mismo mercado se va haciendo cada vez mayor. Existe una evolución hacia la discriminación de precios, lo cual hace que nos fijemos en el precio medio, y no en el precio nominal (o valor facial del billete).

El estudio ha de ser entendido para el contexto temporal en el que ha sido realizado; esto es, el año 2008. Por tanto el análisis y conclusiones que de él se desprenden tienen encaje en una situación de mercado en la que comenzó una crisis económica mundial en el último tercio del año que se trasladó de manera generalizada, desde el mundo financiero hasta todos los sectores económicos, resintiéndose fuertemente, entre otros el del transporte. El que los efectos de la crisis se comenzasen a trasladar al sector del ferrocarril a finales del ejercicio 2008, en parte explica la evolución descendente de los precios medios del ferrocarril en larga distancia que se produjo en 2009 y 2010.

Precio nominal e ingreso

No debe confundirse el precio pagado por el viajero con el ingreso obtenido por el operador del servicio. La diferencia entre ambos se va acentuando cada vez más, y ello es debido a que el precio pagado incluye impuestos indirectos, la remuneración al canal de venta (que se puede repercutir total o parcialmente), la parte no pagada a través de las tarjetas de fidelización (por ejemplo, la tarjeta AVE) y algunos servicios complementarios (transporte de maletas, restauración, etc.)

Debe recordarse que en el transporte interurbano de viajeros, el precio absoluto (€/viajero), aumenta con la distancia, mientras que la Percepción media (c€/viajero.km), disminuye con la distancia recorrida.

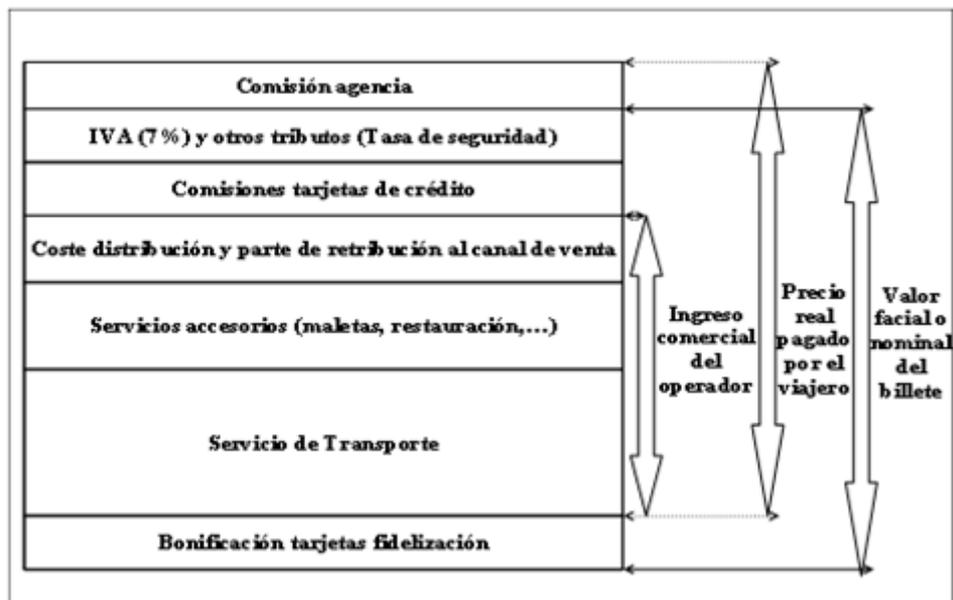


Fig. 1. Relación entre el precio pagado por el viajero y el ingreso del operador
Fuente: Elaboración propia

Metodología

Para encontrar las relaciones funcionales entre la *Percepción media homogeneizada por viajero.km* y la *Velocidad* y la *Distancia*, se sigue el siguiente método:

Se realizan una serie de observaciones de la realidad, tanto de larga distancia (500 rutas “origen-destino” de Renfe en 2008), como de media distancia (*Avant-Regional*), así como de trenes de Cercanías.

Se depuran los datos extraídos de la realidad, eliminando aquellos que no se consideran significativos, ya sea porque la distancia media recorrida en las rutas en cuestión sea inferior a 200 km, ya sea porque correspondan a recorridos internacionales o bien porque exista desproporción entre la respectiva ruta por tren y la equivalente por carretera y a avión (lo cual distorsiona los precios por kilómetro).

Se homogeneizan los datos significativos, descontando de los ingresos brutos del operador los costes asociados a la atención al cliente (restauración, prensa,...) y a las plazas de preferente.

Se obtiene la función de precios homogeneizados a partir de un modelo econométrico.

Para un caso concreto, caracterizado por una determinada distancia y velocidad, se puede obtener la *Percepción media homogeneizada por viajero.km*, dándole a las variables dependientes en la función de costes los valores concretos del caso.

Para el caso concreto, el valor anterior se “deshomogeiniza”, añadiéndole los costes de la atención al viajero y el efecto de las clases (CME) que en realidad tenga en tren.

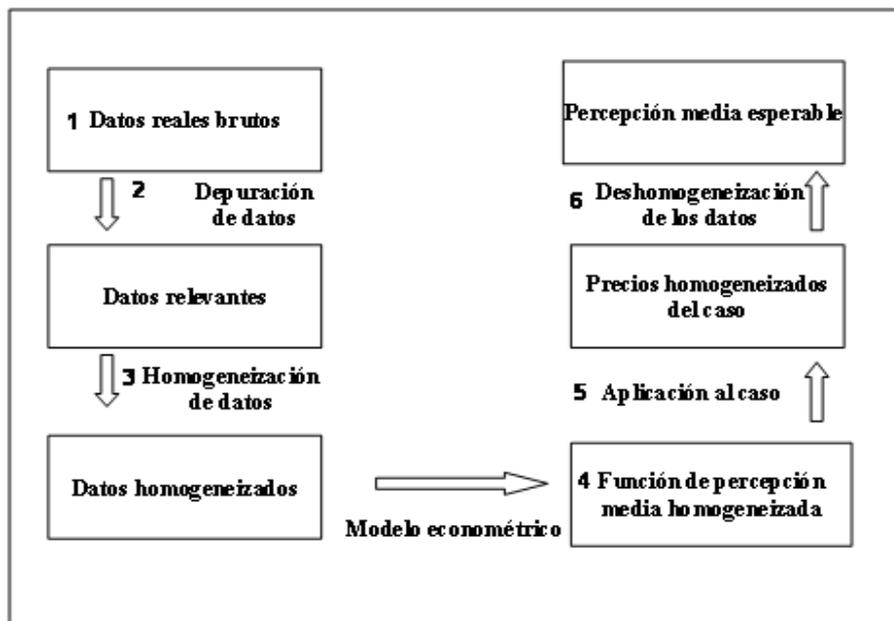


Fig. 2. Metodología del estudio.
Fuente: Elaboración propia

2. ESTADO DEL ARTE

El estudio de los precios ferroviario se ha visto subsumido, en muchas ocasiones, dentro de otros que perseguían un objeto más amplio. De este modo, podemos destacar la estructura de precios que describe García Álvarez (2006), dentro de las estrategias basadas en el precio, en la Explotación Económica y Regulación del Transporte de Viajeros por Ferrocarril en el Nuevo Escenario Competitivo; la evaluación de la rentabilidad económica para corredores concretos –de Rus e Inglada (1993, 1997) para la línea Madrid-Sevilla; Levinson *et al.* (1997) para Los Ángeles-San Francisco; Steer Davies Gleave (2004) y Department of Environment, Transports and the Regions (2004) para el Reino Unido; y de Rus y Nombela (2004) para la Unión Europea-; en Álvarez y Herce (2001), el tratamiento de los precios se extrapola del mundo microeconómico hasta los efectos macroeconómicos de de la alta velocidad en España; y finalmente, hay autores que han incluido el análisis de las estructuras tarifarias como parte del estudio de los efectos económicos de la inversión en infraestructura ferroviaria sobre el desarrollo regional (Plassard, 1994; Vickerman, 1995; Blue, Haynes y Karlsson, 1997).

En este ámbito, en la modelización llevada a cabo por la econometría, destacan Hsing (1994), con un modelo de adaptación parcial Box Cox, en el que la variable independiente es el precio, o tarifa, -junto con el PIB- y la dependiente, el output agregado. Trasunto de este estudio, pero en esta ocasión trasladado a India, encontramos el estudio Kushrestha *et al.* (2001), con un modelo econométrico basado en un sistema de ecuaciones VAR, en el que la variable independiente es el precio o tarifa -junto con el PIB y el número de vehículos-, y al igual que en el estudio Hsing, la variable dependiente es el output agregado. En el caso español, destaca el estudio Coto Millán (1995), que utiliza técnicas de cointegración para construir un modelo econométrico relativo al transporte marítimo.

Los modelos econométricos, pueden ser agregados o desagregados. Dentro de los agregados, destacan los siguientes:

El Estudio Oum (1979) en Canadá, construye un modelo econométrico a través de una función de costes *traslog*, con datos de sección cruzada, tales que, para cada clase de

producto, hay un número diferente de observaciones. Las variables dependientes son los costes y la participación en los mismos, y las independientes, las tarifas, los tiempos de viaje, la variación en el tiempo y la distancia. Sólo posee sólo dos modos y diferentes especificaciones hedónicas.

El Estudio Friedlander y Spady (1980) en EEUU, construye un modelo econométrico a través de la función de costes *traslog*, con datos de sección cruzada en 96 sectores industriales. La variable dependiente es la participación en costes y las independientes son los precios, inputs, output agregado, inputs fijos dummies por sector y región. Sólo posee dos modos e incluye el trabajo entre los inputs variables.

El Estudio Bianco et al. (1995) en Italia, construye un modelo econométrico a través de una función de costes *traslog* con datos de sección cruzada, en el que, para cada producto, por región, hay un número diferente de observaciones. La variable dependiente es la participación en costes, mientras que las independientes, son el precio, el output agregado y la distancia. El modelo posee dos modos y se transforman los datos para evitar problemas de concavidad.

Los modelos desagregados se caracterizan por utilizar básicamente los modelos de elección discreta para su elección econométrica. Tal parece ser el caso de la demanda de transporte de pasajeros, donde, por ejemplo, ante un cambio en la tarifa de un modo de transporte no se suele decidir utilizarlo menos; el modo habitual de transporte, o bien se mantiene, o bien se modifica. Dentro de los modelos de carácter desagregado, destacan los dos siguientes:

El trabajo Jiang et al. (1999) en Francia, que construye un modelo econométrico de Logit anidado con datos de Sección Cruzada procedentes de 3.473 observaciones. La variable dependiente es el modo de transporte, y las variables independientes son las características del operador, las tarifas y la distancia.

El Estudio Abdehwahab y Sargious (1992) en EEUU, que construye un modelo econométrico de regresión alternante y selección endógena, con datos de sección cruzada procedentes de 1.003 observaciones de la Encuesta Oficial de Transportes de EEUU. La variable dependiente es el modo de transporte y las independientes las tarifas, el tiempo de viaje y el número de viajeros transportados. El estudio incluye dos modos de estimación según Lee y Trost (1978).

3. DATOS DE PARTIDA Y SU TRATAMIENTO

3.1 Observaciones de la realidad

Se parte de un conjunto de datos correspondientes a la percepción media en 2008 en cada una de las 500 rutas “origen-destino” de largo recorrido de Renfe, servidas indistintamente por trenes de alta velocidad y de velocidad convencional.

Además, se parte de las percepciones medias en trenes regionales Avant y en un servicio de Cercanías genérico.

Los datos se refieren al año 2008, en el que, aunque ya había comenzado la crisis económica, ésta no se había reflejado aún significativamente en un descenso de los precios en el transporte.

3.2 Depuración de los datos

Sobre las 500 rutas “origen-destino” de larga distancia se descartan aquellas en las que no existen datos completos de las mismas, (*Tarragona a Pamplona, León a Vigo, Barcelona a Sarriá o Linares, Baeza a Almería*, entre otras).

Seguidamente, se eliminan aquellas rutas en las que la distancia media recorrida por el viajero es inferior a 200 kilómetros, ya que no se consideran rutas de larga distancia, y en ellas el precio aplicado en estos trenes puede ser disuasorio para evitar el uso de este tipo de trenes. Entre estas rutas se encuentran, por ejemplo., *Salamanca a Valladolid* (115 km), *Gijón a León* (161 km) o *Murcia a Albacete* (182 km), entre otras.

En tercer lugar, se eliminan las rutas que corresponden a recorridos internacionales, por ejemplo *Narbonne a Perpignan, Valladolid a París*, o *Barcelona a Berna*, entre otras.

En cuarto lugar, se eliminan aquellas rutas en las que la distancia es desproporcionada con respecto a la carretera y el avión, lo cual distorsiona los precios. Entre estas rutas se encuentran

Madrid a Bilbao, Madrid, Albacete a Valencia y Vitoria a León.

Para cubrir rutas de media y corta distancia, se añaden las siete rutas correspondientes a media Distancia Avant, y se incluyen asimismo, los datos correspondientes a la media del producto cercanías, que hemos denominado “cercanías genérico”.

De todo este proceso de depuración resulta un número de 104 observaciones útiles para la siguiente fase.

3.3 Homogeneización de los datos

Las 104 observaciones útiles, sí constituyen datos significativos, pero no son homogéneos, dado que se han considerado conjuntamente rutas que corresponden a trenes con distinto número de clases y existen, asimismo, trenes que ofrecen atenciones al cliente incluidas en el billete y otros trenes que no.

Para homogeneizar dichos datos es necesario seguir los siguientes pasos:

Los ingresos totales de cada ruta, medidos en k€, se minoran por los costes de la atención al cliente a bordo. Los servicios de atención al cliente están al cliente están constituidos por los de vídeo, prensa, parking, “salas Club”, etc.

Los servicios de atención al cliente están constituidos por los de vídeo, prensa, parking, “salas Club”, la prestación Trenhotel, etc.

Sobre este ingreso neto, se aplica un coeficiente homogeneizador del espacio: éste es un indicador del confort asociado a un determinado producto, que varía en cada material. El indicador se calcula como el cociente resultante de dividir las plazas supuestas en clase única entre las plazas totales. Las plazas totales generan valor real resultado de sumar las plazas en turista, en preferente, el club y las de para personas de movilidad reducida. Las plazas supuestas son un valor teórico del máximo de plazas por tipo de tren.

3.4 Relación entre la percepción media homogeneizada y la velocidad media alcanzada

A partir de las 104 observaciones significativas homogeneizadas, se pasa a realizar el estudio de los puntos que constituyen, la relación existente entre la velocidad media del servicio y la percepción media homogeneizada.

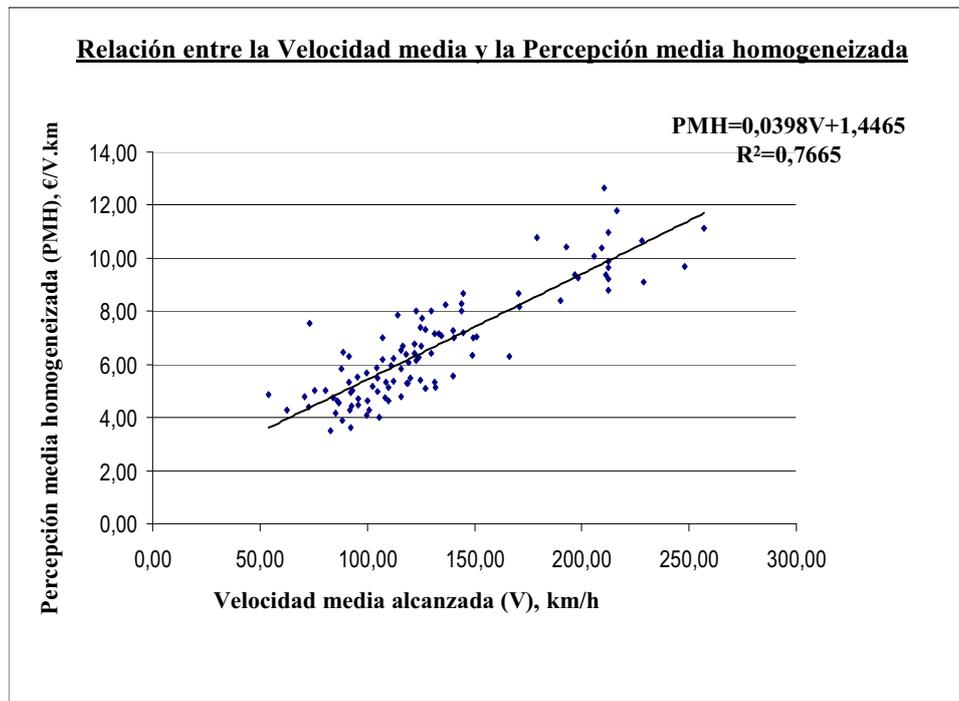


Fig. 3 Relación entre la Percepción media homogeneizada y la Velocidad media
Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en el gráfico superior, la nube de puntos que forman las observaciones, permiten ajustar una línea de correlación, que obtiene un “R²” (0,7665). Por tanto puede afirmarse que existe una relación positiva creciente (con una pendiente de valor 0,0398), entre la velocidad y la percepción media homogeneizada; es decir, que a medida que la velocidad media del tren aumenta, el ingreso neto del operador también aumenta.

En concreto significa que, un aumento de la velocidad, por ejemplo, de 10 km/h, hace aumentar la Percepción media homogeneizada en 0,39 c€/V.km.

4. Relación entre la percepción media homogeneizada y la Distancia media recorrida

Al igual que en el caso de la relación entre la percepción media homogeneizada y la velocidad media, se parte de la gráfica en la que se ajusta una recta de dispersión a la nube de puntos que constituyen las 104 observaciones.

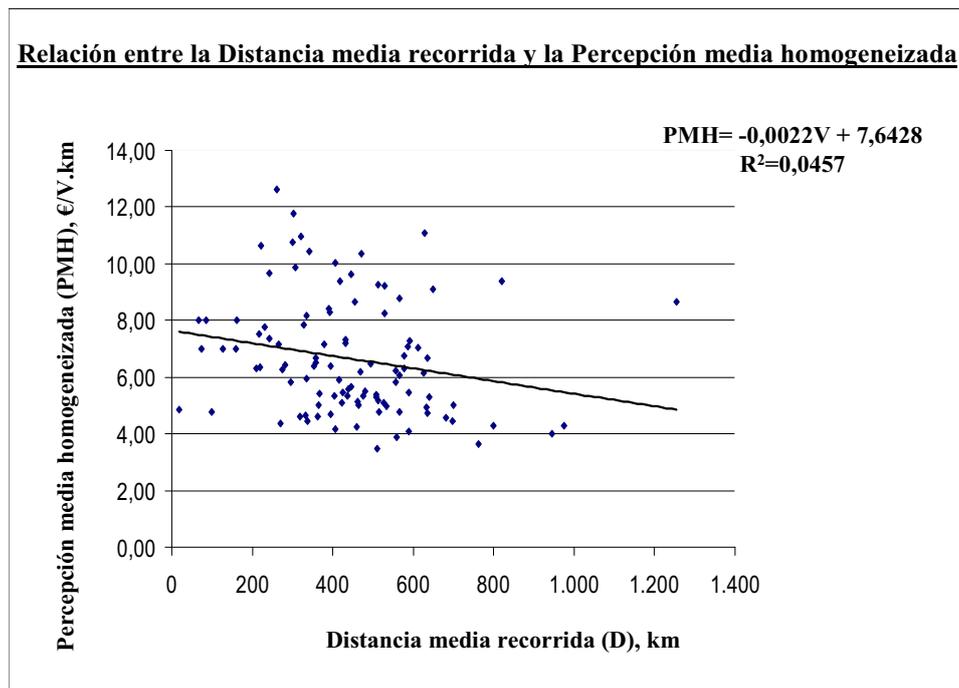


Fig. 4. Relación entre la Percepción media homogeneizada y la Distancia media recorrida
Fuente: Elaboración propia

La Figura 4, muestra la relación entre la percepción media homogeneizada y la distancia media recorrida: sobre la nube de puntos generada por las observaciones, puede ajustarse una recta de regresión, de pendiente negativa. Aunque en apariencia, el ajuste de R^2 no es bueno, sí se observa una cierta tendencia decreciente de la Percepción media homogeneizada conforme aumenta la distancia media recorrida.

La pendiente negativa de la recta quiere decir que, en términos generales, a medida que aumenta la distancia media recorrida, la percepción media homogeneizada desciende; o expresado de otro modo, a medida que la distancia media recorrida es mayor, el ingreso neto del operador es menor.

4.1 Relación simultánea entre Velocidad, Distancia y Percepción media homogeneizada:

En los apartados anteriores se ha realizado de una manera separada el análisis bidimensional de la percepción media homogeneizada con cada una de las dos variables de las que depende, para lo cual se ha empleado gráfica en dos dimensiones. Si se desea hacer el análisis de manera conjunta, habrá que trasladar este planteamiento a las tres dimensiones. De este modo, ya no obtendremos de manera aislada sendas líneas de regresión a una nube de puntos, sino que resultará una superficie que relacione conjuntamente la Percepción media homogeneizada con la Velocidad media alcanzada y la Distancia media recorrida.

Con este objeto, se realiza un modelo econométrico que puede relacionar, de manera conjunta las tres variables. El modelo econométrico es un modelo de sección cruzada, estático y uniecuacional. Se encuadra dentro de los modelos neoclásicos de carácter desagregado.

La función que define al modelo es:

$$E(PMH_t) = \varepsilon + \beta_1 \cdot D_t + \beta_2 \cdot V_t + \beta_3 \cdot D \cdot V$$

4.1.1 Variables del modelo

PMH es la variable, dependiente, que es la Percepción Media Homogeneizada (c€/v.km).

D y V son las variables, independientes o regresores, que son, respectivamente, la distancia media recorrida, y por otra, la velocidad media alcanzada (km/h).

β_k ($k = 0, 1, \dots, K$) son los coeficientes (o parámetros) que determinan la relación entre la velocidad media alcanzada y la distancia media recorrida –que son constantes- y son los que han de ser estimados por el modelo.

ε es el coeficiente independiente de la función que define el modelo.

“u” es la variable que recoge el resto de los efectos presentes en los datos muestrales no recogidos por las variables explicativas del modelo.

“t” representa una observación cualquiera del conjunto de observaciones presentes en la muestra: $t = 1, 2, \dots, 104$.

El modelo aparece dividido en dos partes, que son la parte sistemática y la parte aleatoria, tal que:

$$PMH = \underbrace{\varepsilon + \beta_1 \cdot D + \beta_2 \cdot V + \beta_3 \cdot D \cdot V}_{\text{Parte sistemática}} + \underbrace{u}_{\text{Parte aleatoria}}$$

La relación entre las variables se supone estable, por lo que el modelo en la parte sistemática, se refleja el comportamiento “medio” de la relación. Por otro lado, el modelo se completa con una variable aleatoria que recoge todos los efectos no sistemáticos que sobre la variable explicada se hayan podido producir en las diferentes observaciones muestrales. La caracterización del comportamiento regular, estable o sistemático, se logra a través de la siguiente expresión:

$$E(PMH_t) = \varepsilon + \beta_1 \cdot D_t + \beta_2 \cdot V_t + \beta_3 \cdot D \cdot V$$

La expresión indica la creencia de que la relación es estable “en promedio”, ya que, se supone para la variable u_t una distribución centrada en cero:

$$U_t = 0$$

El método estadístico elegido, es el de mínimos cuadrados.

Se utiliza este método, por sus propiedades teóricas sólidas, que son las siguientes:

Es lineal en los parámetros.

La Velocidad, V, y la Distancia, D, no están correlacionadas con el término de perturbación u. Además, V y D son no estocásticas (es decir, un número fijo en repetidas muestras), este supuesto se cumple automáticamente.

El término de error u tiene un valor medio cero; es decir,

$$E(u_i) = 0$$

La homocedasticidad, es decir, la varianza de u, es constante:

$$\text{var}(u_i) = \sigma^2$$

No existe autocorrelación entre los términos de error u y u:

$$\text{cov}(u_i, u_j) = 0 \quad i \neq j$$

Relación entre el precio básico medio del billete del tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero

No existe colinealidad exacta entre D y V; es decir, no hay una relación lineal exacta entre las dos variables explicativas.

Para la contrastación de hipótesis, el término de error u sigue la distribución normal con media cero y varianza (homocedástica) σ^2 . Es decir,

$$u_i \sim N(0, \sigma^2)$$

El modelo estadístico elegido es, el de Mínimos cuadrados realizado con 104 estimaciones.

El intervalo de confianza para los valores de los coeficientes en el modelo, es del 95 %.

4.4.5.3.2 Fórmula del precio básico medio del billete de tren

A través del método de mínimos cuadrados se llega a la siguiente fórmula:

$$PMH_i = 2,65899173 - 0,00265142 \cdot D_i + 0,03685606 \cdot V_i + 0,000006 \cdot V_i \cdot D_i$$

En cuanto a los resultados del análisis de regresión, tenemos que:

Tabla 1. Resultados del análisis de regresión

Resultados del análisis de regresión				
	Coeficiente independiente, ϵ	Coeficiente de la variable distancia, β_1	Coeficiente de la variable dependiente Velocidad, β_2	Coeficiente conjunto de las variables Distancia y Velocidad, β_3
Valor coeficientes del modelo	2,65899173	-0,00265142	0,03685606	0,000006
Error estándar, se	0,395222	0,000534419	0,0266843	0,00104207
Estadístico "t" o test de contrastación de hipótesis, t	7,54	-5,016	1,159	0,243
Estadístico "p valor", p	0,00001	0,00001	0,248725	0,808487

Fuente: Elaboración propia

Donde:

se es error estándar o desviación típica, definida como

$se(\beta_1) = \sqrt{\text{var}(\beta_1)}$, donde $\text{var}(\beta_1)$ es la varianza del coeficiente independiente, ϵ , que a su vez es:

$$\text{var}(\beta_1) = \frac{\sum V_i^2}{(\sum D_i^2)(\sum V_i^2) - (\sum D_i V_i)^2} \cdot \sigma^2, \text{ con lo que tenemos que:}$$

$$\text{var}(\beta_1) = \text{var}(-0,00265142) = 0,0000002856, \text{ siendo pues}$$

Relación entre el precio básico medio del billete del tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero

$$se(\beta_1) = se(-0,00265142) = 0,000534419$$

$se(\beta_2) = \sqrt{\text{var}(\beta_2)}$, donde $\text{var}(\beta_2)$ es la varianza del coeficiente de la variable independiente *Distancia*, “D”, que a su vez es:

$$\text{var}(\beta_2) = \frac{\sum D_i^2}{(\sum D_i^2)(\sum V_i^2) - (\sum D_i V_i)^2} \cdot \sigma^2, \text{ con lo que tenemos que:}$$

$$\text{var}(\beta_2) = \text{var}(0,03685606) = 0,0007120518, \text{ siendo pues}$$

$$se(\beta_2) = se(0,03685606) = 0,0266843$$

$se(\beta_3) = \sqrt{\text{var}(\beta_3)}$, donde $\text{var}(\beta_3)$ es la varianza del coeficiente de la variable independiente *Velocidad*, “V”, que a su vez es:

$$\text{var}(\beta_3) = \left[\frac{1}{n} + \frac{\overline{D^2} \sum V_i^2 + \overline{V^2} \sum D_i^2 - 2\overline{D}\overline{V} \sum D_i V_i}{\sum D_i^2 \sum V_i^2 - (\sum D_i V_i)^2} \right] \cdot \sigma^2, \text{ con lo que tenemos que:}$$

$$\text{var}(\beta_3) = \text{var}(0,000006) = 0,00000109036, \text{ siendo pues}$$

$$\text{var}(\beta_3) = \text{var}(0,000006) = 0,00104207$$

t es el estadístico o test de significatividad en la contrastación de hipótesis, que se definen como:

$$t = \frac{\beta_1 - B_1}{se(\beta_1)} \sim t_{n-3}, \text{ siendo } B_1 \text{ la hipótesis a contrastar, esto es } H_{0,1} : B_1 = 0 \text{ y } H_{1,1} : 1,$$

es decir, bajo la hipótesis nula, no existe relación entre la Distancia y la Percepción media homogeneizada, mientras que con la hipótesis alternativa, se supone que sí existe esa relación. Esto es:

$$t_1 = \frac{\beta_1 - B_1}{se(\beta_1)} = \frac{-0,00265142 - 0}{0,000534419} = -5,016, \text{ valor más próxima de 1 que de cero en valor}$$

absoluto, con lo que puede rechazarse la hipótesis nula, aceptándose la hipótesis alternativa, es decir, que sí existe relación entre la Distancia, *D*, y la Percepción media homogeneizada por viajero.km, *PMH*.

$$t = \frac{\beta_2 - B_2}{se(\beta_2)}, \text{ siendo } B_2 \text{ la hipótesis a contrastar, esto es } H_{0,2} : B_2 = 0 \text{ y } H_{1,2} : 1, \text{ es}$$

decir, bajo la hipótesis nula, no existe relación entre la Velocidad y la Percepción media homogeneizada, mientras que con la hipótesis alternativa, se supone que sí existe esa relación. Esto es:

$$t_2 = \frac{\beta_2 - B_2}{se(\beta_2)} = \frac{0,03685606 - 0}{0,0266843} = 1,159 \text{ valor más próximo a 1 que a cero, con lo que}$$

puede rechazarse la hipótesis nula, aceptándose la hipótesis alternativa, es decir, que sí existe relación entre la Velocidad, *V*, y la Percepción media homogeneizada por viajero.km, *PMH*.

$t = \frac{\beta_3 - B_3}{se(\beta_3)}$, siendo B_3 la hipótesis a contrastar, esto es $H_{0,3} : B_3 = 0$ y $H_{1,3} : 1$, es

decir, bajo la hipótesis nula, no existe relación conjunta entre la Velocidad y la Distancia con la Percepción media homogeneizada, mientras que con la hipótesis alternativa, se supone que sí existe esa relación. Esto es,

$$t_3 = \frac{\beta_3 - B_3}{se(\beta_3)} = \frac{0,000006 - 0}{0,00104207} = 0,243 \text{ valor superior a cero. Puede estimarse rechazar la}$$

hipótesis nula, aceptándose la hipótesis alternativa, es decir, que sí existe relación conjunta entre la Velocidad, V , y la Distancia, D , con la Percepción media homogeneizada por viajero.km, PMH .

El estadístico “p valor”, es el nivel exacto de significatividad del estadístico de prueba, que se puede definir como el menor nivel de significatividad al que se puede rechazar una hipótesis nula.

Bondad del ajuste: Coeficiente de determinación múltiple R^2

El coeficiente de determinación múltiple, R^2 , muestra la proporción o porcentaje de la variación total de la variable dependiente PMH , explicada por dos variables aleatorias D y V conjuntamente.

El Coeficiente de determinación múltiple, R^2 , se define del siguiente modo:

$$R^2 = \frac{b_2 \sum D_t V_{2t} + b_3 \sum D_t V_{3t}}{\sum D_t^2}$$

En nuestro caso, el Coeficiente de determinación múltiple, R^2 tiene el siguiente valor:

$$R^2 = 0,8002818$$

El valor del coeficiente de determinación múltiple, R^2 al ser próximo a 1, puede reputarse como un coeficiente consistente, siendo el análisis multivariante de la función del modelo, realizado mediante mínimos cuadrados, ajustados y consistentes también.

4.2 Deshomogeneización de los precios del caso

El modelo permite, dada una ruta “origen-destino”, a partir de una Velocidad media y una Distancia media, calcular su Percepción media homogeneizada, pero ese dato calculado sólo tiene valor como un ingreso neto. Para que tenga valor de precio medio del billete de tren por ruta es necesario hacer una deshomogeneización de los precios, tal que:

$$\text{Ingresos Totales} = (\text{Percepción Media Homogeneizada} \cdot \text{Viajeros} \cdot \text{km} \cdot \text{CME}) + \left(\text{Viajeros} \cdot \text{km} \cdot \left(\frac{\text{Coste servicio}}{V \cdot k^3} \right) \right)$$

5. CONCLUSIONES

1. La estimación de los precios medios esperables en el transporte medio de viajeros es un instrumento que permite, por un lado, facilitar la planificación económica de servicios y líneas, y por otro, conocer cuáles son las variables que más inciden en ese precio medio.
2. Se parte de la hipótesis de que las variables que más inciden en el precio medio del transporte son la Distancia media recorrida y la Velocidad media alcanzada.
3. El indicador de los precios medios que se utiliza para homogeneizar la pléyade de tipos de trenes, rutas, clases y servicios, será el de la Percepción media homogeneizada por viajero.kilómetro, ya que relaciona de manera objetiva, los ingresos netos del operador entre los viajeros.km.
4. Para la realización del estudio se llega, mediante una serie de depuraciones previas, a un conjunto muestral de 104 observaciones, que cumplen unas características de consistencia y homogeneidad.
5. Puede apreciarse que existe una relación positiva entre la Velocidad media alcanzada y la Percepción media homogeneizada, es decir, que ésta última es creciente a medida que la velocidad aumenta.
6. Se aprecia también, que existe una relación negativa o inversa entre la Distancia media recorrida y la Percepción media homogeneizada, es decir, que ésta última disminuye a medida que aumenta la distancia de la ruta considerada aumenta.
7. Se obtiene una función que relaciona la Percepción media homogeneizada de manera conjunta con la Velocidad media alcanzada y con la Distancia media recorrida. Esta función es la siguiente:

$$PMH_i(c\text{€} / v.km) = 2,658 - 0,002651 \cdot D_i(km) + 0,03685 \cdot V_i(km/h) + 0,000006 \cdot V_i \cdot D_i$$

8. Se obtienen, asimismo una serie de estadísticos de contraste de hipótesis, que permiten aseverar la consistencia de la función obtenida, y por lo tanto, tanto su calidad como modelo, es decir, su capacidad simplificadora y explicativa de la situación tarifaria en el tren español actual, como su capacidad predictiva futura, sin perjuicio de la modificación de alguna hipótesis de partida, c.p. (con los subsiguientes ajustes del modelo).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Begoña Vitoriano Villanueva y a M^a Pilar Martín Cañizares su ayuda prestada en el presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.D.(1974). *Análisis Matemático para Economistas*. Biblioteca de Ciencias Sociales, Aguilar.
- ANAS, A. (1983). Discrete Choice Theory, Information Theory and the Multinomial Logit and Gravity Models. *Transportation Research part B: Methodological* (vol. 17). pp.13-23.
- BEN-AKIVA, M. y LERMAN, L.R. (1985). *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press, Cambridge.
- CANTILLO, V. y ORTÚZAR, J.D.D. (2005). A Semi-Compensatory Discrete Choice Model with Explicit Attribute Thresholds of Perception. *Transportation Research part B: Methodological* (vol. 39). pp. 641-657.
- DALY, A. (1987). Estimating “Tree” Logit Models. *Transportation Research part B: Methodological* (vol. 21). pp. 251-267.
- FRIEDMAN, M. (1966). *Teoría de los Precios*. Alianza Editorial, Madrid.
- GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2006). Explotación Económica y Regulación del Transporte de Viajeros por Ferrocarriles el Nuevo Escenario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid. pp. (470 y 471).
- GAUDRY, M.J.I. (1981). The Inverse Power Transformation Logit and Dogit Mode Choice Models. *Transportation Research part B: Methodological* (vol. 15). pp. 97-103.
- GONZÁLEZ SAVIGNAT, M. (2001). *Preferencias Declaradas con Diseño de Experimentos: una Aplicación al Tren de Alta Velocidad*. Tesis Doctoral. Departamento de fundamentos del análisis económico e historia e instituciones económicas. Universidad de Vigo.
- GREENE, W.H. (2000). *Econometric Analysis*, 4th edition. Prentice Hall Inc. (London).
- MANDEL, B., GAUDRY, M. y ROTHENGATTER, W. (1997). A Disaggregate Box-Cox Logit Mode Choice Model Of Intercity Passenger Travel in Germany and its Implications for High Speed Rail Demand Forecast. *The Annals of Regional Science* (vol. 31). pp. 99-120.
- MARTÍN, J.C., GUTIÉRREZ, J. y ROMÁN, C. (2004). Data Envelopment Analisis (DEA) Index to Measure the Accesibility Impacts of New Infraestructura Investments: The Case of the High Speed Train Corridor Madrid-Barcelona-French Border. *Regional Studies* 38 (6). pp. 697-712.
- McFADDEN, D. (1974). The Measurement of Urban Travel Demand. *Journal of Public Economics* (vol. 3). pp. 303-328.
- McFADDEN, D. (1981). Econometric Models of Probabilistic Choice. En MANSKI, C. y McFADDEN, D. (eds.) *Structural Analysis of Discrete Choice Data with Econometric Applications*, MIT Press, Cambridge.
- SAMUELSON, P.A. (1971). *Foundations of Economic Analysis*. Harvard University Press. Traducido en Ed. El Ateneo, Buenos Aires.
- STIGLER, G.J. (1968). *Teoría de los precios*. Ed. Revista de Derecho Privado, Madrid.
- VARIAN, H. (1982). The Nonparametric Approach to Demand Análisis. *Econometrica*.

Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Luis Arranz Peña

Investigador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Este documento corresponde a la ponencia presentada en el IX Congreso de Ingeniería Ferroviaria "CIT 2010", celebrado en Madrid, en julio de 2010. Se basa en el trabajo de un grupo creado dentro del marco del proyecto de investigación Unichanger para la definición de las condiciones funcionales de la explotación de los cambiadores de ancho de nueva generación

Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Luis Arranz Peña

Investigador, Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

En este artículo se presentan los criterios sobre la definición funcional y las condiciones de explotación de los cambiadores españoles de ancho de vía automáticos de cuarta generación.

Se incluye una breve retrospectiva histórica de la evolución de los cambiadores de ancho de vía en España y a nivel mundial, su implicación en el transporte de viajeros, así como las características de las nuevas generaciones de cambiadores.

Se analiza la evolución de los cambiadores, desde el punto de vista de las infraestructuras, atendiendo a las necesidades de explotación y a las tecnologías disponibles.

En cada generación, se estudian las necesidades funcionales, en las instalaciones de cambio de ancho atendiendo al tipo de trenes, su longitud, etc.

Aborda las implicaciones de las actuales instalaciones y futuras objeto del estudio en lo referente a: dimensiones y entorno; plataformas, foso, vía en placa y foso de descongelación; planta de vía; perfil de vía; culatones y desvíos; electrificación; señalización; nave y edificio o contenedores auxiliares; funcionamiento de los sistemas del cambiador...etc.

Este estudio está desarrollado por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación “Unichanger”¹.

1. INTRODUCCIÓN, OBJETO Y METODOLOGÍA

1.1 Objeto

El presente estudio pretende establecer los criterios necesarios para definir las “características funcionales” y “condiciones de explotación” (diseño de vía y aparatos,

¹ “El Proyecto Unichanger: Desarrollo de cambiador universal y estrategias de compatibilización y migración en la red ferroviaria española, estudia la viabilidad de una red en la que puedan coexistir distintos anchos de vía, distintas tensiones de electrificación, etc. Se persigue la optimización del uso del ferrocarril así como propiciar el trasvase modal. Cuenta con una ayuda económica del Ministerio de Fomento en el marco del Programa Nacional de Cooperación público-privada, Subprograma de proyectos relativos a transporte e infraestructuras, dentro de la línea instrumental de articulación e internalización del sistema, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2008-2011. Número de proyecto P-45/08”.

instalaciones, comunicaciones, energía, etc.) de los cambiadores automáticos de ancho vía de cuarta generación.

2. ESTADO DEL ARTE

El estudio toma como punto de partida los documentos siguientes:

En primer lugar toma como referencia el documento, para los cambiadores de tercera generación, de la Dirección de Explotación del GIF “Criterios técnicos y normas de explotación. Definición funcional de las instalaciones de cambio de ancho para trenes de viajeros en las nuevas líneas de Alta Velocidad”, mayo 2003. Depósito Legal: M-29268-2003, ISBN: 84-933285-1-0.

Por otra parte, el posterior documento inédito de TIFSA “Informe de situación de los cambiadores de ancho” Edición-2007, en el que se amplían y matizan las ideas del documento anterior y se incluyen las distintas modificaciones que se han ido incorporando, así como una relación pormenorizada de todos los cambiadores existentes al momento de su redacción.

Tiene en cuenta para el estudio las opiniones del documento de la Dirección de Explotación Gerencia de Sistemas y Desarrollo A.V. del ADIF (abril 2007) “Cambiadores de ancho en las líneas de alta velocidad”

Como retrospectiva toma este estudio los detalles sobre generaciones anteriores de cambiadores el Libro “Cambio automático de ancho de vía de los trenes España”, Alberto García Álvarez ed.: FFE-2009 ISBN: 978-84-89649-55-2, Dto. Legal: M-26703-2009.

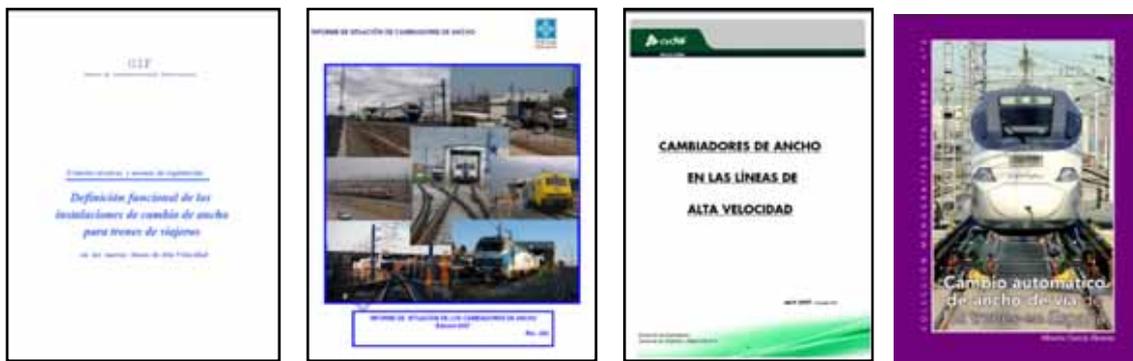


Fig. 1. De izq. a deha.: portada “Criterios técnicos y normas de explotación. Definición funcional de las instalaciones de cambio de ancho para trenes de viajeros en las nuevas líneas de Alta Velocidad”, portada “Informe situación de los cambiadores de ancho”, portada “Cambiadores de ancho en las líneas de alta velocidad”, portada “Cambio automático de ancho de vía de los trenes España”

2.1 Concepto

El ancho de vía característico de la red ferroviaria española es de 1.668 mm, diferente del ancho de vía normal o estándar de la mayor parte de la red ferroviaria europea y mundial, que es de 1.435 mm, incluyendo la red de alta velocidad española.

Se han dado diferentes soluciones a las “fronteras” que se generan por el cambio de ancho: El transbordo de viajeros, de mercancías o el cambio de vehículo, el empleo vías de tres o de cuatro carriles, o la aplicación de sistemas que permiten a los trenes(algunos de sus vehículos), cambiar el ancho de vía: intercambio de los bogies completos; intercambio de

Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros

ejes de los vagones o coches; y finalmente, el cambio automático de ancho de vía, variando únicamente la distancia entre las ruedas, aplicado en España desde 1969.

Se define *Cambiador de ancho* (en un sentido amplio) como una instalación (que es a su vez una Dependencia de circulación) destinada a hacer posible el cambio de ancho de vía y de tensión de alimentación eléctrica y señalización de ciertos trenes de viajeros.

Esta Dependencia está limitada por los piquetes físicos de los desvíos de acceso a las vías generales de cada ancho.

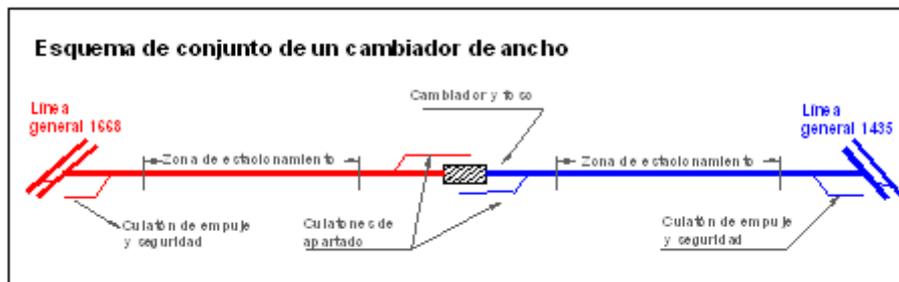


Fig. 2. Esquema de conjunto de un cambiador de ancho de vía.

Fuente: "Informe de situación de los cambiadores de ancho" Tifsa, Edición-2007

En el caso más general, un cambiador comprende: culatones, desvíos, zonas de estacionamiento del tren, tramo de vía de la instalación de cambiador ancho (en sentido estricto), fosos, plataformas, mecanismo de abatimiento de plataformas, nave, edificios auxiliares con sus instalaciones (agua de lubricación, gasóleo, grupo electrógeno, calderas de calefacción, etc.), instalaciones de electrificación y de señalización y comunicaciones, acometidas de energía, instalaciones de arrastre de los trenes (si procede) e instalaciones para el uso del personal.

En este estudio se determinan cuáles son, las características funcionales de un cambiador nuevo, en el momento de diseño del mismo. En el caso de los cambiadores existentes, proyectados o ya construidos de generaciones anteriores, puede ser necesario incorporar determinadas actuaciones para adecuarlos a las necesidades descritas en el presente estudio, lo que deberá ser definido caso por caso.

Como "características funcionales" y "condiciones de explotación" se entienden las siguientes cuestiones:

- Topología y características físicas y geométricas de la vía y aparatos de vía en la zona del cambiador.
- Electrificación del cambiador (posición de los postes, tensión de electrificación en cada uno de los tramos, zonas neutras, etc.).
- Instalaciones de seguridad en el tramo y tramos colaterales (ASFA, ERTMS2, ERTMS1, puntos de comienzo-final, balizas, señales, calzos, toperas, cartelones, etc.).
- Telemando del cambiador y relación del mismo con la señalización de las líneas afluentes.
- Instalaciones de comunicaciones fijas y móviles en el cambiador y su entorno.
- Sistemas de arrastre del tren, en su caso.
- Perfil óptimo de vía en el entorno del cambiador para minimizar los tiempos de paso y los costes de operación del cambiador.
- Características de la nave y del edificio auxiliar.
- Instalaciones complementarias de protección contra riesgos seguridad y salud laboral.
- Urbanización y acabados generales del complejo.

- En las “características funcionales” y “condiciones de explotación “no se abordan:
- Características físicas de la instalación del cambio.
- Acometidas de suministro de energía eléctrica, agua y gasóleo al cambiador, tanto para su funcionamiento como para auxilio de los trenes.

2.2 Utilidad de los cambiadores

Las nuevas líneas de alta velocidad españolas y portuguesas se están construyendo y proyectando con vía de ancho 1.435 mm, pero por ellas deberán circular trenes que luego continúen por las líneas de ancho 1.668 mm el de las líneas convencionales.

Esto será así, tanto en los períodos transitorios en los cuales las nuevas líneas sólo hayan llegado hasta puntos intermedios de su recorrido total (por ejemplo Madrid-Lleida de la línea Madrid-Barcelona), en cuyo caso los trenes recorrerán un tramo por la línea de Alta Velocidad (de ancho de 1.435 mm) y otro por la línea clásica (de ancho 1.668 mm); como incluso utilizarse las líneas clásicas como antenas de la línea de Alta Velocidad (por ejemplo Madrid-Pamplona, circulando hasta Plasencia de Jalón por la línea de Alta Velocidad, y de Plasencia a Pamplona por la línea convencional).

El cambio de ancho de vía de los trenes, se realiza en los cambiadores de ancho para trenes de viajeros.

Hasta la introducción de la vía de ancho 1.435 mm en la red española existían diversas instalaciones de este tipo en las fronteras de Irún-Hendaya (desde 1968) y de Portbou-Cerbere (1974) entre España y Francia, que utilizan los coches de los trenes Talgo que atienden respectivamente las relaciones de Madrid a París y de Barcelona a París, Milán y Zurich. También, hay cambiadores en los talleres Talgo de Las Matas y Sant Andreu (en Barcelona.)

Tras inaugurarse la nueva línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla, se instalaron también cambiadores de ancho en Madrid-Puerta de Atocha (1992), Córdoba (1992) y Majarabique (Sevilla) (1993), para permitir la circulación de trenes Barcelona - Madrid – Sevilla, Madrid – Córdoba – Málaga – Algeciras y Madrid - Majarabique – Cádiz / Huelva. Hasta el año 2001 todos los cambiadores instalados son de la tecnología Talgo, puesto que solamente esta empresa española fabricaba coches con cambio de ancho de este tipo, denominado RD (Rodadura Desplazable).

Los cambiadores de ancho, por lo tanto, eran equipos fijos situados sobre un foso al que iban anclados permanentemente.

El paso de un tren Talgo RD por un cambiador de este tipo evita el trasbordo de viajeros y se realiza en un tiempo relativamente reducido, pero conlleva la servidumbre del cambio de locomotora. Por ello, al tiempo necesario para la operación de cambio de ancho de los coches (que no es muy importante ya que se realiza en marcha pasando a unos 10 km/h por el cambiador) hay que añadir el tiempo necesario para el cambio de locomotora y la realización del desenganche de la locomotora que llegó con el tren, enganche de la nueva locomotora y las pruebas de frenado correspondientes.

Desde 2002 existen trenes autopropulsados que hacen que no sea necesario el cambio de máquina.

2.3 Antecedente inmediato: la tercera generación de cambiadores

Todos los aspectos expuestos llevaron (hacia el año 2002) a desarrollar una tercera generación de cambiadores de ancho para trenes de viajeros cuya descripción funcional fue objeto del documento de la Dirección de Explotación del GIF citado anteriormente. En el caso más general, habían de permitir lo siguiente:

- Paso de trenes de tecnología Talgo y CAF. En ambos casos, remolcados por locomotora (que puede cambiar o no al ancho) o trenes autopropulsados.
- Hacer posible el cambio de la tensión de electrificación y de los sistemas de señalización.
- Ensamblarse con los sistemas de comunicaciones, gestión y telemando de las líneas en que se instalan.
- Disponer de los sistemas de seguridad necesarios para los nuevos mecanismos de movimiento del cambiador.
- Reducir los costes de explotación y la servidumbre respecto del factor humano, al poder telemandarse con seguridad las instalaciones.
- Ser fácilmente trasladables a otra ubicación en función de las necesidades de explotación y de la evolución de la infraestructura, y en concreto, del cambio de ancho de vía de las líneas.

Este tipo de cambiadores tiene la ventaja de que (con la excepción del foso y la nave), pueden ser trasladables de un lugar a otro en función del avance del cambio de ancho de las líneas. De esta manera, el cambiador pasa de ser un elemento fijo de la infraestructura a ser un elemento mueble que puede trasladarse conforme sea necesario.

2.4 Hacia la cuarta generación de cambiadores

A lo largo de la primera década del siglo XXI la experiencia de la explotación de los cambiadores de tercera generación sugirió algunas mejoras, y por otra parte se ha visto la conveniencia de prever la compatibilidad con otros sistemas extranjeros de cambio de ancho existentes, alemanes y polacos; así como prever también la posibilidad de pasar por estas instalaciones trenes de mercancías como incluir la posibilidad de realizar en estos el “cambio Ruso” (De 1.435 mm a 1.520 mm y viceversa)

Todo esto hace que nazca una “cuarta generación de cambiadores”, cuya definición funcional y condiciones de explotación son objeto del presente estudio.

En síntesis, los tipos de cambiadores y generaciones existentes y previstas son los recopilados en la siguiente tabla:

Tabla. 1. Resumen de generaciones de cambiadores

GENERACIÓN	AÑOS DE IMPLANTACIÓN	CAMBIADOR	TRENES
1^a	(1969-1974)	Talgo en Foso	<i>Trenes viajeros remolcados pasando por frontera</i>
2^a	(1992-2000)	Talgo en Foso	<i>Trenes viajeros remolcado líneas de alta velocidad</i>
3^a	(2000-2009)	TCRS1 y TCRS2	<i>Trenes viajeros remolcados y autopropulsados CAF y Talgo</i>
4^a	(2010-)	TCRS3	<i>Trenes viajeros y mercancías tráfico ibérico</i>
		TCRS4	<i>Trenes viajeros y mercancías todos los tráfico</i>
<i>En el futuro se instalarán el TCRS3 y TCRS4 (cambiadores de 4^a generación) en cada lugar en función de las necesidades. (“Elaboración propia”).</i>			

3. DATOS DE PARTIDA

3.1 Identificación de necesidades funcionales de los cambiadores de cuarta generación

Aún teniendo unos principios tecnológicos comunes, cada cambiador es distinto e incluso puede evolucionar de forma diferente sus necesidades en el tiempo.

Por esto es necesario identificar cada una de las necesidades en cada localización. Se puede destacar la importancia de definir funcionalmente las necesidades presentes y futuras desde el punto de vista de los trenes y las posibles limitaciones de la infraestructura.

El estudio ha definido como temas a identificar para cada instalación concreta los siguientes capítulos:

- Ancho de vía en cada lado
- Tecnología y arquitectura de los trenes que deben poder pasar
- Condiciones físicas del entorno
- Topología del entorno del cambiador
- Dimensiones y entorno
- Planta y perfil de vía
- Electrificación
- Comunicaciones
- Señalización y enclavamientos
- Instalaciones auxiliares

3.2 Características generales de los nuevos cambiadores

Se han descrito los cambiadores de anteriores generaciones así como sus necesidades funcionales, con carácter previo abordar la definición funcional y condiciones de explotación de los cambiadores de cuarta generación. Finalmente, como conclusión, los cambiadores de ancho de vía de cuarta generación (TRCR3 y TCRS4), adoptaran los criterios generales siguientes:

1. Los nuevos cambiadores posibilitan el cambio de ancho de vía, no sólo de 1.435 mm a 1.668 mm y viceversa, sino también de 1.520 mm a 1.435 mm y viceversa. En cada instalación de cambio de ancho, únicamente se realizaría el cambio entre dos anchos (1.435 -1.668 mm ó 1.520-1.435 mm). Se supone que cada tren con cambio de ancho, solo puede cambiar entre dos anchos predeterminados.
2. Se incorpora la posibilidad de cambio de ancho para las tecnologías de Rafil/DB y SUW 2000 (TCRS4) además de la de Talgo y CAF.
3. En cada localización se dispondrá de un cambiador polivalente para las distintas tecnologías necesarias en cada circunstancia y particularidad de la red. Esto es necesario, tanto por el ahorro de espacios, como para prever la posibilidad de que un mismo tren lleve vehículos de diversas tecnologías. En el caso de que sea posible o conveniente la instalación de varios cambiadores, se considera mejor instalar varios cambiadores polivalentes que colocar uno de cada una de las

tecnologías. En el caso de vía doble, es preferible instalar dos cambiadores polivalentes en lugar de hacer converger las dos vías hacia una, ya que se ofrece una mayor capacidad y su coste es menor.

4. Para pasar de una a otra tecnología, en los cambiadores, se desplazan automáticamente elementos o piezas en lugar de plataformas completas (Talgo-CAF, CAF -Rafil, Rafil-Talgo, etc.).
5. Los cambiadores serían aptos para trenes de viajeros y de mercancías, aunque lógicamente con distintas topologías de vías e instalaciones, adecuadas a cada caso.
6. Se prevé que los trenes diurnos de viajeros serán autopropulsados, y que los trenes de mercancías y trenes nocturnos serán remolcados por locomotora que no cambia de ancho, pero que sí empuja el tren para el paso por el cambiador, o bien se emplea una locomotora auxiliar para empujar el tren al paso, pero en principio no pasa por gravedad ni por arrastre. Para el caso de locomotoras con ejes de ancho variable se consideran como si en la práctica fuera un tren autopropulsado. El cambiador se optimiza para los trenes autopropulsados, realizándose las necesarias actuaciones para los trenes con locomotora de ancho fijo.
7. Se prevé la posibilidad de la desaparición la relación biunívoca entre tensión y ancho de vía ($1.435 \text{ mm} = 25 \text{ kV}$ y $1.668 \text{ mm} = 3 \text{ KV}$) propia los trenes actuales.
8. Es recomendable, y se facilitará en lo posible, que las transiciones del puesto de mando, enclavamiento, reglamentación, electrificación y comunicaciones del tren no se realicen en las instalaciones propias del cambiador de ancho de vía, sino en otros puntos próximos.

Cada cambiador debe adaptarse a las circunstancias particulares del caso. En concreto, al tipo y número de trenes que vayan a pasar, vocación de permanencia en el tiempo del propio cambiador, espacio disponible, perfil de la línea, características climatológicas de la zona que recorren los trenes antes de llegar al cambiador, etc.

3.3 Estudio de las condiciones físicas del entorno

3.3.1 Topología del entorno del cambiador

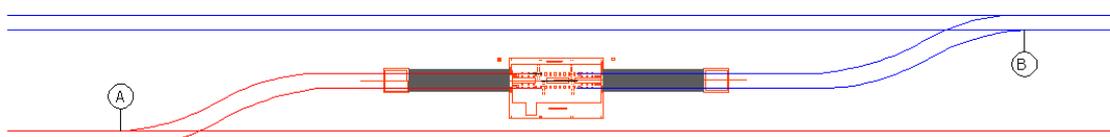
Los futuros cambiadores están condicionados desde su concepción, por la topología de las líneas del entorno en el que se pretende instalar, pudiéndose dar los siguientes casos:

Instalación entre desvíos de dos líneas diferentes paralelas

1C- Con culatones/vías Auxiliares

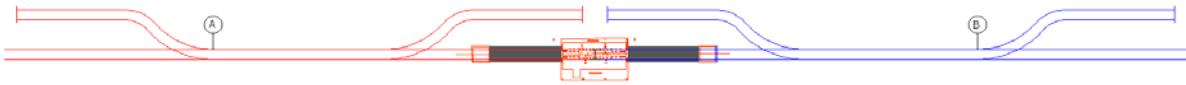


1S-Sin culatones

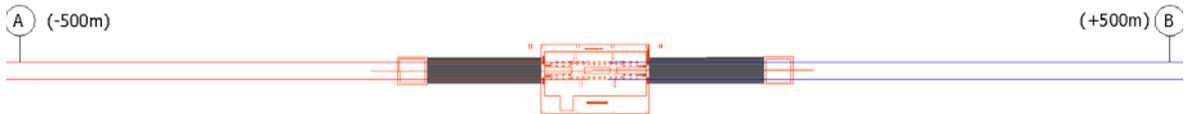


Instalaciones en la misma línea

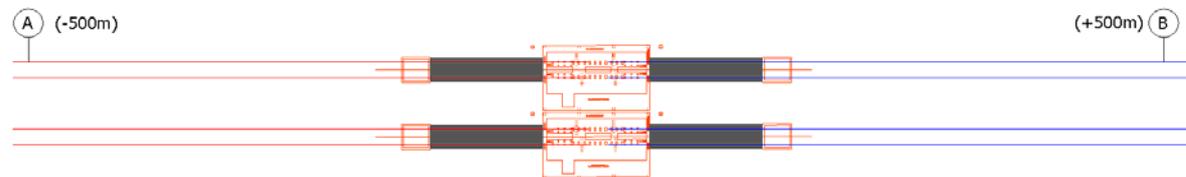
2C-Con culatones/vías Auxiliares



2S-Sin culatones

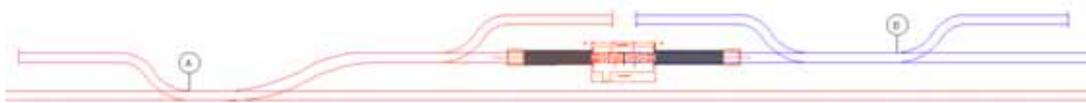


2S1-Sin culatones doble



Instalaciones en vía líneas convergentes en la zona del cambiador

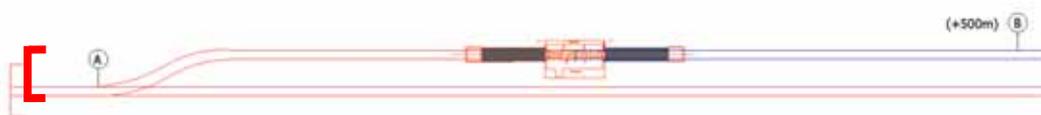
3C-Con culatones/vías Auxiliares



3S-Sin culatones



3S1-Sin culatones un único sentido de marcha



3.3.1 Dimensiones y entorno

A efectos de la descripción de la planta y perfil de la vía en la zona del cambiador consideraremos el eje X como el eje de la vía paralelo a la misma que pasa por el cambiador; y el origen de coordenadas se sitúa en el centro de la instalación de cambio de ancho. Las cotas para el TCRS3 y TCRS4 serán expresadas con el subíndice correspondiente X₃ y X₄. Las cotas se expresan en metros.

Plataforma y Foso TCRS3

La instalación de cambio de ancho TCRS3 estará compuesta una plataforma de 16 metros de longitud (que se extenderá desde $-8 < X_3 < +8$). Esta plataforma se dispondrá sobre un foso de 16 metros de longitud interior (17 metros de longitud exterior) que se extenderá desde $-8,5 < X_3 < +8,5$. El foso será, por tanto, de la misma longitud que los actuales cambiadores TRCS2.

El foso del cambiador TCRS3 tendrá una anchura de 6 metros, existiendo la posibilidad de ser optimizado en los casos necesidad hasta 4 metros interiores.

Plataforma y Foso TCRS4

En el caso del cambiador de ancho de vía TCRS4, el foso será de 30 metros de longitud interior (31 metros de longitud exterior), se extenderá desde $(-15,5 < X_4 < +15,5)$. El foso del cambiador TCRS4 tendrá una anchura de 5 metros.

Los fosos deberán estar diseñados de tal forma que permitan el paso de manera segura de los operarios y presentaran una correcta evacuación mediante pasillos y túneles de acceso.

El fondo de los fosos deberá tener una pendiente mínima del 1% para el flujo del agua a un canal central para recogida de aguas sobre el que se colocará una rejilla metálica. Este canal se ve interrumpido en dos zonas especialmente reforzadas que coinciden con los zapatas de apoyo de la estructura metálica. Para facilitar el paso de cables y conducciones se habilitará el paso de tuberías por los muros.

Nave de cubierta

Ante la necesidad de cubrir el TCRS3 y TCRS4, se recomienda extender a cada lado del foso del cambiador una nave de al menos 2 metros a partir de la finalización del foso, siendo el valor deseable de longitud de ésta $(-10,5 < X_3 < +10,5)$ para el TCRS3 y de $(-17 < X_4 < +17)$ en el caso del TCRS4. Esto dará una correcta protección de los elementos mecánicos.

Vía en placa y juntas de dilatación

A cada lado del foso y desde el final de este, se construyen un mínimo de 5 metros de vía en placa $(-13,5 < X_3 < -8,5$ y $+8,5 < X_3 < +13,5)$ en el TCRS3 y $(-20 < X_4 < -15$ y $+15 < X_4 < +20)$ para el TCRS4.

Con este tramo en placa antes de entrar a cambiador pretende:

- Reducir la dilatación del carril, lo que es imprescindible, dado que necesariamente debe existir una discontinuidad.
- Lograr la permanente nivelación y alineación de la vía para no tener que batearla periódicamente la entrada y la salida del cambiador.
- Por último permitir que el tren entre bien posicionado, “centrado”, a la entrada del cambiador.
- En presencia de contracarriles este se verá extendido hasta los valores que sean necesarios.(ver caso con contracarriles)

Foso descongelación (en su caso)

Si el cambiador requiere foso de descongelación (en uno de los lados o en ambos), se construirá éste a continuando los tramos de vía en placa y con una longitud mínima de 4 metros de forma que permitan la correcta descongelación siendo su posición a una distancia de 18 metros del borde del cambiador $(-28 < X_3 < -24$ y/o $+24 < X_3 < +28)$ en el TCRS3 y $(-35 < X_4 < -31$ y/o $+31 < X_4 < +35)$ para el TCRS4.

Además se observa la conveniencia de disponer de un foso de inspección entre el cambiador y el foso de descongelación.

Al igual que el foso que alberga el cambiador, los fosos deberán estar diseñados de tal forma que permitan el acceso de manera segura de los operarios y presentaran una correcta evacuación mediante pasillos o túneles de acceso.

Si fuese necesario instalar contracarriles para el centrado, esta posición deberá ser revisada.

3.3.1 Planta de vía

Perfil de la zona del cambiador

La declividad de la vía en la zona del cambiador, TCRS3 ($-8,5 < X_3 < +8,5$) y ($-15 < X_4 < +15$) para el TCRS4, se hace aconsejable no superar en ningún caso el límite de cinco milésimas, siendo recomendable planitudes de valor “0 milésimas” en todos sus casos.

Perfil de vía en el entorno del cambiador

El perfil de vía en el entorno del cambiador depende del uso del cambiador.

Así, si las instalaciones se optimizan para el paso de los trenes autopropulsados, se considera conveniente la ausencia de pendientes en las proximidades del cambiador, ya que estas rampas resultan perjudiciales para la maniobra. Además, estos trenes no necesitan de mangos para su operación. El valor máximo se determinará caso por caso.

Por el contrario, los trenes con material remolcado, para facilitar la maniobra de paso por gravedad, se ha demostrado eficaz la declividad favorable por ambos lados hacia el cambiador (“perfil de bañera”), además de facilitar la liberación de determinados piquetes con otros tipos de material en caso de avería.

Para los cambiadores de cuarta generación en los criterios generales de explotación se ha propuesto dar preferencia a los trenes autopropulsados por lo que primeramente se expone este caso.

Perfil de vía para cambiadores optimizados para trenes autopropulsados

Durante la primera fase el tren puede realizar el cambio por inercia. Si éste coincide con el cambio de tensión, el tren no tracciona durante un tiempo, por esto se trata de realizar perfiles lo más horizontales posibles, teniendo como valores deseables menos de 5 milésimas de rampa, aceptando valores máximos excepcionales de hasta 10 milésimas.

Perfil de vía-paso por gravedad (Trenes remolcados)

La declividad se hace aconsejable en el entorno de cinco milésimas. Tratando de conseguir, en todo caso, que el tren se encuentre en una pendiente mínima de entre 3 o 3,5 milésimas para garantizar su arranque y su movimiento. Esta condición debe cumplirse tanto para el tren más corto como para el tren más largo y, en todo caso, en los trenes remolcados por locomotora, debe afectar a la totalidad de su composición.

Los acuerdos verticales deben proyectarse para velocidad de 50 km/h, y por ello se estima que deben tener una longitud aproximada de 20 metros, ya que éste es un mínimo por razones constructivas.

En caso de que en la trayectoria del tren, cuando se mueve por gravedad, haya una curva (o un paso por vía desviada), la pendiente debe aumentarse (en una longitud equivalente a la de la curva) en $800/R$ milésimas (siendo R el radio de la curva, en metros), para compensar con la mayor fuerza gravitatoria la retención que la curva ejerce sobre el tren. (Desvío, que debe estar fuera de la zona que se ha indicado que debe de estar en recta).

Para el TCRS3 en el caso de producirse partir del comienzo del cambiador (por cada lado del mismo) debe haber normalmente como mínimo una longitud de 17 metros en horizontal punto a partir del cual, puede empezar un acuerdo vertical de 20 metros de longitud. Quiere ello decir que a efectos prácticos, la longitud equivalente de vía en horizontal a cada lado del cambiador, y desde el final de ésta es de 27 metros ($-35,5 < X_3 < 35,5$). En casos excepcionales puede reducirse hasta 12 metros hasta los ($-23,5 < X_3 < 23,5$)

Para el TCRS4 no se considera esta posibilidad de paso por gravedad.

3.4 Instalaciones de la línea en el entorno del cambiador

3.4.1 Electrificación

Hasta la fecha, en todos los cambiadores de ancho la tensión de electrificación era de 25 kV CA en un lado del cambiador (el de 1.425 mm) y de 3 kV CC en el otro (el de 1.668 mm).

En el caso de los cambiadores de ancho de vía de primera y segunda generación la catenaria no pasaba a través de éstos, ya que era imprescindible el cambio de locomotora.

En los cambiadores de tercera generación existe catenaria en la zona del cambiador aunque ésta se encuentra aislada eléctricamente y sin tensión. Los trenes autopropulsados pasan con el pantógrafo bajado debido al cambio de tensión, ya que cada tensión requiere un pantógrafo distinto.

En los nuevos cambiadores de cuarta generación puede ocurrir que en ambos lados del cambiador la tensión sea la misma, e incluso que en uno de los dos lados del cambiador la línea esté electrificada, y en el otro no. Ello se puede deber a:

- La existencia de tramos de vía de ancho ibérico a 25kV CA y/o de ancho estándar a 3 kV CC ó 1,5 kV CC.
- En Portugal todas las líneas electrificadas lo están a 25 kV CA, y por ello esta tensión aparece a ambos lados del cambiador.
- La aparición de trenes duales (diésel, eléctricos a 25 kV, eléctricos a 3 kV) abre paso a cambiadores en líneas electrificadas en un lado y sin electrificar en el otro.
- Por último, es posible que en algunos casos resulte ventajoso separar el punto de cambio de tensión del punto de cambio de ancho. Por tanto en estos casos la tensión en ambos lados del cambiador sería la misma.

Los criterios adoptados para la electrificación de los cambiadores de cuarta generación TCRS3 y TCRS4 son los siguientes:

- En el caso de cambiadores con línea sin electrificar en ambos lados, lógicamente la zona del cambiador no estará electrificada.
- En todos los demás casos en la zona del cambiador se instalara catenaria, pero aislada eléctricamente, incluso cuando la tensión de la línea sea la misma en ambos lados.
- En estos casos, si en ambos lados la tensión es distinta, el tren cambiara el pantógrafo, como lo hace en los cambiadores de tercera generación.
- Si la tensión es la misma en ambos lados, el tren pasará normalmente con el pantógrafo levantado pero abriendo el disyuntor, como se hace en las zonas neutras de separación de fase.

De hecho, si la electrificación a ambos lados es alterna monofásica, a la misma tensión, el cambiador puede hacer la función de zona neutra de separación de fases.

Como se ha indicado la catenaria estará aislada eléctricamente y separada:

El cable sustentador puede ir anclado a unos pórticos metálicos a la entrada y a la salida del edificio, situados a más de 1 metro de su fachada. También puede el sustentador, convenientemente aislado, atravesar la nave del cambiador.

El aislamiento eléctrico se conseguirá, en cada lado, mediante dos parejas de aisladores (uno en el hilo de contacto y otro en el sustentador) separadas entre unos 4 metros cada uno. De esa manera evita que la catenaria en la zona de cambiador quede en tensión aunque el tren llegue con dos pantógrafos (conectados eléctricamente entre si) levantados por error:

Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros

En un tren con un solo pantógrafo, dejará de entrar corriente por éste cuando el pantógrafo pase por la primera pareja de aisladores.

En un tren con dos pantógrafos, el primer pantógrafo queda sin paso de corriente al llegar al primer aislador. Sin embargo, el segundo pantógrafo (si ambos están conectados eléctricamente entre sí, lo que no es frecuente) puede estar transmitiendo corriente por dentro del tren al primero, y éste al hilo de contacto ya situado en una zona neutra. Esta corriente se detectaría por medio del aparato situado en esta zona entre aisladores, y entonces el sistema desconecta (en el tiempo de disparo de la subestación). La función de la segunda pareja de aisladores es la protección en este caso. Por ello, la distancia mínima entre dos parejas de aisladores ha de ser tal que el tren (que aquí circulará como máximo a 15 km/h) pase entre ellos en un tiempo mayor que el tiempo de disparo de la subestación. Un valor típico puede ser de 4 metros.

Los trenes autopropulsados que puedan pasar por el cambiador deberán poseer un sistema de control de pantógrafos e interruptores principales que impidan averías por recibir una tensión distinta de la nominal. Por otro lado, deben poder garantizar la circulación por dicho cambiador sin riesgo de quedarse el tren sin alimentación de catenaria; es decir, deben de disponer de dos pantógrafos separados entre sí al menos la longitud de la zona sin tensión, que será típicamente de 42 metros en el caso del TCRS3 y 56 metros en el caso del TCRS4.

La pareja de aisladores (A1) más próxima al cambiador ha de estar a una distancia que cumpla dos condiciones:

Por un lado, debe respetar la distancia de 2 metros a la nave, lo que implica que $X_3 > 25/2 + 2 = 14,5$ metros desde el eje en el caso $X_4 > 39/2 + 2 = 21,5$ m para el TCRS4.

Por otro lado, la segunda pareja de aisladores (A2) ha de estar a una distancia tal que permita a la máquina que remolca el tren poder acercarse hasta el tren. Si el tren ha pasado por gravedad, el tope del tren estará a 18,7 metros del eje del cambiador para el TCRS3 y 25,7 metros para el TCRS4, y como desde el tope de la locomotora hasta el pantógrafo hay 5 metros, el pantógrafo quedará a $18,7 + 5 = 23,7$ metros del eje del cambiador para el TCRS3 y $25,7 + 5 = 30,7$ metros del eje del cambiador para el TCRS4, o mejor a 21,7 y 28,7 metros respectivamente, dejando un pequeño margen de seguridad.

Como entre la primera pareja y la segunda debe haber al menos 4 metros, ello implica que la primera no debe estar a más de 17,7 metros del eje en el caso del TCRS3 y a 24,7 metros para el TCRS4.

Los culatones en los que se apartan las máquinas deberán estar electrificados a la tensión que corresponda según su ancho de vía. En el caso de zonas comunes de dos anchos (con tres o cuatro carriles) se decidirá en cada caso si la zona correspondiente está siempre sin tensión o si debe poder conmutarse según el tren que la utilice, con un sistema de enclavamiento Bouré o similar en que se encuentre alimentada en ese momento. En todo caso, deberá contar con las protecciones adecuadas, y relacionados con calzos y/o señales mecánicas que permitan o impidan el acceso a la vía según la tensión existente.

Puesta a tierra de la corriente eléctrica:

Según establece la norma EN50122-1, cuando la instalación funciona en corriente alterna, todas las estructuras metálicas deben estar conectadas al circuito de retorno del sistema (cable de tierra y carriles de rodadura).

Por el contrario, en corriente continua, y con objeto de minimizar los efectos producidos por las “corrientes vagabundas”, las estructuras metálicas no serán conectadas al circuito de retorno (carriles de rodadura), debiendo ser conectadas directamente a tierra.

La instalación de un cable de sección equivalente que uniera los carriles dará la continuidad necesaria de retorno en el caso de que existiese la necesidad de conectar la tensión de corriente continua.

Separación de la zona de cambio de ancho de la zona de cambio de fase

En ciertos casos, será posible trasladar a un punto diferente del cambiador de ancho en punto de cambio de tensión. Para que ello sea posible es preciso disponer de una zona adecuada, para cumplir función de zona neutra de cambio de tensión, en la que debe haber una longitud de alrededor de un kilómetro las líneas de hasta 160 km/h y de dos kilómetros en líneas de mayores velocidades o puntos de parada habitual, ni rampas de más de 15 %, todo ello a fin de garantizar que el tren puede cambiar de tensión en marcha con seguridad (garantizando asimismo la apertura del disyuntor) y sin pérdida de velocidad.

3.4.1 Comunicaciones

Puesto de mando o Centro de Regulación y Control

El Puesto de mando o Centro de Regulación y Control deberá en la medida de lo posible disponer con suficiente antelación de la visualización del tren antes de éste entre en su sistema.

Desde el punto de vista del enclavamiento, el cambiador debería ser integrado en un único enclavamiento, y la transición entre enclavamientos (a ser posible) debería permitir que entre en el cambiador y el punto de cambio de enclavamiento se pueda estacionar un tren.

Siendo conveniente delimitar las condiciones técnicas que deben presentar los circuitos de vía en el entorno del cambiador de ancho de vía, con el fin de unificar criterios de explotación.

Evitar en la medida de lo posible la problemática de los sistemas de señalización a 50 Hz en el caso de la electrificación de la vía en continua. En el caso de su existencia, prever la presencia de juntas aislantes ó filtros que eviten los conflictos de los sistemas.

Zona de solapamiento de comunicaciones móviles y visualización del puesto de mando

Lógicamente las comunicaciones deberán adaptarse al punto de cambio de enclavamiento y puesto de mando. Si bien se recomienda que exista un solapamiento en las proximidades del cambiador que permita una correcta transición de los puestos de mando.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la participación en el estudio a los integrantes hasta el momento del grupo de trabajo, coordinado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles “Especificaciones funcionales y condiciones de explotación”. Este grupo está integrado por: Ignacio Ribera Sánchez, Juan Miguel Sastre, Sergio López Lara, Francisco Paños Magrané, José Luis López Gómez, Vicente Rallo Guinot, Luis F. Almenara Campo, Félix Bartolomé Alonso, Alicia Ortega Sánchez, José Ignacio Vergara, Lucas Campillo, Jesús Lastra Terradillos, Andreia Gronssiho, Rita Veiga, Elena Soriano Iglesias, Isidoro Herrero Nieto, Valentín Rivera, Iván Nieva Hernando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dirección de Explotación del GIF (2003) .Criterios técnicos y normas de explotación. Definición funcional de las instalaciones de cambio de ancho para trenes de viajeros en las nuevas líneas de Alta Velocidad.

TIFSA (2007). Informe de situación de los cambiadores de ancho.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Cambio automático de ancho de vía de los trenes España.

Dirección de Explotación ADIF Gerencia de Sistemas y Desarrollo A.V. (2007). Cambiadores de ancho en las líneas de alta velocidad.

RENFE. (2007) Manual de operación del tren 130

RENFE. (2007) Manual de operación de los trenes series 120 y 121

Desarrollo de un modelo de regulación optimizado para la apertura del mercados de servicios interurbanos de transporte de viajeros por ferrocarril en España

Alberto Cillero Hernández

Director Técnico-ALSA (División de Transporte interurbano)

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo, España

Este documento corresponde a la ponencia presentada en el IX Congreso de Ingeniería Ferroviaria "CIT 2010", celebrado en Madrid, en julio de 2010. Se basa en el trabajo desarrollado dentro del marco del proyecto de investigación Optired

Desarrollo de un modelo de regulación optimizado para la apertura del mercado de servicios interurbanos de transporte de viajeros por ferrocarril en España

Alberto Cillero Hernández

Director Técnico – ALSA (División de Transporte Interurbano)

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo

RESUMEN

El presente artículo se basa en los trabajos que se encuentran en curso en la actualidad en el marco del Proyecto Optired².

La futura competencia en la gestión de servicios ferroviarios interurbanos de viajeros generará una situación de gran complejidad a diferentes niveles. El proyecto aborda la concreción del modelo desde una óptica multidisciplinar, incluyendo análisis complementarios del marco jurídico, regulatorio, económico y sectorial. En el ámbito de la regulación económica del acceso a la gestión de servicios sobre infraestructuras públicas de transporte, existen evidencias que permiten afirmar que las metodologías basadas en el beneficio social y el excedente del consumidor no son por sí mismas suficientemente válidas para tomar decisiones sobre competencia. Es preciso - entre otras técnicas - aplicar metodologías ligadas al análisis microeconómico (teoría de juegos) que permitan analizar los efectos intramodales e intermodales del escenario definido de competencia en el sistema de transporte en que se encuadra.

Para ello, el Proyecto “Optired” contempla la realización de dos tipos de modelos: una primera fase de modelización de la competencia ferroviaria, y una posterior de modelización de escenarios y valoración multicriterio de resultados.

El resultado será la concreción de una metodología de optimización, novedosa en su concepción y planteamiento, que permita cuantificar diferentes objetivos de política de transportes que pueda tener la Administración Planificadora a la hora de plantear la apertura del mercado. El modelo en que se trabaja actualmente - y su desarrollo en forma de herramienta - contempla, entre otras variables de modelización, aquellas ligadas a: la cuota de mercado (viajeros transportados) del ferrocarril y modos competidores; ingresos; rentabilidad económica de la

² “Optired” Desarrollo del marco regulador para la apertura a la competencia del transporte interurbano de viajeros por ferrocarril en España y evaluación multicriterio de los efectos transversales sobre el sistema intermodal de transportes. Proyecto subvencionado por el Ministerio de Fomento (P-68/2008), dentro de la Convocatoria de ayudas a proyectos de I+D en transporte e infraestructuras. Está desarrollado por las entidades Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad de Castilla la Mancha, Universitat Jaume I de Castellón, ALSA, ETT y BBJ.

explotación, indicadores medioambientales (generación/ahorro de externalidades); e indicadores de desarrollo económico regional.

El artículo presenta el enfoque metodológico con que los autores están abordando la definición del modelo de optimización, en términos de variables objetivo que se están planteando, y elementos de optimización considerados en la concreción del modelo de apertura.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de esta herramienta de ayuda a la toma de decisiones permite valorar y simular, de cara a las Administraciones implicadas en la definición del modelo de apertura a la competencia de viajeros por ferrocarril, diferentes opciones y planteamientos posibles de enfoques regulatorios para un proceso de liberalización de esta naturaleza.

Se parte de la realidad de que no existe un modelo único o predeterminado de apertura para un sector como el que ahora se aborda (el transporte interurbano de viajeros por ferrocarril), ni existe todavía una política liberalizadora clara por parte de la Unión Europea (ni de la Administración nacional española) que defina plazos ni formas concretas de este proceso de apertura. Además, las evidencias internacionales de liberalización aplicadas al mercado ferroviario de viajeros son todavía muy escasas, salvaguardando la excepción del Reino Unido, y determinados tráficos y mercados puntuales en Alemania, Suecia y Holanda.

El modelo de apertura que abordará España tiene la peculiaridad añadida de que el régimen regulatorio que aplique el ferrocarril va a tener incidencias sobre el resto de modos de transporte que coinciden con el tren, y en este sentido el nuevo ferrocarril liberalizado deberá complementarse necesariamente con la existencia de una densa red de servicios públicos regulados de transporte interurbano de viajeros por carretera. Esta peculiaridad de coincidencia de redes y servicios regulados no se presenta en otros países, o al menos el fenómeno no tiene la intensidad del mercado español, toda vez que en nuestro país el transporte público de viajeros por carretera está desarrollado en una muy extensa red de concesiones y autorizaciones de servicios de transporte (más de 1.400 contratos de servicio público por todo el territorio del país).

En este contexto, las Administraciones que deban abordar y concretar el proceso de apertura del mercado ferroviario de viajeros, en su vertiente interurbana, pueden tener diferentes objetivos de política ferroviaria en particular y de transportes en general.

2. CONDICIONANTES DEL MODELO REGULADOR

La Ley del Sector Ferroviario 39/2003 establece que los servicios ferroviarios que se prestan en la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG) dejan de considerarse como un servicio público de titularidad estatal, para ser calificados (tanto viajeros como mercancías) como servicios de interés general y esenciales para la comunidad que se prestan, con arreglo a la Ley, en un régimen de libre competencia.

En ésta, se consideran dos tipos de servicios para los que se establecen regímenes diferentes de acceso: los de “naturaleza comercial”, que se prestarán mediante libre competencia; y los de “interés público”, que se desarrollarán igualmente en régimen de apertura del mercado, si bien a través necesariamente mediante un mecanismo de licitación competitiva. La Disposición transitoria tercera de la citada Ley señala, con respecto a los servicios ferroviarios de viajeros, que estas disposiciones no serán de aplicación hasta que la Unión Europea no establezca un régimen de apertura del mercado para este tipo de transporte.

La Directiva 2007/58/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, por la que se modifican las Directiva 91/440/CEE y 2001/14 ha establecido ya una liberalización de facto (desde el 1 de enero de 2010) en el mercado de servicios ferroviarios internacionales de transporte de viajeros dentro de la Comunidad. Esta liberalización de servicios internacionales incluye la posibilidad del cabotaje interior, excepto en el caso que el cabotaje suponga un peligro para el equilibrio financiero de contratos de servicio público ya existentes. Esta decisión corresponderá al Regulador ferroviario mediante un estudio objetivo.

La competencia en la explotación de servicios interurbanos de viajeros generará por tanto una situación de gran complejidad a diferentes niveles, puesto que los servicios interurbanos con itinerarios de origen y destino en distintas Comunidades Autónomas pueden presentar en algunos casos características de servicio público y en otras no. Además, hay que considerar la posibilidad de que estos trenes puedan realizar paradas dentro del territorio de una misma Comunidad, de tal manera que podría afectar, si es el caso, al equilibrio económico de los contratos de servicio público que pudiesen haber otorgado las autoridades regionales competentes a otros operadores.

Las fases ya terminadas del Proyecto permiten concluir que la Ley del Sector Ferroviario ha establecido la necesidad de evolucionar hacia un modelo de libre competencia en el ferrocarril, en todo tipo de servicios, si bien, en el caso concreto de la apertura del mercado de viajeros, precisa de un análisis previo que dé respuesta a cuestiones que actualmente están por definir, como son: a) la concreción del procedimiento técnico-económico para declarar o no un servicio de Interés Público; b) la forma de coexistir, en el mismo modelo, los servicios internacionales, los interregionales con origen y destino en diferentes Comunidades Autónomas y los de interés regional -por tener su origen y destino en la misma Comunidad; c) regular el acceso al mercado de los operadores entrantes; o d) la configuración del modelo de relaciones económicas que fundamente el nuevo sistema de transportes.

A nivel internacional, a falta de concretarse un modelo de apertura por parte de la Unión Europea (algo que puede llegar o no a producirse), como se ha comentado, Reino Unido, Alemania, Suecia y Holanda son los únicos países que han avanzado en el proceso de apertura del mercado ferroviario de viajeros. Todos estos países tienen el denominador común de estar aplicando sistemas de competencia reguladas por el mercado, mediante licitaciones competitivas para acceder a los servicios. Las evidencias de una competencia efectiva en el mercado son muy escasas (limitadas en el caso del Reino Unido a los servicios denominados “Open Access Operators”, complementarios a operadores franquiciados, y a trayectos muy limitados interregionales en Alemania y Suecia). Quitando el caso del Reino Unido, la competencia hasta el momento se ha centrado en el acceso a Contratos otorgados por autoridades regionales y locales, para gestionar servicios deficitarios.

3. VARIABLES DE DECISIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE REGULACIÓN QUE ABORDA EL PROYECTO

La concepción del futuro modelo regulador que establezca la apertura del mercado en los servicios ferroviarios de viajeros debe concretar, en primer lugar, si la “competencia en el mercado” es un mecanismo posible y eficiente para articular la futura competencia y acceso a este sector. En el mismo sentido, se ha analizado la cabida de las fórmulas de “competencia por el mercado” en la legislación actual.

Una variable añadida en este modelo, y que está directamente relacionada con la optimización de la eficiencia social y económica que debe conllevar un proceso de esta naturaleza, es la decisión acerca de cómo articular la problemática de la doble regulación del “acceso a la infraestructura” y del “acceso a la gestión de los servicios”. En este sentido, pueden plantearse objetivos diferenciados (y por tanto sujetos a variables y condicionantes propios), para los diferentes Reguladores que regulen el acceso a una infraestructura como la ferroviaria que se caracteriza por tener una capacidad limitada, y el acceso a la propia operación de los servicios. La titularidad de la infraestructura (RFIG) es única, a nivel Estatal; pero la titularidad de los servicios que sobre ella se presten estará repartida entre el propio ámbito estatal, las Comunidades Autónomas con competencia sobre dichos servicios, e incluso entidades locales que pueden estar interesadas en promover servicios sobre la RFIG.

A modo de ejemplo de la problemática que están abordando los autores, el ente regulador del acceso a la infraestructura podría fijar como objetivo maximizar el uso de la infraestructura ferroviaria ya construida (primando la utilización del mayor número de surcos por el mayor número de trenes y operadores posibles), o por el contrario tender a aplicar criterios que primen el retorno económico de las infraestructuras (lo cual tiene una traslación clara en un mayor coste de acceso a la misma y unos costes de operación mayores), o aplicar otro tipo de políticas de orden más superior ligadas a minimizar la generación de externalidades en su sistema de transporte concebido globalmente. Cada una de esas decisiones – todas ellas factibles y sin solución en el momento actual – tienen una traslación directa al modelo de regulación y acceso a la prestación de los servicios ferroviarios, y la herramienta de simulación que objetiva un mecanismo de evaluación.

La herramienta tiene en cuenta además la problemática vinculada a la forma en que se definirán las variables de oferta de los servicios, y de manera especial acerca del nivel de intervención, supervisión y control que pueden tener los reguladores de los servicios de transporte (a nivel de concreción de itinerarios, marco tarifario, niveles de frecuencias, calendarios, etc).

De la misma forma, a modo de ejemplo, un ente regulador de transporte puede tender a una política de mayor intervención y control (objetivando más la definición de las condiciones de prestación del servicio público), o considerar una menor intervención dejando más libertad de mercado y margen comercial a los operadores. Estos escenarios – por definir en el momento actual en nuestra legislación –, no obstante, son aproximados en nuestro modelo a modo de hipótesis de trabajo y se someten a una valoración multicriterio que permite establecer una conclusión acerca de cada modelo regulatorio resultante.

La herramienta de apoyo en curso de realización aborda también el análisis del tamaño crítico y el dimensionamiento óptimo de las nuevas entidades operadoras. Este problema está íntimamente ligado a la simulación de un futuro Mapa de Servicios Ferroviarios Interurbanos de Viajeros, que toma como variable dada una red de infraestructuras ferroviarias tentativa para el año 2015. La concreción de este Mapa de Servicios Ferroviarios (definición de escenarios de oferta) es otro elemento de valor que aporta la herramienta diseñada por los autores en el momento actual. Para ello se trabaja con el concepto de “Unidades Operativas”, que son resultantes de la combinación de itinerarios, rutas y calendarios, potencialmente asignadas a hipotéticas unidades de operación con entidad propia.

En este proceso de concreción se están teniendo en cuenta datos reales y actualizados del mapa de tráficos del ferrocarril interurbano español, considerando volúmenes globales y repartos estacionales para definir unidades racionales y con un sentido económico lógico que sean susceptibles de agregación. Además, se atiende a criterios de racionalidad en el uso optimizado del material ferroviario.

La herramienta trabaja además con un módulo específico de costes ligados a la operación ferroviaria de viajeros, segmentando y aproximando costes de explotación en base a datos reales por tipos de servicio y por tipos de trenes. Además, se está calibrando un modelo de fijación de precios a usuarios, ligándolo a conceptos de valor de servicio ofrecido a bordo y a factores de distancia / tiempo.

A modo de conclusión, los autores están abordando la concepción y definición real de una herramienta de optimización de la regulación, que considera potenciales estrategias factibles de acceso al mercado, desde una perspectiva intramodal e intermodal (siendo este aspecto especialmente novedoso), de tal manera que dicha regulación permita alcanzar sus objetivos de una manera más eficiente.

Para ello, el modelo de decisión se deriva de un modelo de competencia que caracteriza el funcionamiento del mercado de transporte desde una perspectiva de la economía industrial y la teoría de juegos entre operadores de transporte concurrentes. Se considera que el marco regulatorio propuesto a partir de las conclusiones del modelo permitirá que éste alcance de una forma más efectiva los objetivos del decisor, y se evite así un costoso proceso de prueba y error en el diseño de la regulación.

4. CONCRECIÓN DE ESCENARIOS Y VALORACIÓN MULTICRITERIO

La metodología de trabajo que se está siguiendo en la concreción de esta herramienta adopta las siguientes etapas:

1. Análisis de escenarios:
 - Los escenarios se han estructurado atendiendo a dos componentes: modelo regulatorio de acceso al mercado, y estructura organizativa de la red.
 - La estructura organizativa de la red consiste en la definición de los distintos elementos (zonas, corredores, mapa de servicios) en que se puede estructurar la red y la oferta ferroviaria a efectos de la regulación.
2. Definición de los objetivos de la regulación. En esta fase, fundamental, se han determinado los escenarios óptimos, permitiendo ponderar los distintos indicadores empleados en el análisis multicriterio.
3. Definición de indicadores a considerar en el análisis multicriterio. Son aquellos necesarios para cuantificar un objetivo de la regulación o de otras políticas de transporte. A cada objetivo de la regulación se le asigna al menos un indicador. A su vez, un indicador puede formar parte de la definición de varios objetivos. El modelo considera, hasta el momento, los siguientes indicadores: número de pasajeros, ingresos, saldo de explotación del operador (beneficios o pérdidas, en base a estructuras de coste), indicadores medioambientales (emisiones y consumo energético) e indicadores de desarrollo económico (para el modelo económico regional).
4. Evaluación de cada escenario. En esta etapa se aborda el cálculo de los indicadores para cada escenario viable. Los escenarios óptimos se tienen en cuenta de acuerdo a los objetivos definidos.
5. Evaluación multicriterio de las alternativas mediante la ponderación (definida por los objetivos de la regulación) de los indicadores considerados.
6. Determinación del/los escenario/s óptimo/s para cada objetivo de regulación.

7. Cálculo de la bondad (análisis de la sensibilidad) con que cada escenario cumple cada uno de los objetivos planteados.

5. CONCLUSIÓN Y RESULTADOS ESPERADOS

Con la aplicación de esta herramienta de apoyo a la toma de decisiones, los autores esperan aportar escenarios de análisis calibrados y fundamentados en una metodología propia, que tengan en cuenta las peculiaridades y complejidades expuestas de un proceso de apertura a la competencia como el que ahora se va a abordar para la gestión de servicios interurbanos de viajeros por ferrocarril. Es posible definir y valorar “escenarios de regulación de servicios ferroviarios”, que pueden considerar diferentes objetivos de regulación, aportando una batería de indicadores de valoración multicriterio que considera además implicaciones y efectos sobre otros modos de transporte coincidentes con el nuevo ferrocarril liberalizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS, J., y CANTOS, P. (1999): “Rail Transport Regulation”, *Policy Research Working Paper 2064*, The World Bank, Washington.
- CUERVO, A., GONZÁLEZ, M. MONTORO, M. (2005): “Las concesiones de servicios de transporte público de viajeros: algunas lecciones basadas en la teoría de los incentivos”. En IRANZO, J. (director) “Competencia y Regulación en el transporte de viajeros por carretera en España”, *Revista del Instituto de Estudios Económicos*, nº 4/2005, pp.3-37.
- FERNÁNDEZ FARRERES, G. (2004): “Transporte por carretera y competencia”. En: FERNÁNDEZ FARRERES, G. (coordinador): *Transportes y Competencia*. Los procesos de liberalización de los transportes aéreo, marítimo y terrestre y la aplicación del derecho de la competencia, Civitas, Madrid.
- FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES Y FUNDACIÓN FEDEA (2001): *Balance global de la actividad ferroviaria en España*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.
- GARCÍA ÁLVAREZ, A., CILLERO, A. Y RODRÍGUEZ JERICÓ, P. (1998): *Operación de trenes de viajeros*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.
- GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2004): “Explotación económica y regulación del transporte de viajeros por ferrocarril. En el nuevo escenario competitivo”, *Tesis doctoral*, dirigida por Rodríguez Antón, Universidad Autónoma, Madrid.
- NASH, C. A. y PRESTON, J.M. (1992): “Barriers to Entry in Railway Industry”, *Working Paper N° 354*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds.
- NILSSON, J.E. (2002): “Towards a Welfare Enhancing Process to Manage Railway Infrastructure Access”, *Transportation Research*, Part A, 36, pp. 419-436.
- PRESTON, J.M. (1996): “The Economics of British Rail Privatisation: An Assessment”, *Transport Reviews*, vol. 16, nº. 1, pp. 1-21.
- PRESTON, J.A. y WHELAM, G. (1995): “The Franchising of Passenger Rail Services in Britain”, *Working Paper N° 436*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds.
- PRESTON, J., WHELAN, G., Y WARDMAN, M. (1999): “An analysis of the potential for on-track competition in the British passenger rail industry”, *Journal of Transport Economics and Policy*, enero, pp.77-94.

- RAMOS, R. y PAMPILLÓN, R. (2000): “La Privatización de los Ferrocarriles en Gran Bretaña”, *Economía Industrial*, nº 328, pp. 53-62.
- RAMOS, R. (2000): “Teoría y Política de la Privatización del Ferrocarril”, *Tesis Doctoral*, Universidad San Pablo. CEU, Madrid.
- RAMOS, R. (2001): “La Política Económica de la Liberalización y Privatización del Ferrocarril. Una Aproximación al Caso Español”, *Revista del Instituto de Estudios Económicos*, nº. 2 y nº. 3, pp.661- 400.
- RAMOS, R. (2002): “El futuro de la Política Ferroviaria en España”, *Boletín Económico ICE*, julio, nº. 2734, pp. 9-23.
- RAMOS, R. (2004). *Reformas y políticas liberalizadores del ferrocarril: El nuevo escenario en la Unión Europea*, Serie Tesis Doctorales, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.
- RENFE OPERADORA (2007). *Modelos organizativos en el sector ferroviario europeo*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.
- RUIZ, A. y MARTÍNEZ, T. (2008). “Análisis de la competencia en el sector ferroviario utilizando el modelo MOCAFE”. Ministerio de Fomento.
- RUIZ, A. y MARTÍNEZ, T (2006): “El nuevo sector ferroviario y la competencia: Detección de barreras de entrada”, *Transporte y Construcciones*, nº.104, pp. 103-122
- RUIZ A. (2006): “Modelo de determinación de las condiciones de competencia en el transporte ferroviario”, *Tesis Doctoral*, dirigida por T. Martínez Aguado, UCLM: Toledo.
- SDG (2004): *EU Passenger Rail Liberalisation: an Extended Impact Assessment*, Informe para la Comisión Europea realizado por Steer Davies and Gleave.

Principales aspectos a considerar para el desarrollo del marco regulador para la apertura a la competencia del transporte interurbano de viajeros por ferrocarril en España

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto Cillero Hernández

Director Técnico – ALSA (División de Transporte Interurbano)

En el presente artículo se muestran las primeras reflexiones y resultados sobre el proceso de apertura del mercado de transportes de viajeros por ferrocarril en España que se desarrollan en el marco del proyecto de investigación Optired. Este trabajo fue presentado en el IX Congreso de Ingeniería de Transporte CIT 2010

Principales aspectos a considerar para el desarrollo del marco regulador para la apertura a la competencia del transporte interurbano de viajeros por ferrocarril en España

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto Cillero Hernández

Director Técnico – ALSA (División de Transporte Interurbano)

RESUMEN

El objetivo fundamental del Proyecto OPTIRED³ se centra en proponer un modelo de régimen de apertura del mercado de los servicios ferroviarios interurbanos de viajeros en España. El punto de partida de la investigación ha consistido en la realización de un estudio de estado del arte desde varias perspectivas. En el estado de arte jurídico se ha analizado la regulación ferroviaria, en el ámbito nacional y europeo, y sus interrelaciones con la de otros medios de transporte. También se ha efectuado un estado del arte de la regulación económica del acceso a la gestión de servicios de transporte por ferrocarril, unido a un análisis comparado de las experiencias más relevantes de apertura en Europa. Por último, se efectúa el estado del arte del análisis teórico de las cuestiones referentes a la modelización de la competencia (intramodal e intermodal) en la gestión de servicios ferroviarios interurbanos.

En la presente comunicación exponemos las principales conclusiones alcanzadas en esta fase precientífica del proyecto, en cuanto a opciones tentativas de apertura del mercado que podrán plantearse, desde una perspectiva jurídica y de regulación. El estudio de estado del arte realizado sobre esta cuestión tiene como novedad desarrollar bajo un enfoque integrado las tres perspectivas: jurídica, de regulación económica y de ordenamiento de la competencia. Aspectos éstos que en la literatura observada tienden a ser estudiados de forma diferenciada, y que en opinión de los autores deben ser tratados de manera conjunta a la hora de aproximar un modelo de regulación.

³ Este trabajo cuenta con la financiación del Proyecto OPTIRED P 68-08. El Proyecto OPTIRED se inscribe en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2008-2011. Cuenta con una ayuda económica del Ministerio de Fomento en el marco del Programa Nacional de Cooperación

1. MODELOS DE APERTURA A LA COMPETENCIA

La visión clásica del ferrocarril como una actividad en la que, como consecuencia de la existencia de un monopolio natural era necesario que existiese una empresa pública con el fin de limitar el poder de monopolio y al alcanzar un nivel socialmente óptimo de producción, es cuestionada en los años ochenta; desde la aplicación de las aportaciones de la teoría del monopolio natural al ferrocarril y la aplicación de las teorías sobre la disputabilidad de los mercados a este modo de transporte (Starkie, 1984).

Mediante la aplicación de la aportación a la teoría del *monopolio natural* en una actividad multiproducto se plantea si es más eficiente que la infraestructura y la explotación sean provistas por una misma empresa. En el caso de separarse la infraestructura de la explotación, la primera presenta claramente la característica de *monopolio natural*, mientras que podría plantearse que la explotación presentase rendimientos constantes a escala. De ser así podría plantearse la libre competencia en la prestación de servicios ferroviarios (González Savignat y Nash, 1999).

La liberalización de los servicios ferroviarios es una opción de política ferroviaria que presenta cuatro problemas.

- En primer lugar, la posible existencia de economías de escala en la prestación de los servicios ferroviarios (González Savignat y Nash, 1999).
- En segundo lugar, no está resuelto el problema de asignar el uso de la vía cuando varios competidores desean usarla en el mismo espacio y tiempo (Nilsson, 2002).
- En tercer lugar, se perderían las ventajas de las que disfruta un viajero en cuanto a la coordinación de los servicios y la validez de los billetes cuando el servicio es prestado por un operador de ámbito nacional (Shires y otros, 1994).
- Por último, existen importantes barreras a la entrada que impedirían la entrada masiva de nuevos competidores (Nash y Preston, 1992).

Hay dos modelos teóricos posibles de apertura a la competencia en la prestación de servicios:

- *Competencia por el mercado*, en el que la competencia se produce al licitar para recibir una concesión o franquicia con una duración determinada (modelo, por ejemplo, vigente en los servicios interurbanos por autobús en España).
- *Competencia en el mercado*, en el que las empresas prestadoras de servicios de transportes compiten día a día fijando las rutas, horarios y precios que les parecen más convenientes (es el modelo de la aviación).

Establecer la *competencia por el mercado* mediante la asignación de una o varias concesiones (o franquicias) para la prestación de servicios ferroviarios de viajeros permite la introducción de la disciplina de mercado en la prestación de los servicios ferroviarios, evitando parte de los inconvenientes de la *competencia en el mercado* (ECMT, 2007). La concesión de los servicios ferroviarios de viajeros es una manera de introducir la *competencia por el mercado* no tan difícil de aplicar como la libre prestación de servicios ferroviarios: reduce los problemas derivados de introducir la competencia en el mercado derivados de la asignación de los surcos y la pérdida de economías de densidad así como mitiga la pérdida de beneficios de red al no suponer una división de servicios tan grande como en la libre competencia.

Otra ventaja que ofrece la franquicia es que las autoridades pueden controlar el nivel de servicios y precios con el fin de alcanzar objetivos de carácter social. También facilita un mayor protagonismo de las autoridades regionales y locales tanto en la definición de los servicios como en su financiación. Mediante las franquicias se alcanza una mayor eficiencia en la asignación de las subvenciones: facilita la reducción de las subvenciones cruzadas, por lo que el coste de los servicios es más explícito y la competencia por la asignación de los servicios permite reducir las asimetrías de información y el volumen de subsidios. El éxito a la hora de alcanzar estos resultados depende del reparto de riesgos entre el sector público y privado, la transparencia y durabilidad del marco regulatorio así como de los incentivos establecidos contractualmente.

Es de especial importancia que las compañías que desean acceder al mercado no fuesen discriminadas. Por este motivo sería esencial la existencia del regulador de la actividad. En tercer lugar, superar los conflictos internos entre los distintos implicados que puedan existir en el transporte ferroviario: el estado, las compañías ferroviarias, los organismos encargados de gestionar las subvenciones y los usuarios.

En los servicios de viajeros por ferrocarril se ha dado de una manera residual la *competencia en el mercado* (en algunos servicios interregionales en Alemania, o las franquicias que se superponen en UK). Así no existen importantes estudios empíricos sobre los resultados de la competencia. El efectuado por NERA en 2001 sobre los servicios que se solapan en las franquicias muestra incrementos de frecuencias y reducciones de las tarifas (Jones, 2001). El estudio del ITS de Leeds (Preston et al. 1999) mediante un modelo de simulación muestra las ganancias en el excedente del consumidor y del productor ocasionadas por la competencia. Se examinan tres escenarios: a) Entrada de un competidor que solo explota los servicios rentables (cream skinning); b) un operador que iguala los servicios ofrecidos por la compañía establecida y ofrece precios mas bajos, guerras de precios; y c) diferenciación de producto (trenes de distinta calidad). El estudio concluye que mientras que el excedente del consumidor aumenta el total disminuye.

Un ejercicio similar de simulación es efectuada por Steer Davis Gleave (SDG, 2004), por encargo de la Comisión para analizar la liberalización de los servicios de internacionales de viajeros en la UE. Modeliza, considerando 5 escenarios, los efectos en varios corredores internacionales de la liberalización sobre los niveles de servicios, tarifas, oferta y beneficios de los operadores.

El estudio muestra que hay unas ganancias limitadas derivadas de la competencia en algunos corredores limitadas y las limitaciones que la competencia en el mercado al poder suponer una pérdida de frecuencias de los servicios si los billetes no son intercambiables.

En el caso de España Ruiz Rúa (2006) diseña el modelo, basado en la teoría de juegos-organización industrial, que mejor caracteriza el sector ferroviario español y lo aplica sobre un corredor concreto. Aunque su modelo puede ser aplicado a cualquier otro escenario territorial, elige por su relevancia el Madrid-Barcelona. Se trata, por tanto de un ejercicio real, con conclusiones efectivas y prácticas, a partir del modelo.

Una conclusión que destaca la autora de esta investigación es la potencia de las herramientas ofrecidas por la teoría de juegos en el nivel teórico y en el práctico, la importancia de hacer valer las ventajas competitivas de los operadores, basadas en las ventajas competitivas en costes, o lo que es lo mismo, en la batalla por la reducción de los precios. Bajo estas premisas, afirma la autora, un nuevo operador entrará en el mercado siempre que su cuota de participación se sitúe, al menos, entre un 25-30%.

En lo que se refiere a los efectos intermodales e intramodales de la competencia destacan los trabajos de Ivaldi y Vibes (2005). Estos autores aplican un modelo de simulación para

analizar la competencia intramodal e intermodal basada en la teoría de juegos. En concreto analiza la entrada en la línea Colonia-Berlín de un operador ferroviario de bajo coste. Las tarifas bajarían en todos los modos en especial los de la compañía ferroviaria que ya estaba establecida, Los efectos mayores serían en el mercado de de viajes por motivos de ocio en los que la mayor reducción de las cuota de mercado la sufrirían los operadores aéreos.

Los estudios basados en un análisis comparado de los modelos liberalizadores muestran que los países de la UE están desarrollando distintos modelos de liberalización (Nash, 2007) y ritmos (IBM, 2004 y 2007), tanto en la forma como el ritmo de liberalización.

Aunque los estudios señalan la existencia de ganancias derivadas de la liberalización, no existen conclusiones firmes en cuanto a que modelo es el mejor. Además, parece existir efectos diferentes en función del ritmo de aplicación de las disposiciones liberalizadoras (Friebel et al, 2003). Además deben considerarse los beneficios de una regulación uniforme frente a las ventajas asociadas a una regulación que permita adaptarse a las particularidades de cada país. La evidencia disponible parece mostrar que para el transporte de viajeros son mas exitosas la competencia por el mercado que la competencia en el mercado (TRANSPORT & MOBILITY LEUVEN, 2005) y que el modelo regulatorio mejor para el sector ferroviario es un tema abierto y sujeto a estudio (EVERIS & NTU, 2010).

2. Competencia en el mercado

2.1 Ventajas de la competencia en el mercado

Los partidarios de la *competencia por el mercado* asumen que ésta tanto si es real como, gracias a la disputabilidad del mercado, potencial resulta en un aumento de la eficiencia productiva (menores costes) y asignativa (menores tarifas) y de la eficiencia dinámica (más innovaciones). Los partidarios de esta manera de regulación consideran que la competencia en el mercado es más efectiva para lograr estos fines que la conseguida mediante la competencia por el mercado al tener un efecto disciplinador más directo e inmediato que la posibilidad de perder el mercado en el futuro.

Así mismo, confían en que el output resultante de las decisiones empresariales en cuanto a rutas, frecuencias, y calidad del servicio es socialmente más eficiente que el determinado mediante la regulación. Además, consideran que no existen razones relevantes para subsidiar el transporte ferroviario de larga distancia debido a sus buenas perspectivas comerciales y porque los argumentos de primer óptimo para subsidiar el ferrocarril interurbano frente al de otros segmento de mercado, como los de cercanías, son menores: desde la perspectiva de primer óptimo el efecto Mohring no se da en el ferrocarril interurbano al ser servicios menos frecuentes mientras que los argumentos de segundo óptimo relacionados con la congestión de la carretera son menos importantes.

Finalmente, defienden que en libre competencia los operadores pueden diseñar su red de servicios de tal manera que internalicen las externalidades que generan las conexiones entre sus tráficos (efecto red) de tal manera que ésta sea óptima. Así pues, se considera que es una mejor opción el mercado para la concreción de estas redes que la regulación pública.

2.2 Desventajas de la competencia por el mercado

Los detractores de la *libre competencia* señalan que los estudios econométricos sobre la estructura de costes de los ferrocarriles sugieren que existen economías derivadas de aumentar el número de trenes que utilizan la vía (economías de densidad), de tal manera que la introducción de la competencia en la prestación de los servicios supondría una pérdida de eficiencia de tal manera que sería deseable la existencia de un solo operador, al menos, en cada flujo de tráfico.

Además, consideran que deberían establecerse mecanismos de mercado para asignar los derechos de acceso a la infraestructura (surcos) con el fin de lograr el libre acceso a la infraestructura. Existen varios métodos (mediante mecanismos de mercado, precios de congestión, subastas simples, subastas combinatorias, la puja por un horario existente o sistemas negociados de acceso). Sin embargo, todavía se está investigando cual es el método factible y, en cualquier caso, todos presentan excesivas complicaciones e implican altos costes de transacción. En cualquier caso, debe considerarse que en los horarios en los que más frecuentemente desearían operar los nuevos entrantes (las “horas punta”) puede que no existan, por las limitaciones de capacidad, surcos suficientes para establecer la competencia.

También destacan que la existencia de varios operadores de viajeros puede suponer la desaparición de los beneficios de la existencia de un único operador de ámbito nacional para los viajeros (beneficios de red): horarios integrados; billetes conjuntos para los servicios prestados por distintos operadores; que sean intercambiables los billetes para un mismo trayecto de cercanías; o la existencia de abonos para las clases más desfavorecidas.

Otro aspecto que consideran es que la actividad ferroviaria presenta importantes barreras a la entrada que pueden impedir el acceso masivo de nuevos competidores. De un lado existen costes irrecuperables de entrada (costes hundidos), entre los que destacan la infraestructura, el material rodante y el capital humano. De otro, la compañía establecida cuenta con barreras “inocentes” a la entrada como las economías de experiencia, la imagen de marca y la fidelidad de los clientes así como ventajas en materia de costes derivadas de las economías de escala alcanzadas gracias a su dimensión. Además, el operador establecido puede desarrollar conductas estratégicas para bloquear la entrada como puede ser la inversión en material rodante con el solo propósito de hacer más costosa la entrada de los competidores.

Estas barreras y posibles prácticas junto a las ventajas del operador establecido generadas por los efectos de red pueden ocasionar que no se produzcan ninguna entrada en el mercado y que el operador establecido goce de una situación de monopolio. Es un aspecto controvertido si esa situación supone también una situación de monopolio en el mercado de transportes en la medida en que los otros modos de transporte no sean sustitutivos (coche, autobús, y transporte aéreo) del transporte ferroviario interurbano de viajeros (Cillero y Ramos, 2010b).

Otro problema que encuentran es que si se produce la entrada de nuevos competidores y compiten en las rutas más rentables (“descreme del mercado”), puede llevar a la eliminación de servicios y a la erosión de los efectos de red. En cualquier caso, la orientación hacia el beneficio económico puede suponer la eliminación de los servicios menos rentables los cuales, si se considera que deben seguir prestándose deben ser subsidiados mediante fondos públicos.

Desde una perspectiva teórica se han desarrollado modelos de competencia para analizar cómo sería la competencia en el mercado y su deseabilidad social (Preston, 2009). La principal conclusión es que la competencia en los servicios de larga distancia tomaría la forma de competencia oligopolista. Si no se da diferenciación de producto y los costes de acceso a la infraestructura son bajos es posible que pueda darse una competencia en la que el nuevo entrante replique los servicios ofrecidos por el operador establecido. Sin embargo, no sería socialmente deseable pues supondría en una cantidad excesiva de servicios y tarifas más altas. Con un canon por el uso de la infraestructura elevado la entrada se limitaría a descremar el mercado e igualmente no sería socialmente deseable.

A diferencia de los modelos de competencia anteriores, si la competencia se da mediante diferenciación de producto, por ejemplo la competencia entre una línea directa y otra paralela de menores prestaciones, el resultado puede ser socialmente óptimo. Así mismo la entrada en nichos de mercado (p.ejemplo servicios directos poco frecuentes que compitan con una oferta establecida de servicios indirectos poco frecuentes) es socialmente deseable.

3. Competencia por el mercado

La competencia por el mercado a través de una concesión (o “franquicia”) que da derecho a la exclusividad en la prestación del servicio ferroviario por un período determinado, otorgada mediante una subasta competitiva permite la prestación de bienes y servicios con una mínima pérdida de eficiencia asignativa y productiva en los mercados en los que es necesaria la intervención pública a causa de su estructura no competitiva. Este modelo presenta ventajas e inconvenientes (Ramos y Cillero, 2010a).

3.1.1 Ventajas de la competencia por el mercado

Una ventaja es que evita algunos de los problemas de introducir la competencia en el mercado. A este respecto, debe señalarse que los servicios ferroviarios presentan características de monopolio local, debido a su concentración en el espacio y en el tiempo: en los períodos “punta” no existen surcos suficientes para establecer la competencia mientras que en el resto del tiempo, aunque no existen problemas de capacidad, permanece el problema de la iteración entre los distintos trenes que utilizan la misma vía. Además, no supone una separación de los servicios tan grande como en el caso de la libre competencia. Así, permite conservar las economías de densidad mientras que permite mitigar la pérdida de los beneficios de red.

Además, si una parte importante de los servicios requieren ser subvencionados, lo cual es muy probable si éstos deben de asumir la totalidad o gran parte de los costes de la infraestructura, es la mejor opción: gracias a la competencia, se reducen las asimetrías de información y, por lo tanto, el volumen de subsidios. También debe considerarse que es una alternativa más segura que la venta directa de los servicios cuando no es posible distinguir, por falta de una adecuada contabilidad de costes, cuales son los servicios rentables y los deficitarios.

Por último, un aspecto destacable es que mediante la “franquicia” puede controlarse el nivel de servicios y precios con el fin de alcanzar objetivos de carácter social. A este respecto, es interesante señalar que al poderse incluir servicios rentables y no rentables en una misma concesión los primeros pueden financiar a los segundos de tal manera que las subvenciones necesarias se reducen o incluso puede ser cero.

3.1.1 Desventajas de la competencia por el mercado

“Trade of” competencia/ inversión

Uno de los principales beneficios de un contrato de larga duración, sería que aumentarían las posibilidades de beneficio de la “franquicia” y facilitaría la inversión. En este sentido, los contratos de corta duración desincentivan la creación de nuevos servicios o productos ferroviarios que cuenten con rentabilidad a largo plazo pero no a corto, debido a que su “etapa de despegue” es larga. En lo que se refiere a la inversión, considerando que la vida del material rodante es de aproximadamente de 20 años, existiría poca predisposición a invertir en nuevos trenes por parte de un operador, si el periodo de la “franquicia” es corto. Una solución serían la creación de empresas encargadas de comprar y alquilar el material rodante o bien que el sector público ofreciese garantías a la compañía operadora, en el caso de ser desplazada, sobre el uso del material rodante. También podrían otorgarse estas garantías a las empresas privadas de alquiler para disminuir el riesgo de la inversión (Ramos y García Pérez, 2010).

No obstante, los contratos de larga duración presentan cinco problemas que, por último, desincentivan la competencia: disminuyen el temor de la pérdida de la renovación y la presión competitiva característica de los contratos a corto plazo; aumentan la probabilidad de renegociaciones de los contratos, cuyas consecuencias analizamos posteriormente; hacen más probable el establecimiento de relaciones informales con el fin de obtener tratos de favor (la “captura”) del organismo encargado de las adjudicaciones; desincentivan la existencia de una “masa crítica” de empresas interesadas en ser operadoras ferroviarias, de tal manera que la competencia en la subastas es menor; y, por último, aumenta la probabilidad de que la compañía establecida se beneficiase de mayores ventajas informativas.

“Trade of” competencia/ traslado de riesgo e iniciativa empresarial

Los principales impedimentos para que la licitación de una “franquicia” ferroviaria no sea competitiva son la existencia de colusión y las ventajas de las que puede gozar la compañía ferroviaria que se encuentra establecida. El número de licitantes debe ser lo suficientemente grande y diverso para evitar el riesgo de colusión. Sin embargo, como consecuencia de la baja rentabilidad de la actividad, en especial si el canon por el acceso a la infraestructura es alto, el número de interesados puede ser pequeño y, además, es posible que pueda limitarse a causa del riesgo asumido. A este respecto hay que señalar que el contrato puede ser:

- A coste completo (coste bruto): el operador recibe el coste de ofrecer el servicio (incluido el margen de beneficio para pagar el factor empresarial y el capital), mientras que la agencia pública que se encarga de la “franquicia” obtiene todo el ingreso (principalmente por la venta de billetes) de tal manera que ésta asume el riesgo de demanda y aumenta el número de licitantes. Por tanto no hay incentivos para el aumento de ingresos por parte de la iniciativa empresarial.
- A subsidio neto (coste neto): el operador de la “franquicia” recibe todos los ingresos y percibe de la autoridad que gestiona la “franquicia” un subsidio para cubrir las pérdidas o bien paga a ésta una cantidad (premio) cuando los servicios subastados son rentables. De esta manera, el adjudicatario asume el riesgo de costes y de demanda, de tal forma que este mayor riesgo contraído puede retraer el número de licitantes. Con el fin de limitar el riesgo de demanda asumido por las partes se pueden establecer techos y suelos para que el adjudicatario tenga limitado su nivel de pérdidas, en el caso de que la demanda sea menor que la pronosticada y de beneficios en el caso contrario. Como contrapartida, la intervención de la autoridad en la gestión es mayor y la iniciativa empresarial menor.

Idealmente, el contrato debería ser tan completo como pudiese ser y que fijase cualquier contingencia debida a un cambio en la demanda o en la tecnología: de esta manera se reducen los costes de regulación. Sin embargo, esto no es posible en la actividad ferroviaria, en especial si el contrato es a largo plazo, debido a que los cambios en la demanda, tecnología, costes y condiciones de oferta son probables. Es posible que la renegociación del contrato sea problemática debido a que la compañía establecida puede aprovecharse de las siguientes circunstancias: el contar con una mayor información que la agencia encargada de la “franquicia”; porque la autoridad encargada de la “franquicia” no esté dispuesta a reconocer su equivocación; porque el coste de organizar otra licitación puede ser elevado; o porque existe el problema de mantener el servicio si la compañía que opera actualmente el servicio desaparece. Sabedora de esto un licitador puede “jugar” estratégicamente ganando el contrato con una puja no realista y renegociándolo después. Una manera de limitar este juego estratégico es con contratos a coste bruto, lo cual, como vimos limita la iniciativa empresarial.

“Trade of” iniciativa privada/especificación de los servicios

La especificación de los servicios ferroviarios no presenta grandes dificultades. Fundamentalmente, los aspectos que deberían de ser concretados son: la frecuencia del servicio; el precio; la calidad; y los aspectos relacionados con la seguridad. Una especificación del nivel de servicio y precios favorece la consecución de objetivos de carácter social (evitar precios abusivos, asegurar servicios frecuentes, etc.). Si, adicionalmente, se fija la estructura de los servicios y/o la de los precios se podría lograr la integración de los servicios ferroviarios y de éstos con otros medios de transporte.

La contrapartida a esta especificación es una menor innovación en los servicios y las tarifas por parte del “franquiciado”. Además, hay que considerar que debe realizar la autoridad pública una configuración de las concesiones que de lugar, a su vez a una red de ámbito nacional óptima, para lo cual debe de contar con las herramientas de decisión adecuadas.

4. CONCLUSIONES

En la UE, los servicios internacionales están liberalizados desde el 1 de enero de 2010 mientras que todavía no se ha impuesto la apertura a la competencia de los mercados domésticos (Ramos y Montero, 2010). Algunos países todavía no han abierto a la competencia su mercado doméstico mientras que los que han realizado la apertura lo han efectuado con diferentes modelos. Sólo Reino Unido ha optado para la apertura por una organización de sus servicios ferroviarios interurbanos mediante licitaciones competitivas por el mercado. En las franquicias británicas, que pueden incluir tanto servicios de largo recorrido rentables como no rentables así como regionales o de cercanías, la autoridad encargada de la licitación establece las características mínimas del servicio. Aunque estaba previsto que modelo evolucionase hacia concesiones en las que se permitiese la libre entrada de otros competidores, finalmente, sólo se permite la entrada de nuevos operadores que no detraigan ingresos de los franquiciados. En el caso de Holanda, tras el fracaso de los ensayos para establecer la libre competencia en la red convencional, en especial por la particularidad que supone una red saturada y unos servicios muy mallados, se ha optado una concesión por 10 años adjudicada directamente a los compañía nacional ferroviaria NS para la operación de los servicios interregionales sobre la red convencional mientras que para la alta velocidad se opta por una concesión adjudicada competitivamente.

Alemania es el único país que adopta la competencia en el mercado para la prestación de sus servicios interurbanos interregionales destacando que no hay ninguna intervención pública para asegurar la prestación de los servicios deficitarios (Beckers et. al., 2009).

El resto de los Estados miembro la apertura la efectúan mediante un tercer modelo de competencia: una mezcla entre competencia por el mercado y por el mercado. Se establece la competencia por el mercado para la prestación de los servicios deficitarios que se consideran socialmente necesarios mientras que en resto de los servicios interurbanos hay competencia en el mercado. Éste es el modelo adoptado por Suecia en el que se establecen licitaciones competitivas para la prestación de los servicios interregionales que la compañía pública ferroviaria, los SJ, consideran que no pueden operar rentablemente. Recientemente se ha decidido la supresión del monopolio de los SJ sobre el resto de los servicios interregionales.

La UE parece inclinarse hacia este tercer modelo, que podíamos bautizar como de “competencia regulada” (Montero, 2010). Este escenario partiría del reconocimiento general de la libertad de entrada al mercado mientras que la regulación del mercado mediante obligaciones de servicio público permite desde otorgar derechos exclusivos en las rutas deficitarias y livianas obligaciones en las rutas con más potencial para la competencia. Sin embargo, este modelo no está en la línea con las conclusiones de los modelos teóricos de simulación de la competencia que sugieren que la mejor situación posible sería la existencia de un único operador dominante que actuase en un escenario en el que existiese no sólo competencia intermodal sino intramodal mediante diferenciación del producto bien mediante líneas paralelas de diferentes prestaciones, más lentas pero más baratas, o, si hay capacidad, a través de servicios que en la misma línea sean más lentos y baratos. Si estos servicios reciben subsidios deben ser asignados mediante licitaciones competitivas. Otra fuente de competencia sería la entrada de operadores que cubriesen nichos de mercado.

Este modelo sólo sería posible con una concesión nacional para los servicios rentables y una o varias concesiones que pudiesen ser competencia mediante la diferenciación del producto. Entre éstas podría establecerse una o unas para los servicios interurbanos que se considerasen de interés público.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECKERS ET.AL. (2009). “Long-distance Passenger Rail Services in Europe: Market Access Models and Implications for Germany”, JTRC Discussion Paper Paper No 2009-22.

ECMT (2007): *Competitive Tendering for Rail Services*, OECD / ECMT, Paris

EVERIS & NTU (2010): *Study on Regulatory Options on Further Market Opening in Rail Passenger Transport*, final version 09/09/2010.

Friebel G.; Ivaldi, M. and C. Vibes, (2003): *Railway (De)Regulation: a European Efficiency Comparison*, IDEI report, no. 3 on passenger rail transport, University of Toulouse.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. y RAMOS, R. (2010). Monografía del Estado del arte del proyecto OPTired: “Fundamentos y aspectos diferenciales de la regulación en el transporte de viajeros por ferrocarril”, pendiente de publicación.

GONZÁLEZ SAVIGNAT, M., y NASH, C.A. (1999): “The Case for Rail Reform in Europe: Evidence from Studies of Production Characteristics of the Railway Industry”, Comunicación presentada a las *Terceras Jornadas de Política Económica*, Alicante, abril, 1999. Posteriormente recogido en *International Journal of Transport Economics*, vol. 26, nº.2, 1999, Págs. 201-220

IBM GLOBAL SERVICES (2007 y 2004). *Rail Liberalisation Index*.

IVALDI, M, y VIBES, C. (2005), “Intermodal and Intramodal Competition in Passenger Rail Transport”, *IDEI Working Papers*, 345, (IDEI), Toulouse.

JONES, I (2001): “Railway franchising: is it sufficient? On-rail competition in the privatised passenger rail industry”. En Robinson, c (ed) *Regulating Utilities: New Issues, New Solutions IEA*, pp.120-141

MONTERO, J. (2010). Monografía del Estado del arte del proyecto Optired: “Implicaciones jurídicas de la apertura de la prestación de servicios interurbanos”, pendiente de publicación.

NASH, C. A., y PRESTON, J.M. (1992): “Barriers to Entry in Railway Industry”, *Working Paper N.º. 354, Institute for Transport Studies*, University of Leeds, Leeds.

NILSSON, J-E. (2002): “Towards a Welfare Enhancing Process to Manage Railway Infrastructure Access”, *Transportation Research*, Part A, 36, pp. 419-436

PRESTON, J. (2009). “Competition for Long Distance Passenger Rail Services: The Emerging Evidence”, JTRC Discussion Paper Paper No 2009-24.

PRESTON, J., WHELAN, G., Y WARDMAN, M. (1999): “An analysis of the potential for on-track competition in the British passenger rail industry”, *Journal of Transport Economics and Policy*, enero.

RAMOS, R. y CILLERO, A. (2010a). Monografía del Estado del arte del Proyecto OPTired: “Formas de competencia en el transporte de viajeros por ferrocarril”, pendiente de publicación.

RAMOS, R. y CILLERO, A. (2010b). Monografía del Estado del arte del Proyecto OPTired: “Variables fundamentales en el diseño del marco regulatorio y de ordenación de la competencia en el transporte de viajeros por ferrocarril”, pendiente de publicación.

RAMOS, R. y GARCÍA, J. (2010). Monografía del Estado del arte del Proyecto OPTired: “Medidas para el desarrollo del marco regulatorio con el fin de asegurar un marco competitivo”, pendiente de publicación.

RAMOS, R. y MONTERO, J. (2010). Monografía del Estado del arte del proyecto OPTired: “Normativa reciente y en elaboración referente a la apertura a la competencia de los servicios ferroviarios”, pendiente de publicación.

RUIZ, A. y FERNÁNDEZ-CREHUET, J. (2010). Monografía del Estado del arte del Proyecto Optired “Implicaciones sobre los servicios interurbanos de los posibles escenarios de transferencia de la responsabilidad de la prestación de los servicios de interés público en España”, pendiente de publicación.

RUIZ, A. y MARTÍNEZ, T (2008). “Análisis de la competencia en el sector ferroviario utilizando el modelo MOCAFE”. Pendiente de publicación en la revista. *Transportes y Comunicaciones*. Ministerio de Fomento.

SDG (2004): *EU Passenger Rail Liberalisation: an Extended Impact Assessment*, Informe para la Comisión Europea realizado por Steer Davies and Gleave.

STARKIE, D. (1984): “BR: Privatization Whitout Tears”, *Economic Affairs*, octubre/diciembre. También en BISHOP, J., KAY, J., y MAYER, C. (Eds.): *Privatization & Economic Performance*, Oxford University Press, Oxford, 1994, págs. 177-188.

Transport & Mobility Leuven (2005). *Assessment of the Contribution of the TEN and other Transport Policy Measures to the midterm Implementation of the White Paper on the European Transport Policy for 2010*. Leuven.

Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento es una aplicación de la ponencia, que con el mismo título, fue presentada en Madrid en el IX Congreso de Ingeniería del Transporte "CIT 2010", el 8 de julio de 2010. Esta ampliación detalla la metodología empleada para la obtención de los perfiles operacionales del ferrocarril español.

Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

En esta ponencia se presentan los resultados del estudio de las características que definen los “perfiles operacionales” del ferrocarril español. El objetivo principal es encontrar servicios representativos de cada uno de los tipos existentes para poder utilizarlos como patrón en diversos estudios sobre la operación de los trenes. El estudio se limita a trenes de viajeros y dentro de ellos se tratan por separado los trenes de media y larga distancia y los de cercanías.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de los servicios representativos puede ser útil en la estimación del consumo de energía y emisiones de los trenes y en cálculo de sus costes operacionales. Esta estimación es especialmente interesante en el caso de querer evaluar los consumos de energía del material móvil antes de su fabricación, realizando diferentes servicios y para establecer comparaciones entre diversos trenes, aislando el consumo de energía de la influencia de la infraestructura. Podrían también estos “perfiles operacionales” ayudar a un operador ferroviario a determinar los tiempos de viaje de sus servicios en función de las paradas o para calcular el parque necesario para una línea aún sin construir.

El alcance del estudio se limita a transporte de viajeros. Se han analizado por separado los trenes de larga distancia y media distancia y los trenes de cercanías.

Los resultados han sido empleados en los proyectos de investigación EnerTrans, en el que se estudia el consumo de los diferentes modos de transporte y ElecRail que tiene como objetivo analizar todas las formas de reducir el consumo del ferrocarril eléctrico, ambos subvencionados por el CEDEX. También han sido de utilidad en el proyecto “Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario” realizado en colaboración con el Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE).

2. METODOLOGÍA

Para la clasificación de los trenes y posterior determinación de patrones representativos se ha empleado una red neuronal de aprendizaje no supervisado, los mapas de Kohonen. La no supervisión consiste en que la red es capaz de descubrir por sí sola características, regularidades, correlaciones o categorías en los datos de entrada, y se obtengan de forma codificada la salida, es decir, un patrón que represente cada una de las categorías.

Los mapas de Kohonen (Isasi, 2004) son redes de neuronas topológicamente ordenadas que, frente a la presentación de un patrón n-dimensional compiten literalmente hasta que sólo una de ellas queda activada.

El mapa autoorganizado está compuesto por M neuronas, generalmente dispuestas en una rejilla cuadrada y conectadas según una relación de vecindad determinada.

Es de aprendizaje no supervisado y consiste en ajustar unos valores de pesos, de tal forma que cada neurona represente un patrón de estímulos (ejemplos) presentados o aprendidos. Las fases seguidas en este aprendizaje son:

1. *Inicialización de los pesos*: asignar a los pesos valores pequeños aleatorios.
2. *Muestreo*: escoger un ejemplo de estímulo a la red representante con una cierta probabilidad del modelo que se desea aprender la red.
3. *Similitud*: encontrar el índice ganador al pasar un ejemplo. Esto es, saber cual es la neurona ganadora o más parecida al estímulo introducido a la red. Normalmente se emplea una medida de distancia entre estímulos y vector de pesos o patrón de cada neurona del mapa.
4. *Actualización*: de los pesos de la neurona y sus vecinas según su grado de vecindad.
5. *Continuación*: ir al paso 2 hasta que no se experimenten cambios importantes en los pesos y por tanto, en el mapa.

La figura muestra la arquitectura de un mapa de Kohonen tipo.

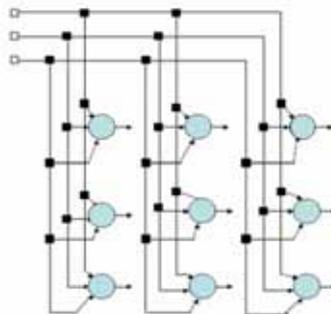


Fig. 1. Arquitectura de un mapa de Kohonen

3. TRENES DE LARGA DISTANCIA Y MEDIA DISTANCIA

Para la determinación de los trenes representativos de larga distancia y media distancia el conjunto de entrenamiento está constituido por los datos de marzo de 2010 de 1.033 trenes de Renfe Operadora de: alta velocidad-larga distancia (producto AVE), alta velocidad-media distancia (producto Avant), larga distancia convencional (productos Altaría, Diurno y Talgo), larga distancia-altas prestaciones (productos Euromed y Alvia), larga distancia-trenes nocturnos (productos Trenhotel y Estrella), media distancia convencional y media distancia-altas prestaciones (productos Regional Express y R-598).

Adicionalmente, se han empleado 300 trenes para la validación de los resultados.

3.1 Variables consideradas

Las variables que se consideran relevantes para la caracterización de los perfiles operacionales de los trenes son:

- *Recorrido total del tren*: longitud del recorrido expresada en kilómetros.
- *Paradas comerciales en 100 kilómetros*: para cada tren a partir de sus paradas comerciales se ha determinado el número de paradas comerciales en 100 kilómetros sin tener en cuenta la parada inicial ni la final.
- *Paradas técnicas en 100 kilómetros*: para cada tren a partir de sus paradas técnicas se ha determinado el número de paradas técnicas en 100 kilómetros. Se denominan paradas técnicas a aquellas que realiza el tren para cambiar de locomotora, paso por cambiadores de ancho en el caso de trenes autopropulsados, adelantamientos y cruces en vía única.
- *Velocidad media sin paradas*: es la velocidad del tren considerando sólo el tiempo que está en movimiento.

3.2 Determinación del tamaño del mapa

El tamaño óptimo del mapa es de 17x9 neuronas, el proceso de optimización empleado ha sido el de la SOM Toolbox para Matlab (Vesanto, 2000).

La siguiente figura muestra la calidad del ajuste, pueden visualizarse los centros de cada una de las neuronas (círculos) y el conjunto de entrenamiento (cruces).

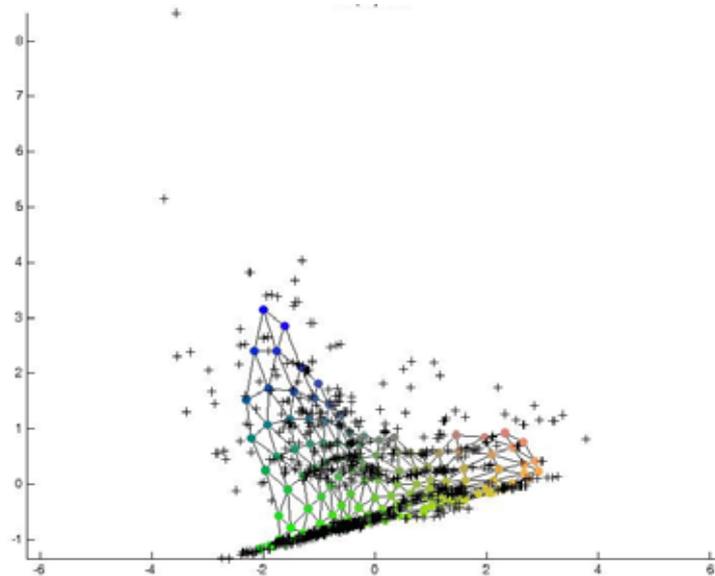


Fig. 2. Proyección del conjunto de entrenamiento y los centros de las neuronas

3.3 Influencia de las variables en el mapa

Se ha estudiado la aportación de cada una de las cuatro variables al mapa y como se observa en la figura, no existe correlación entre las mismas pues el aspecto de cada uno de los submapas es totalmente diferente.

Se aprecia que el rango de la variable kilómetros es de 36,4 a 990 kilómetros; la variable paradas comerciales en 100 kilómetros toma valores entre 0,138 y 16,6; la variable paradas

técnicas en 100 kilómetros entre $2,13 \times 10^{-6}$ y 2,17 y la velocidad media sin paradas está entre 60,8 y 215 km/h.

La homogeneidad cromática de la matriz de distancias entre neuronas (U-matrix) indica que la distribución de los trenes en el mapa es muy uniforme.

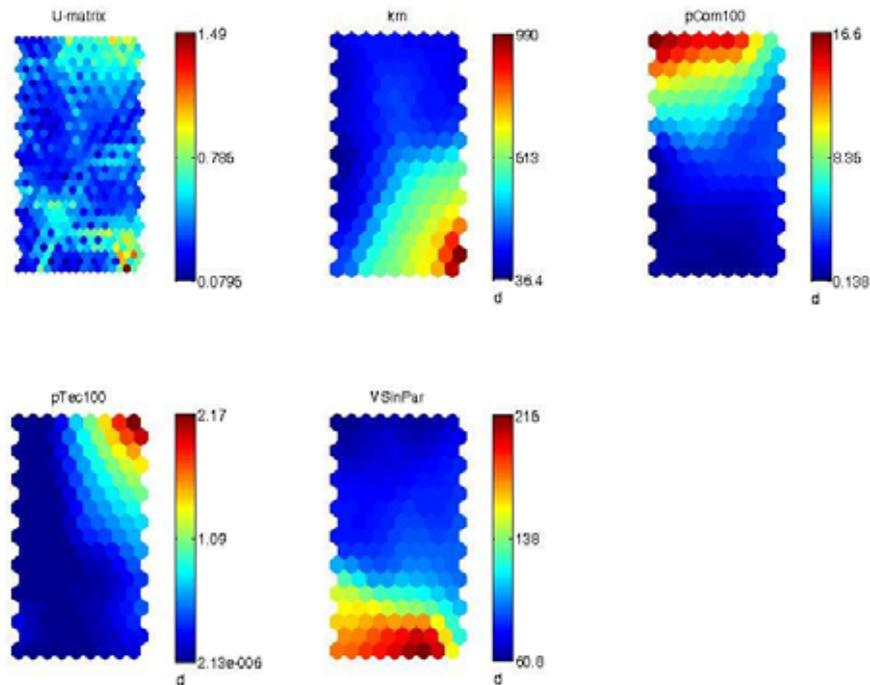


Fig. 3. Matriz de distancia y aportación de cada variable al mapa

3.4 Determinación de clusters

Una vez definido el mapa, y como paso previo a lo obtención de los servicios representativos, es necesario determinar grupos de neuronas con patrones semejantes que se corresponderán con los distintos servicios.

Una primera aproximación se tiene observando la distribución de los casos en el mapa. En la siguiente figura (parte izquierda) se aprecia el número de trenes que se ha ubicado en cada una de las neuronas y en la parte derecha el tipo de tren mayoritario en cada una de las neuronas. Recorriendo el mapa de arriba abajo se aprecia que en la parte superior se localizan los trenes de media distancia-convencional y media distancia-altas prestaciones y en la parte inferior a la izquierda los trenes de alta velocidad-media distancia (Avant), en el centro los trenes de alta velocidad-larga distancia (AVE) y a la derecha los trenes nocturnos.

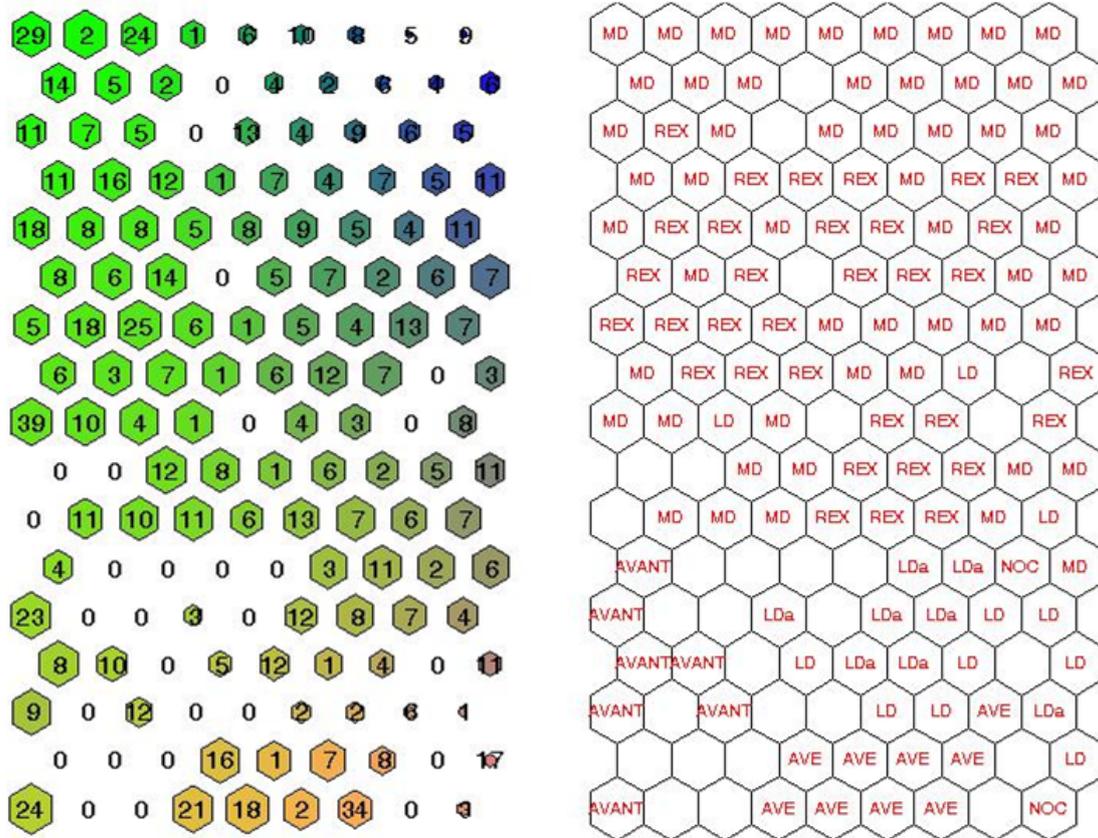


Fig. 4. Número de trenes en cada neurona y etiquetado automático de neuronas

Para determinar el número de clusters final se ha empleado el índice de Davies-Bouldin (Davies, 1978). Se ha limitado el número de iteraciones a 8 y dicho índice se minimiza para 7 clusters.

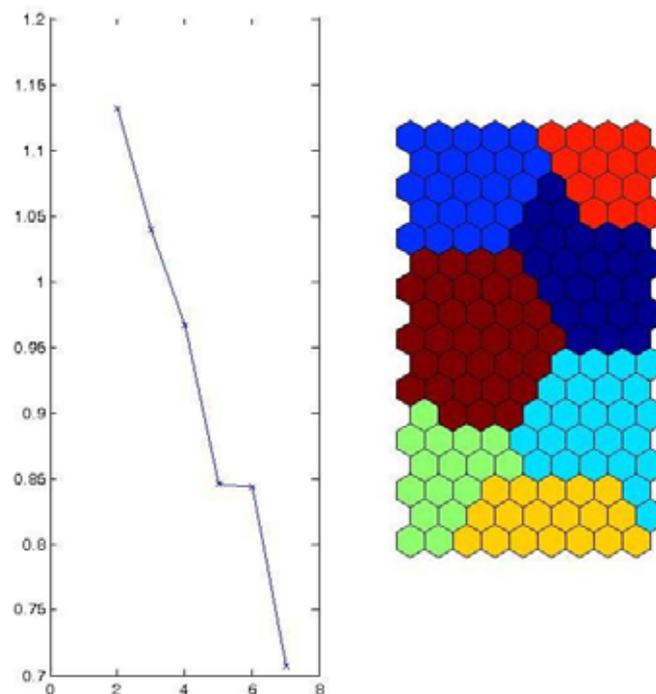


Fig. 5. Determinación de 7 clusters mediante el índice de Davies-Bouldin

Se muestran a continuación los patrones de cada una de las neuronas, representándose con barra roja el recorrido del tren; barra verde el número de paradas comerciales en 100 km; barra azul el número de paradas técnicas en 100 kilómetros y barra morada la velocidad media sin paradas.

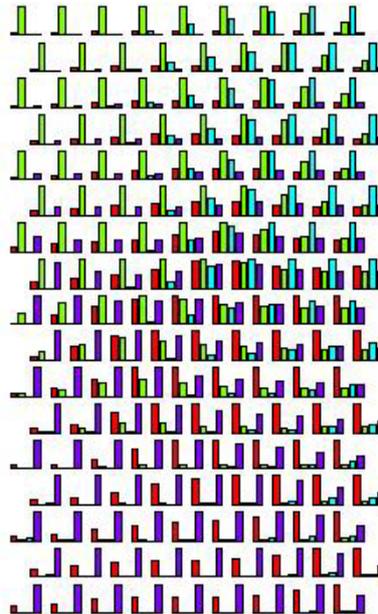


Fig. 6. Patrones de las neuronas

Analizando conjuntamente los clusters definidos y los patrones de cada una de las neuronas se han etiquetado cada uno de los clusters:

- *MD1*: trenes que presentan un recorrido corto, número medio de paradas comerciales, alto número de paradas técnicas y baja velocidad media sin paradas. El alto número de paradas técnicas puede indicar que se trata de trenes de media distancia que realizan todo o parte de su recorrido en vía única.
- *MD2*: trenes con recorrido corto, alto número de paradas comerciales, bajo número de paradas técnicas y baja velocidad media sin paradas. Se trata por tanto de trenes de media distancia que circulan por vía doble.
- *REX1*: trenes con recorrido corto, número de paradas comerciales alto, bajo número de paradas técnicas y velocidad media sin paradas baja pero superior a la de los trenes de MD1 y MD2. Servicios regionales de altas prestaciones.
- *REX2*: trenes con recorrido corto, número de paradas comerciales alto, alto número de paradas técnicas y velocidad media sin paradas baja pero superior a la de los trenes de MD1 y MD2. El alto número de paradas técnicas puede indicar que se trata de trenes que realizan todo o parte de su recorrido en vía única. Servicios regionales de altas prestaciones.
- *LD*: trenes con un recorrido largo, bajo número de paradas comerciales y técnicas a los y velocidad media sin paradas media. Trenes de larga distancia convencional y altas prestaciones.
- *Nocturnos*: trenes con un recorrido muy largo, bajo número de paradas comerciales y técnicas y velocidad media sin paradas media-alta. Trenes nocturnos.
- *Avant*: trenes con un recorrido medio, bajo número de paradas comerciales y técnicas y velocidad media sin paradas alta. Trenes de alta velocidad-media distancia.
- *AVE*: trenes con un recorrido largo, bajo número de paradas comerciales y técnicas y velocidad media sin paradas alta. Trenes de alta velocidad-larga distancia.

Así pues el mapa queda etiquetado de la siguiente forma:

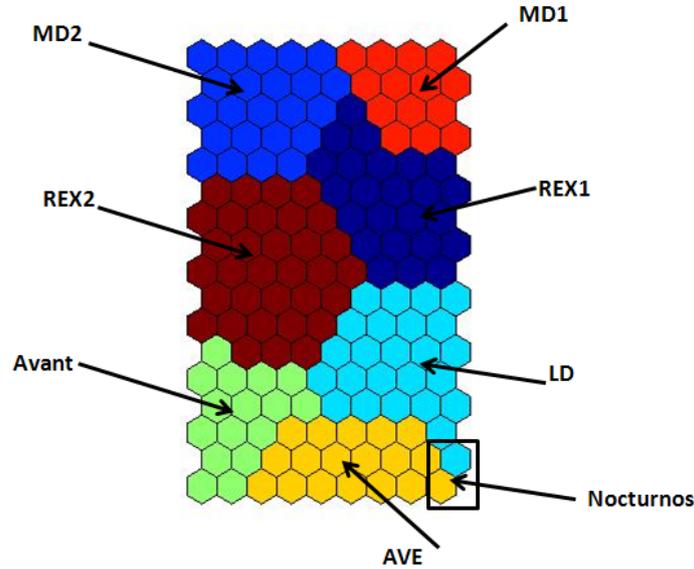


Fig. 7. Etiquetado de los clusters

Para cada uno de los tipos de trenes definidos se muestran a continuación los valores máximos, mínimos, medios y la desviación típica de las cuatro variables (recorrido, paradas comerciales en 100 km, paradas técnicas en 100 km y velocidad media sin paradas).

Tabla 1. Valores máximos, mínimos, medios y desviación típica de cada una de las variables para los ocho tipos de trenes definidos

<i>MD1</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)	<i>MD2</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	161,29	14,61	2,17	82,95	<i>Máximo</i>	197,92	16,57	0,79	76,27
<i>Mínimo</i>	127,34	3,92	1,03	64,81	<i>Mínimo</i>	84,24	7,69	0,00	60,80
<i>Media</i>	144,60	8,59	1,46	73,16	<i>Media</i>	142,00	11,69	0,16	69,93
<i>Desv. tip</i>	9,94	3,25	0,36	5,78	<i>Desv. tip</i>	33,70	2,73	0,24	4,46

<i>REX1</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)	<i>REX2</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	376,31	9,88	1,15	90,64	<i>Máximo</i>	320,69	6,68	0,35	115,88
<i>Mínimo</i>	154,93	2,90	0,38	72,16	<i>Mínimo</i>	36,40	0,62	0,00	78,70
<i>Media</i>	210,02	4,70	0,69	83,58	<i>Media</i>	166,49	3,30	0,05	87,61
<i>Desv. tip</i>	56,41	2,05	0,20	5,00	<i>Desv. tip</i>	76,61	1,85	0,10	9,12

Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos

<i>LD</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	829,48	3,07	0,60	141,55
<i>Mínimo</i>	374,21	0,67	0,03	92,05
<i>Media</i>	519,04	1,77	0,22	108,74
<i>Desv. tip</i>	108,23	0,73	0,16	15,30

<i>Noctur.</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	989,87	1,38	0,25	152,73
<i>Mínimo</i>	927,89	1,04	0,19	123,27
<i>Media</i>	958,88	1,21	0,22	138,00
<i>Desv. tip</i>	43,83	0,24	0,04	20,83

<i>Avant</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	418,72	0,99	0,17	178,64
<i>Mínimo</i>	94,41	0,14	0,00	127,19
<i>Media</i>	217,13	0,51	0,05	156,35
<i>Desv. tip</i>	90,96	0,21	0,04	16,02

<i>AVE</i>	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
<i>Máximo</i>	806,05	0,93	0,23	214,60
<i>Mínimo</i>	408,65	0,25	0,00	155,01
<i>Media</i>	555,17	0,48	0,07	186,29
<i>Desv. tip</i>	110,55	0,19	0,07	17,00

3.5 Determinación de los trenes representativos

Una vez definidos y etiquetados los clusters, se han seleccionado los trenes cuyas características son más similares a los patrones de estos en función de la distancia euclídea. Se concluye que el tren representativo de los servicios MD1 es el Regional Ourense-Puebla de Sanabria; el de MD2 el Regional León-Ponferrada; el de REX1 el Regional Express Sevilla-Jaén; el de REX2 el R598 Ourense-Coruña; el de LD el Alaria Cartagena-Madrid Chamartín; el de Nocturnos el Estrella Gijón-Barcelona; el de Avant el Avant Valladolid-Madrid Chamartín y el de AVE el AVE Madrid-Málaga.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las variables para los trenes representativos.

Tabla 2. Características de los trenes tipo

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100 km	Paradas técnicas en 100 km	Velocidad sin paradas (km/h)
MD1	Regional Ourense - Puebla de Sanabria	142,00	9,86	1,41	67,19
MD2	Regional León - Ponferrada	128,60	11,66	0,00	71,58
REX1	Regional Express Sevilla - Jaén	263,70	3,03	0,38	91,04
REX2	R598 Ourense - Coruña	193,70	2,58	0,00	89,95
LD	Alaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
NOC	Estrella Gijón - Barcelona	1.023,40	1,86	0,20	101,70
AVANT	Avant Valladolid - Mad. Chamartín	178,40	0,56	0,00	156,95
AVE	AVE Madrid - Málaga	512,50	0,59	0,00	185,46

3.5.1 Agrupación de cluster

Aún a riesgo de que la clasificación pierda rigor, puede resultar interesante disminuir el número de trenes representativos, realizando agrupaciones de segundo y tercer nivel.

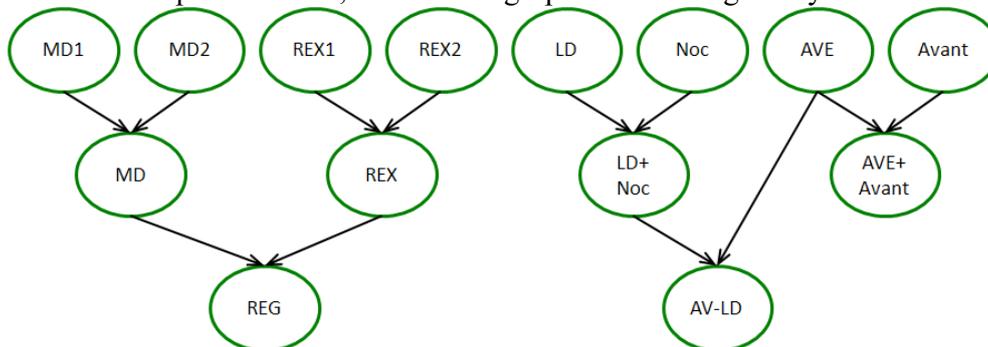


Fig. 8. Agrupación de los trenes representativos

A continuación se muestran los trenes tipo para las agrupaciones de segundo nivel (MD, REX y LD+NOC) y tercer nivel (REG y AV LD).

Tabla 3. Características de los trenes tipo

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100 km	Paradas técnicas en 100 km	Velocidad sin paradas (km/h)
MD1	Regional Ourense - Puebla de Sanabria	142,00	9,86	1,41	67,19
MD2	Regional León - Ponferrada	128,60	11,66	0,00	71,58
MD	Regiona Barcelona - Mora la N.	158,30	10,11	0,63	69,23
REX1	Regional Express Sevilla - Jaén	263,70	3,03	0,38	91,04
REX2	R598 Ourense - Coruña	193,70	2,58	0,00	89,95
REX	Regional Soria - Mad. Chamartín	247,20	3,64	0,40	86,33
REG	Regional Express Valencia - Tortosa	192,30	6,24	0,52	76,92
LD	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
NOC	Estrella Gijón - Barcelona	1.023,40	1,86	0,20	101,70
LD+NOC	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
AVE	AVE Madrid - Málaga	512,50	0,59	0,00	185,46
AV LD	Altaria Madrid P.A. - Granada	577,60	0,35	0,17	138,51
AVANT	Avant Valladolid - Mad. Chamartín	178,40	0,56	0,00	156,95

Otra agrupación que puede resultar de interés es la de los trenes AVE con los Avant, para encontrar el tren representativo de los servicios de alta velocidad tanto de larga como de media distancia.

Tabla 4. Características de los trenes tipo de alta velocidad (media y larga distancia)

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
AV	Avant Málaga-Sevilla S.J.	295,60	1,01	0,00	168,59

4. TRENES DE CERCANÍAS

Para la determinación de los trenes representativos de cercanías se ha partido de los datos de 4213 trenes de Renfe Cercanías correspondientes al mes de marzo de 2010.

Adicionalmente, se han empleado 200 trenes para la validación de los resultados.

4.1 Variables consideradas

Al igual que en el estudio de los trenes de larga distancia y media distancia, las variables que se consideran relevantes para la caracterización de los trenes son:

- *Recorrido total del tren.*
- *Paradas comerciales en 100 kilómetros.*
- *Paradas técnicas en 100 kilómetros.*
- *Velocidad media sin paradas.*

4.2 Determinación del tamaño del mapa

El tamaño óptimo del mapa es de 22x15 neuronas. La siguiente figura muestra la calidad del ajuste, pueden visualizarse los centros de cada una de las neuronas (círculos) y el conjunto de entrenamiento (cruces).

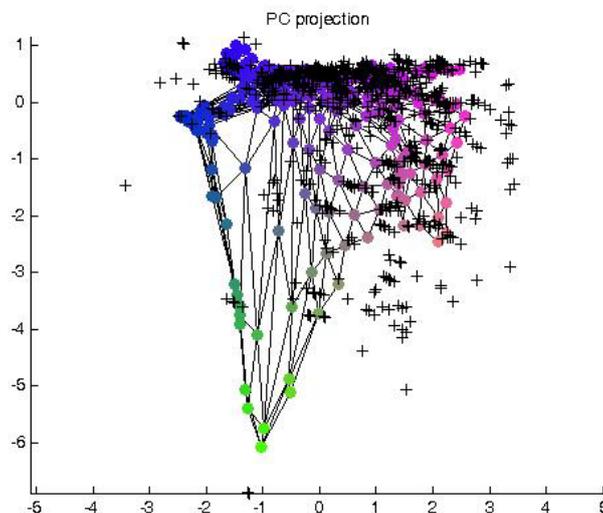


Fig. 9. Proyección del conjunto de entrenamiento y los centros de las neuronas

4.3 Influencia de las variables en el mapa

Se ha estudiado la aportación de cada una de las cuatro variables al mapa y como se observa en la figura, no existe correlación entre las mismas pues el aspecto de cada uno de los submapas es totalmente diferente.

Se aprecia que el rango de la variable kilómetros es de 6,8 a 131 kilómetros; la variable paradas comerciales en 100 kilómetros toma valores entre 10,9 y 89,7; la variable paradas técnicas en 100 kilómetros entre 0 y 8,38 y la velocidad media sin paradas está entre 35,6 y 77,5 km/h.

La homogeneidad cromática de la matriz de distancias entre neuronas (U-matrix) indica que la distribución de los trenes en el mapa es uniforme.

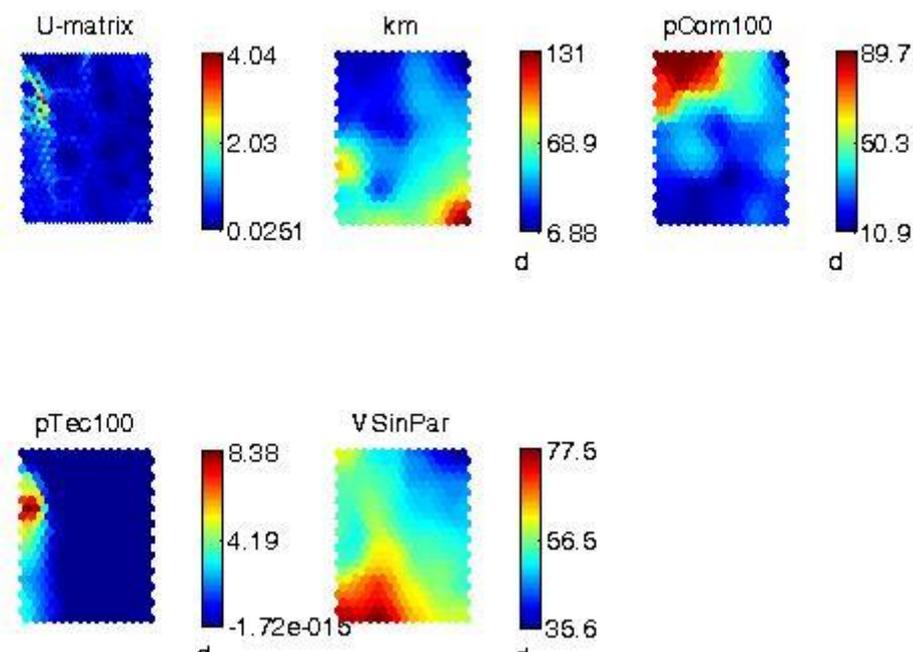


Fig. 10. Matriz de distancia y aportación de cada variable al mapa

4.4 Determinación de clusters

Se muestra a continuación la distribución del conjunto de trenes en el mapa.

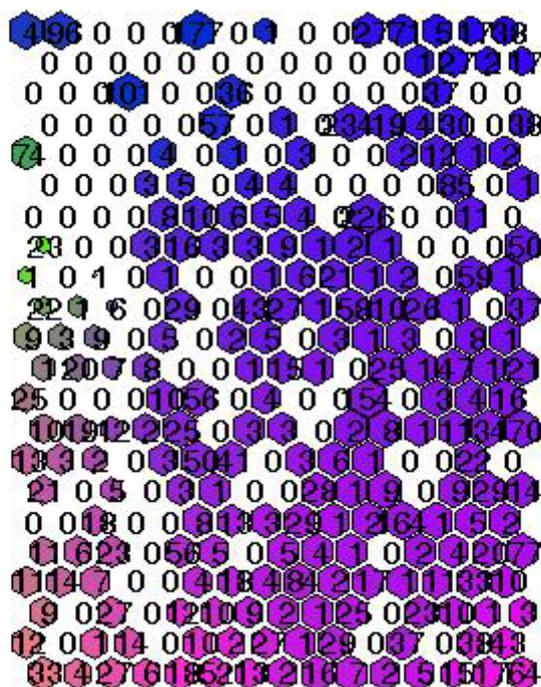


Fig. 11. Número de trenes en cada neurona

Una vez definido el mapa, y como paso previo a lo obtención de los servicios representativos, es necesario determinar grupos de neuronas con patrones semejantes que se corresponderán con los distintos servicios. Como para el caso de servicios de larga distancia y media distancia, se ha empleado el índice de Davies-Bouldin, limitándose el número de iteraciones a 7 y se observa que dicho índice adquiere el valor mínimo para 5 clusters.

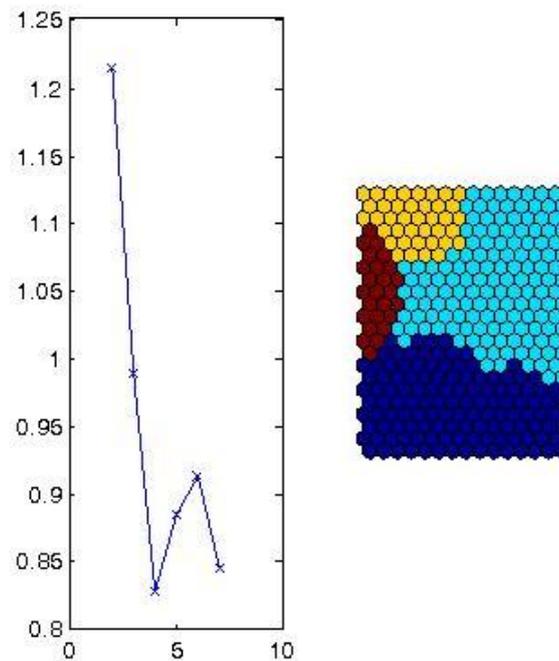


Fig. 12. Determinación de 5 clusters mediante el índice de Davies-Bouldin

Se muestran a continuación los patrones de cada una de las neuronas, representándose en rojo el recorrido del tren; en verde el número de paradas comerciales en 100 km; en azul el número de paradas técnicas en 100 kilómetros y en morado la velocidad media sin paradas.

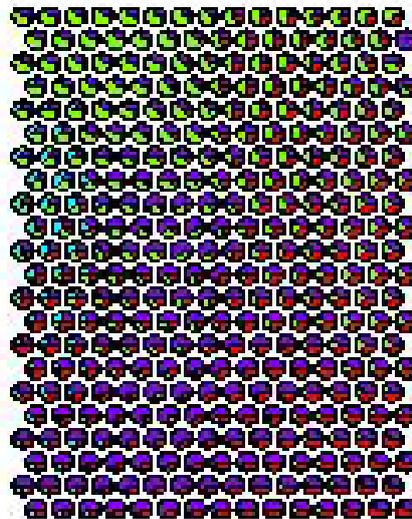


Fig. 13. Patrones de las neuronas

Analizando conjuntamente los clusters definidos y los patrones de cada una de las neuronas se han etiquetado cada uno de los clusters:

- *CER1*: trenes con una longitud de recorrido media-alta, bajo número de paradas comerciales y técnicas y velocidad media sin paradas alta.
- *CER2*: trenes de recorrido medio, número de paradas comerciales medio, muy pocas paradas técnicas y velocidad media sin paradas media.
- *CER3*: trenes con una longitud de recorrido baja, alto número de paradas comerciales, número de paradas técnicas medio-bajo y velocidad sin paradas media.
- *CER4*: trenes con un recorrido medio, número de paradas comerciales medio, alto número de paradas técnicas y velocidad media sin paradas media.

Así pues el mapa queda etiquetado de la siguiente forma:

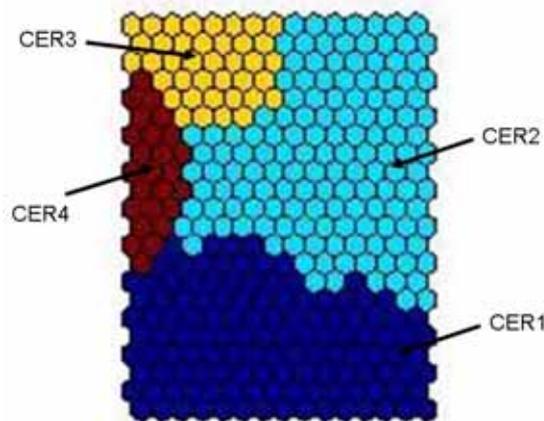


Fig. 14. Etiquetado de los clusters

Para cada uno de los tipos de trenes de cercanías se muestran a continuación los valores representativos de las cuatro variables (patrones).

Tabla 5. Valores representativos de las variables para los cuatro tipos de trenes de cercanías

	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
CER1	62,89	20,78	0,61	62,91
CER2	37,84	34,38	0,06	50,29
CER3	17,46	80,03	0,24	53,87
CER4	34,68	49,57	5,06	53,53

4.5 Determinación de los trenes representativos

Una vez definidos y etiquetados los clusters, se han seleccionado los trenes cuyas características están más próximos a los patrones, en función de la distancia euclídea.

Se concluye que el tren representativo de los servicios CER 1 es el L'Alcudia-Valencia Nord; el de CER2 el de El Caleyó-San Juan de Nieva; el de CER3 el de Muskiz-Bilbao y el de CER4 el de Santander-Renedo.

La tabla muestra las características de los trenes representativos.

Tabla 6. Características de los trenes tipo

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
CER1	L'Alcudia-Valencia Nord	62,40	17,63	0,00	63,46
CER2	El Caleyó-S.Juan de N.	38,40	36,46	0,00	50,09
CER3	Muskiz-Bilbao	21,20	75,47	0,00	53,45
CER4	Santander-Renedo	19,40	36,08	5,15	53,39

5. CONCLUSIONES

De lo expuesto pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La determinación de los servicios representativos es de utilidad para la estimación del consumo de energía y emisiones de los servicios de tren y para el cálculo de sus costes operacionales.
2. Los parámetros que definen los servicios son el recorrido del tren, la distancia entre paradas comerciales, la distancia entre paradas técnicas y la velocidad media en movimiento, sin contar el tiempo de parada.
3. Mediante una red neuronal de aprendizaje no supervisado y el índice de Davies-Bouldin es posible determinar agrupaciones de trenes en función de sus características.
4. Para los servicios de larga distancia y media distancia se han diferenciado ocho tipos: MD1, MD2, REX1, REX2, LD, Nocturnos, Avant y AVE. Para los servicios de cercanías se han diferenciado cuatro tipos: CER1, CER2, CER3 y CER4.
5. Los trenes que se han identificado como representativos de cada uno de los tipos de larga y media distancia son:

Tabla 7. Trenes tipo de los servicios de larga y media distancia

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100 km	Paradas técnicas en 100 km	Velocidad sin paradas (km/h)
MD1	Regional Ourense - Puebla de Sanabria	142,00	9,86	1,41	67,19
MD2	Regional León - Ponferrada	128,60	11,66	0,00	71,58
MD	Regiona Barcelona - Mora la N.	158,30	10,11	0,63	69,23
REX1	Regional Express Sevilla - Jaén	263,70	3,03	0,38	91,04
REX2	R598 Ourense - Coruña	193,70	2,58	0,00	89,95
REX	Regional Soria - Mad. Chamartín	247,20	3,64	0,40	86,33
REG	Regional Express Valencia - Tortosa	192,30	6,24	0,52	76,92
LD	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
NOC	Estrella Gijón - Barcelona	1.023,40	1,86	0,20	101,70
LD+NOC	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
AVE	AVE Madrid - Málaga	512,50	0,59	0,00	185,46
AV LD	Altaria Madrid P.A. - Granada	577,60	0,35	0,17	138,51
AVANT	Avant Valladolid - Mad. Chamartín	178,40	0,56	0,00	156,95

6. Los trenes que se han identificado como representativos de los servicios de cercanías son:

Tabla 8. Trenes tipo de los servicios de cercanías

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
CER1	L'Alcudia-Valencia Nord	62,40	17,63	0,00	63,46
CER2	El Caleyó-S.Juan de N.	38,40	36,46	0,00	50,09
CER3	Muskiz-Bilbao	21,20	75,47	0,00	53,45
CER4	Santander-Renedo	19,40	36,08	5,15	53,39

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAVIES, D. L.; BOULDIN, D. W. (1978). A cluster separation measure. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence v2 i1*, pp. 224–227.

ISASI VIÑUELA, P., GALVÁN LEÓN, I.M. (2004). *Redes de neuronas artificiales. Un enfoque práctico*. Pearson Education, Madrid.

VESANTO, J., HIMBERG, J., ALHONEIMI, E., PARHANKANGAS, J. (2000). *SOM Toolbox for Matlab 5*. Helsinki University of Technology, Helsinki.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Miguel Ángel Sanz Bobi y José Estrada Guijarro por su asesoramiento técnico y aportaciones y a Ignacio González Franco por su apoyo.

Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de la ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto Barreiro Martínez

Investigador colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Técnico Junior de Instalaciones y Sistemas Ferroviarios de TIFSA.

El presente documento es una versión actualizada y ampliada del artículo publicado en la revista “Anales de mecánica y electricidad” de la Asociación de Ingenieros del ICAI en el número septiembre – octubre de 2010

Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de la ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto Barreiro Martínez

Investigador colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Técnico Junior de Instalaciones y Sistemas Ferroviarios de TIFSA.

RESUMEN

En las líneas ferroviarias los postes de la electrificación siempre se han ubicado en el exterior de la doble vía. Sin embargo, su ubicación en el centro de la doble vía podría tener claras ventajas, especialmente en las líneas de alta velocidad de tráfico mixto con trenes de viajeros a 300 km/h y de mercancías. En este artículo se analiza preliminarmente la problemática que se plantea en el cruce de trenes en tales líneas y las posibles soluciones. Se propone la alternativa de la nueva ubicación de los postes (en dos versiones, con los mismos postes para las dos catenarias y con postes diferentes para cada catenaria). Se analizan ventajas e inconvenientes de la ubicación propuesta y se hace un somero análisis de la viabilidad técnica de la alternativa. La posibilidad que aquí se enuncia será analizada con detalle en un proyecto de investigación.

1. INTRODUCCIÓN

La circulación simultánea de trenes de alta velocidad (por encima de los 250 km/h) y de mercancías convencionales (a velocidades de 100/120 km/h) es una exigencia de racionalidad para la optimización de los recursos públicos y para la mejora de la eficiencia del sistema de transporte⁴.

La troncalidad de la red.- Ello es así porque el carácter troncal de la red española de alta velocidad hace que en las líneas capilares situadas en la periferia nunca se puedan alcanzar los niveles de tráfico necesarios para justificar en términos económico-sociales la construcción de una línea de alta velocidad. En la periferia de la península puede haber una vía por cada ocho vías que salen de Madrid en la correspondiente línea troncal, que se ramifica en líneas capilares cuya demanda potencial está limitada por la capacidad en el tramo troncal común.

⁴ Una detallada descripción de las prácticas europeas de tráfico mixto “trenes de alta velocidad+ mercancías” y de las repercusiones técnicas, comerciales y económicas de este tipo de explotación puede verse en los capítulos 9.5 y 9.5 del libro “Alta Velocidad en el Ferrocarril” del profesor López Pita (Ed. Comsa Emte, 2010)



Fig. 1. Estructura de la red española de alta velocidad. Puede apreciarse cómo los tramos troncales próximos a Madrid el tráfico que discurre por una línea con dos vías se ramifica hasta por en ocho líneas con 16 vías en la periferia

Fuente: Elaboración propia. Cartografía: Luis E. Mesa

Por otra parte, en estos tramos “capilares periféricos”, la línea ferroviaria convencional preexistente normalmente encuentra grandes dificultades para salvar las zonas montañosas, por lo que suele presentar trazados obsoletos, de difícil mejora y que resultan poco eficientes para el transporte (son, por ejemplo, los casos de las rampas de Pajares, Reinosa, Brañuelas, Orduña, Almería, etc.) Además, en otros casos, como en el Norte de Catalunya y en el País Vasco, la línea de alta velocidad (por ser de ancho de vía estándar) ofrece a los trenes internacionales de mercancías la ventaja adicional de hacer innecesario el cambio de ancho para pasar a la red francesa.

Todo ello permite afirmar que habrá muchos tramos en los que los trenes de mercancías podrían circular por líneas de alta velocidad con mejora de su competitividad (con menores costes de explotación, menor consumo de energía y tiempos de viaje reducidos). Además, así se emplearía la capacidad ociosa de los tramos periféricos capilares y se complementarían a los trenes de viajeros para conseguir el nivel de uso de la línea que justifique su construcción desde el punto de vista económico-social.

Este tráfico mixto no será posible (ni necesario) en muchas líneas troncales cerca de Madrid en las que el número de trenes de viajeros será muy grande y donde además existen itinerarios alternativos para los trenes de mercancías en la red convencional. Sin embargo, en muchas líneas capilares de acceso a la periferia peninsular (donde el tráfico de viajeros es necesariamente menor y donde hay muchas dificultades para construir nuevos trazados), la coexistencia del tráfico no solo es posible y deseable, sino que es la única forma de rentabilizar económica y socialmente la construcción de estas líneas “periféricas” de alta velocidad.

Tipos de tráfico mixto.- El transporte de mercancías en líneas de alta velocidad puede hacerse en trenes “ligeros”, semejantes a los de viajeros, tanto para el transporte de mercancías urgentes y paquetería, como para el transporte de vehículos (como es el caso de trenes que transportan coches y camiones, acompañados o no por sus conductores).

Hay otro tipo de tráfico mixto que es el que se producirá cuando en una misma línea circulen simultáneamente trenes de viajeros a 250 o 300 km/h y además trenes de mercancías “convencionales” a velocidades de 100 o 120 km/h. A este tipo de tráfico mixto es al que se dedica atención en este artículo.

La compatibilidad de los tráficos (viajeros en alta velocidad y mercancías convencionales) en la misma línea se puede conseguir encaminando los trenes de mercancías por la noche, y los de viajeros por el día. Pero ello no siempre es posible: o bien porque así no se llegue a conseguir la suficiente capacidad para los trenes de mercancías; o bien porque los horarios que necesitan los clientes de mercancías no sean totalmente compatibles con esta estrategia; o bien, finalmente, porque sea necesaria una “banda de mantenimiento” que reduce sensiblemente la capacidad de circulación de los trenes por la noche. En todos estos casos, debe estudiarse la posibilidad de compatibilizar en ciertos segmentos horarios (que desde luego no serían en las horas-punta tráfico de viajeros) los trenes de viajeros en alta velocidad con los trenes de mercancías.

Tabla 1. Diversos posibles tipos de tráfico mixto de mercancías y alta velocidad en la misma línea y panorámica de las medidas necesarias para hacerlos posible en condiciones de eficiencia y seguridad

→ Coexistencia con trenes de viajeros	En la misma banda horaria que trenes de viajeros hasta 220 km/h	En diferentes bandas horarias que los trenes de viajeros más de 220 km/h	En la misma banda horaria que trenes de viajeros a más de 220 km/h
Tipo de tren de mercancías			
Trenes de mercancías ligeras	No son precisas medidas especiales	No son precisas medidas especiales	No son precisas medidas especiales
Trenes de mercancías convencionales aceleradas	No son precisas medidas especiales	No son precisas medidas especiales	Son necesarias algunas medidas especiales
Trenes de mercancías convencionales	No son precisas medidas especiales	Se precisan medidas de vigilancia y control	Son necesarias medidas especiales

Medidas “convencionales” para el tráfico mixto.- Para hacer posible la compatibilidad de trenes lentos y rápidos en la misma línea, suelen tenerse en cuenta en el diseño de las líneas dos condiciones: Un trazado en planta con mayores radios de curva (que permite reducir el peralte para la misma velocidad de los trenes de viajeros y, en consecuencia, minimizar el “exceso de peralte” de los trenes de mercancías); y establecer los “apartaderos” (en los cuales los trenes de mercancías se desvían de la vía general para ser adelantados por los trenes rápidos de viajeros) más próximos entre si.

Estas actuaciones, siendo necesarias, no son suficientes para permitir la compatibilidad segura y eficiente de los trenes de alta velocidad con los de mercancías convencionales en el mismo segmento horario. A nuestro juicio, y desde el punto de vista de la explotación, son necesarias además otras medidas complementarias si se desea no tener que reducir de forma significativa la velocidad de los trenes de viajeros por la coexistencia con trenes de mercancías.

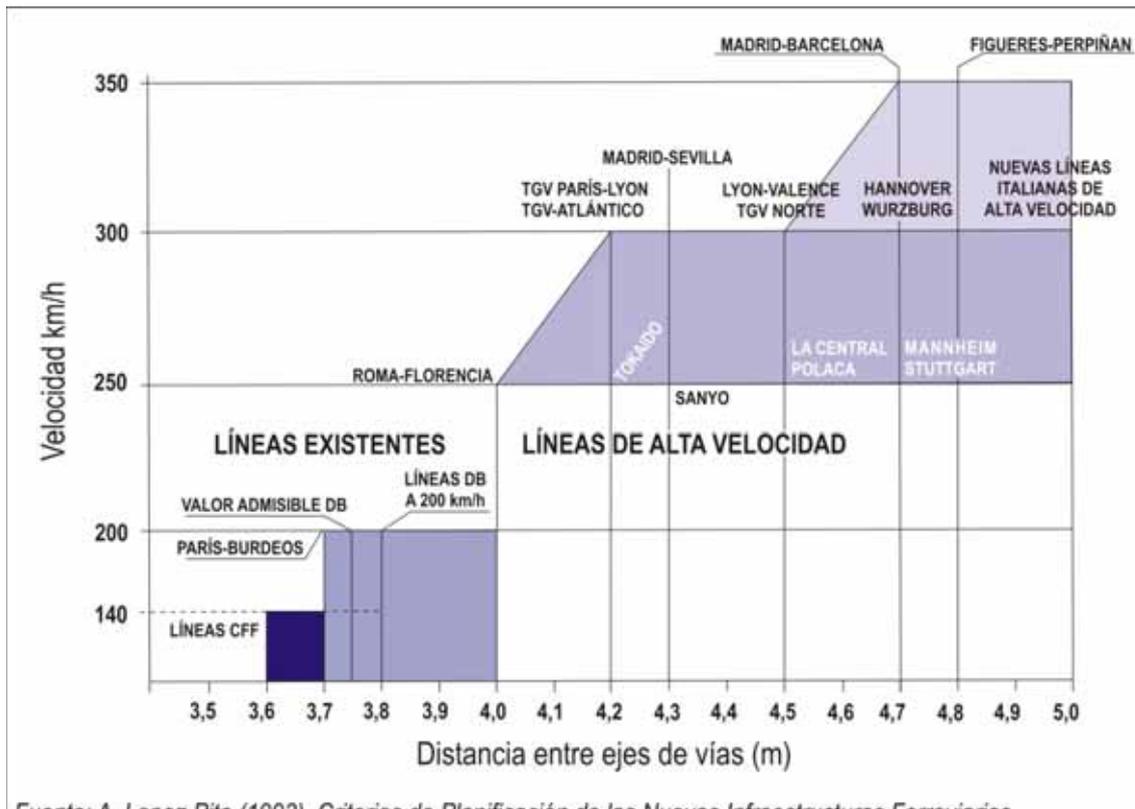
2. MEDIDAS PARA CONSEGUIR EL TRÁFICO MIXTO SEGURO Y EFICIENTE

Para hacer posible el tráfico simultáneo (de forma eficiente y segura) de trenes de alta velocidad y de mercancías convencionales son necesarias diversas medidas adicionales que se refieren a la distancia entre las vías en la vía doble (entreeje); al número y configuración de las vías en los puntos de adelantamiento, así como a otros dispositivos complementarios de seguridad. En este artículo se analiza de forma especial lo relativo a la distancia entre las vías (aumento del entreeje), que es el más relevante. El resto de las medidas adicionales que se estiman necesarias se enuncian someramente, y un análisis más detallado puede encontrarse en García Álvarez (2010).

2.1 Aumento del entreeje

Para lograr mayor seguridad en el cruce es necesario disponer de un gran entreeje en los tramos en los se deban producir cruces con trenes de mercancías a velocidades relativas de más de 350 km/h (por ejemplo, a más de 250 km/h el tren de viajeros y de 100 km/h el de mercancías). Debe tenerse en cuenta que los trenes de mercancías presentan en ocasiones cargas, puertas o toldos fuera de gálibo; y que se producen desprendimientos de la carga (en España hasta contendedores vacíos han volado de su plataforma); o que (con más frecuencia de la deseada) hay vagones que circulan descarrilados durante kilómetros en la cola del tren de mercancías sin que el maquinista llegue a apercibirse. También hay que resaltar la importancia que tienen las fuerzas aerodinámicas que se producen en el cruce de trenes sobre la peculiar resistencia estructural de los trenes de mercancías, que ha sido estudiado por Lozano (2010).

En todos estos casos, cuanto mayor sea el “entreeje” (definido como la distancia entre los ejes de las dos vías en una línea de vía doble), hay menor probabilidad de colisión o de impacto físico o aerodinámico. En supuesto de que un tren descarrile hacia el lado interior de la vía doble (lo que tiene, en caso de descarrilamiento, una probabilidad de ocurrencia del 50%) es muy probable la colisión lateral del tren descarrilado con un tren que circula en sentido contrario por la vía contigua. Debe tenerse en cuenta que en la mayor parte de los casos de descarrilamiento, una vez que las pestañas de las ruedas de un bogie han remontado el carril, se produce un desplazamiento lateral de los ejes, del bogie y de la caja hasta el punto en que las ruedas del otro lado alcanzan el carril contrario por la parte interior. A partir de ese punto, el carril les hace de “guía” por su parte interior, impidiendo un mayor desplazamiento lateral.



Fuente: A. López Pita (1993). Criterios de Planificación de las Nuevas Infraestructuras Ferroviarias

Fig. 2. Valores adoptados para el entreeje en líneas de diversas velocidades

Fuente: López Pita (1993).

Por ello, resulta especialmente importante alcanzar un valor del entreeje tal que, cuando un vehículo descarrilado hacia el lado interior de la vía doble se mueve con las ruedas guiadas por el interior del carril contrario, la caja del vehículo no llegue a invadir el galibo de la vía contigua. Para lograr este objetivo deben alcanzarse valores de entreeje de al menos 5,20 o 5,30 metros.

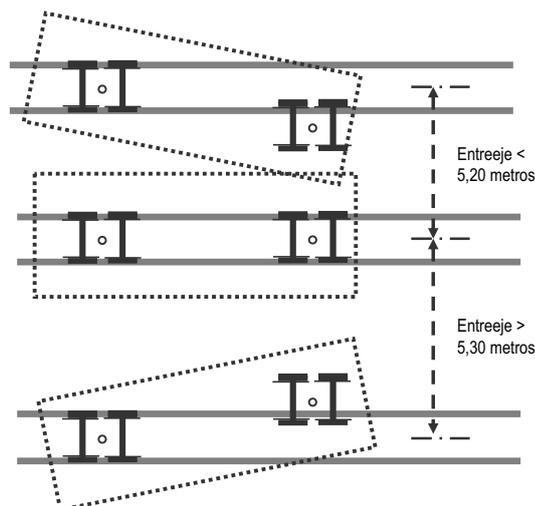


Fig. 3. A partir de ciertos valores del entreeje (alrededor de 5,20-5,30 metros) cuando un tren descarrilado lleva una rueda guiada por el carril contrario, puede no invadir el galibo de la vía contraria, pero con entreejes menores siempre se produce la invasión del galibo

Fuente: Elaboración propia

En suma, un entreeje de valor elevado tiene una gran importancia para incrementar la seguridad en la circulación y el confort de los viajeros. En concreto, un mayor entreeje:

1. Reduce la probabilidad de impacto con el tren de viajeros de cualquier elemento fuera del gálibo del tren de mercancías
2. Reduce las posibilidades de impacto de un tren de viajeros (o de mercancías) con un tren descarrilado en la otra vía (de viajeros o de mercancías)
3. Reduce la presión aerodinámica en el cruce de los trenes de viajeros a alta velocidad (que se producen hasta 700 km/h de velocidad relativa) mejorando el confort de los viajeros.
4. Aumenta la seguridad de los trabajadores cuando están manteniendo una de las vías mientras circulan trenes por la otra (actualmente esto es posible con una limitación de velocidad a 160 km/h).
5. Hace posible, con un adecuado diseño, que se pueda circular con tracción eléctrica por una de las vías mientras se trabaja en la catenaria de la otra (lo que con la disposición actual es complicado por la distancia entre conductores y por los efectos de inducción de la corriente alterna de una vía sobre la catenaria de la otra).

2.2 Otras medidas necesarias para hacer posible el tráfico mixto simultáneo

Número y disposición de vías en los apartaderos

Normalmente los puntos de adelantamiento (apartaderos) en las líneas de alta velocidad se diseñan con una vía de apartado a cada uno de los lados de las vías generales. Esta disposición puede ser aceptable (aunque desde luego no es la más eficiente por la posición lateral de la vías) para el tráfico normal de trenes de viajeros, pero no es la más adecuada para hacer posible tráfico mixto. En este caso es necesario disponer de un número adecuado de vías de apartado en los puestos de adelantamiento.

Debe tenerse en cuenta que en estas líneas los trenes de mercancías deben explotarse “en baterías” de varios trenes del mismo tipo seguidos entre si. Como consecuencia de esta necesidad en cuanto al diseño de los horarios, cada “apartadero” debe tener tantas vías de apartado como trenes forman la batería.

Además, las vías de apartado en los apartaderos deben disponerse (al menos una parte) en el centro de las vías generales para disminuir el número total de vías de apartado necesarias, ya que el tráfico de mercancías en un sentido suele estar desplazado en el tiempo con respecto al otro sentido. Las vías de apartado en cada uno de los sentidos son todas ellas utilizadas a la vez (por cada uno de los trenes de la batería) pero el tiempo en cada vía es utilizada es relativamente corto y por ello el número de vías de apartado necesarias para el conjunto de los dos sentidos (si, por ejemplo, se sitúan en el centro) es menor que la suma del número de vías necesarias para cada uno de los dos sentidos

Las vías de apartado deben tener suficiente longitud, no solo para poder apartar trenes largos de mercancías, sino para lograr que la deceleración de éstos se produzca sobre la vía de apartado en lugar de realizarlo sobre la vía general. La velocidad de paso por la vía desviada debe ser adecuada a este objetivo, ya que si es muy reducida puede obligar a que una parte importante del proceso de deceleración se produzca sobre la vía general, reduciendo notablemente la capacidad de circulación por ésta.

Finalmente, es preciso recordar la necesidad de que los trenes de mercancías deben ser “inyectados” en las líneas de alta velocidad con una alta precisión en cuanto al momento de

su entrada en la línea y a la velocidad a la que lo hacen. Para ello debe disponerse en los puntos de entrada a la línea de apartaderos con número de vías suficientes para que los trenes de mercancías que vayan llegando de otras líneas se estacionen hasta el momento de su entrada a la línea de alta velocidad. La precisión exigida en cuanto al horario para la compatibilidad de trenes de viajeros y de mercancías de alta velocidad es incompatible con las llegadas aleatorias procedentes del resto de la red.

Reducción del número de cortes de vía para mantenimiento.

Es muy conveniente que se pueda circular en la línea de alta velocidad en los días laborables durante las 24 horas al menos por una vía y con tracción eléctrica, y por tanto que se limiten los cortes simultáneos de las dos vías a ciclos semanales. De esta manera podrá encaminarse una parte significativa de los trenes de mercancías a los periodos nocturnos (en los que la demanda de este tipo de trenes es mayor) o periodos horarios intermedios en los extremos de la línea (por ejemplo, de 21 a 24 o de 5 a 7).

Es deseable que aunque una de las vías esté cortada por mantenimiento, por la otra vía se pueda circular con tracción eléctrica. Y ello porque la agregación y posterior segregación de una máquina diésel supone unas maniobras lentas (de 20 a 30 minutos); y además las prestaciones de las máquinas diésel en las líneas de alta velocidad (con rampas de hasta 25 milésimas) son muy bajas. Puede estimarse una pérdida de unos 10 minutos en un trayecto de 30 kilómetros sin tensión. Estos tiempos adicionales, así como el coste económico de la máquina diésel se traducen en una notable pérdida de eficiencia.

Sistemas de vigilancia y señalización

Además de todas las medidas anteriores, es necesario dotar a la línea de disposición de sistemas de vigilancia adecuados (detectores de ejes descarrilados, de impacto vertical, de exceso de gálibo, etc.) que reduzcan los riesgos adicionales debidos a las peculiaridades del servicio de mercancías.

Los trenes de mercancías deben disponer de un sistema de señalización que permita al menos la supervisión continua de velocidad. Si no tiene, además, transmisión continua de información, las señales deberían estar dotadas de balizas “infill” para refrescar la información con cierta antelación evitando reducciones de velocidad ante las señales que pueden ser muy perjudiciales para la explotación de la línea. Por otra parte, debe tenerse especial precaución al diseñar la longitud de los “cantones” en la entrada de los apartaderos: deben hacerse más cortos de los de vía general (por ejemplo, un cantón de 1.000 metros y otro de 500 en lugar de uno de 1.500 metros) de para lograr que un tren de mercancías apartándose para ser adelantado no suponga una penalización en tiempo al tren de viajeros que circula detrás.

3. UBICACIÓN DE LOS POSTES DE ELECTRIFICACIÓN ENTRE LAS DOS VÍAS

Para resolver muchas de estas necesidades del tráfico mixto (entreeje suficiente, protección frente a descarrilamientos, posibilidad de realizar mantenimiento en una vía y circular en la otra con tracción eléctrica, ...) se propone implantar los postes de electrificación entre las dos vías generales, en lugar de en los lados exteriores de éstas, como es habitual. Esta solución permite, incluso con una inversión menor, aumentar el entreeje, la seguridad en la circulación, la disponibilidad en la vía y la seguridad para los trabajadores en las labores de mantenimiento.

Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de la ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias

Para determinar el entreje necesario, puede partirse de la anchura del gálibo de implantación de obstáculos que en las líneas españolas de alta velocidad es de 4.700 milímetros, cifra a la que hay que sumar la anchura del poste más ancho que es de 700 milímetros, lo que llevaría a un entreje de 5.400 milímetros. Si se desea respetar la distancia de 1.900 milímetros entre la cara interior del poste y el exterior del carril llevaría a unos 5.950 milímetros de entreje.

En las estaciones y apartaderos de las nuevas líneas españolas de alta velocidad (que, no lo olvidemos, están diseñadas para admitir trenes anchos, de hasta 3,4 metros de caja) los postes están situados entre la vía general (por la que se podría circular hasta 350 km/h) y la vía de apartado, siendo el entreje de estas vías de 5.700 milímetros. Este valor intermedio (que ya se produce en la realidad) es el que se adoptará como referencia en este artículo, sin perjuicio de que, tras un análisis posterior de detalle pudiera determinarse otro valor más conveniente.

Desde el punto de vista económico, la ubicación de los postes en el centro no requiere mayor inversión. Si se mantiene la anchura de la plataforma (por ejemplo, 14 metros) puede ampliarse el entreje de forma notable (pasando, por ejemplo, de 4,70 a 6,30 metros) sin mayor inversión. Alternativamente, puede reducirse la anchura de la plataforma (por ejemplo de 14,0 a 13,4 metros), y con ello se reduce la inversión en infraestructura, de forma compatible con un aumento del entreje más modesto pero significativo y útil (por ejemplo, de 4,70 a 5,70 metros).

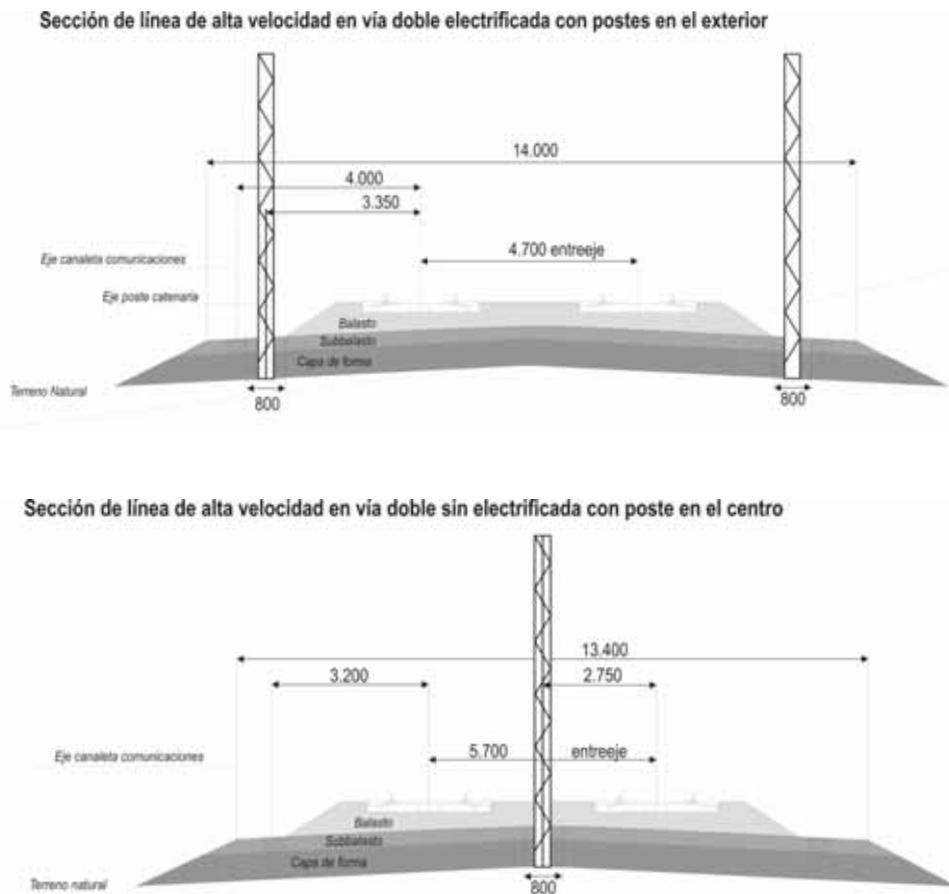


Fig. 4a y 4b. Secciones de plataforma en líneas españolas de alta velocidad con los postes en el exterior de la doble vía (situación actual) y en el centro (propuesta)

Desde el punto de vista del tratamiento mecánico de la sujeción de la catenaria, caben dos alternativas:

- Pueden emplearse los mismos postes para sujetar la catenaria de ambas vías (solución más económica que la actual)
- Pueden emplearse postes diferentes para cada una de las dos vías (solución con un coste similar al actual).
- En cualquiera los dos casos, se puede lograr, con una inversión igual o menor que la actual:
- Un mayor entreeje, y
- Una barrera de separación entre las vías formada por los postes de la electrificación

La presencia de postes entre las dos vías tiene efectos muy positivos con respecto a la seguridad en la circulación:

1. Crea una barrera que dificulta que un objeto desprendido de un tren llegue a impactar contra el tren que circula por la otra vía.
2. Hace que un tren descarrilado tenga más dificultad para invadir el gálibo de la vía contraria.
3. Actúa de “fusible”, ya que si un tren descarrilado llega a tirar un poste en la entrevía (descarrilamiento que podría tener unas consecuencias letales si no hay postes en la entrevía) corta tensión en la vía contraria, lo que supone una inmediata señal de parada a los trenes que circulan por la vía contraria, que probablemente tardarían bastantes segundos en recibir la información de la invasión del gálibo. (No debe olvidarse que un tren a 300 kilómetros por hora recorre 83 metros ; cada segundo!)
4. Permite una separación física, fácilmente identificable, de la zona de seguridad en los casos en los que se trabaja en una vía mientras los trenes circulan por la otra. Esta separación puede ser además mejorada de forma fácil, rápida y económica con la colocación de cintas entre los postes.
5. Reduce (para el mismo entreeje) la presión que soporta un tren al cruzar con otro y por ello reduce los riesgos derivados de esta presión aerodinámica sobre la estructura del tren de mercancías.

Resulta indudable que la presencia de postes entre las dos vías crea una barrera que dificulta que objetos desprendidos de un tren, como pueden ser piezas, tornillos, piedras o trozos de hielo (que salen gran velocidad pero con una trayectoria formando un ángulo muy pequeño con la trayectoria del propio tren) lleguen a impactar con un tren en la otra vía. Aunque la separación de los postes sea del orden de 50 metros, el ángulo hace que con gran probabilidad impacte en el canto del poste antes del llegar al tren con el que se cruza. El mayor entreeje ayuda al ello.

Por otra parte, la ubicación de los postes entre las dos vías, permite que los viajeros que viajan en lado exterior del tren puedan contemplar el paisaje sin la perturbación que supone el periódico cruce de los postes en su trayectoria visual (los que viajan en lado central ven postes sea cual fuere su posición: tanto si los postes están en el centro, como si están en los lados).

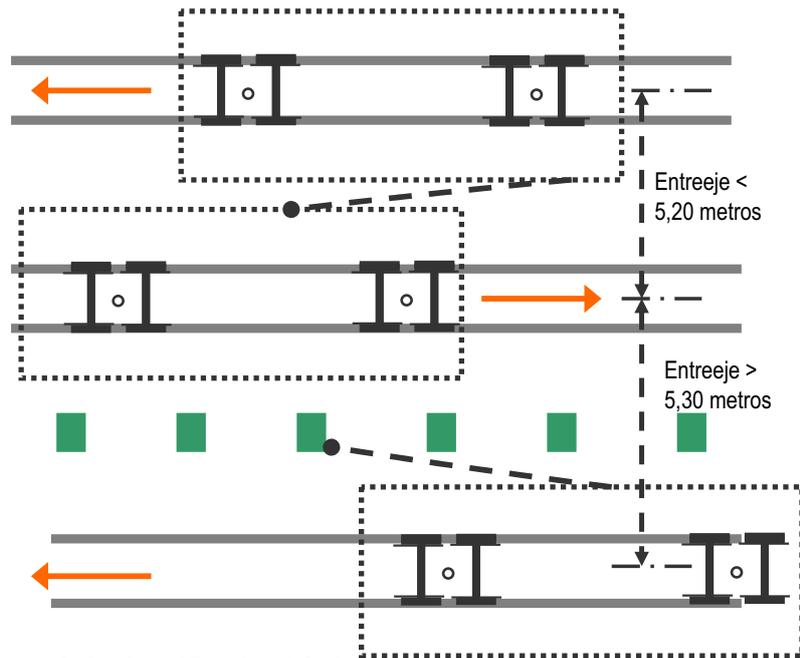


Fig. 5. Los postes de la electrificación (abajo) crean una barrera que, junto al mayor entreeje, hace difícil que objetos desprendidos de un tren lleguen a impactar contra un tren que circula en sentido contrario por la vía contigua.

Inconvenientes.- La ubicación de los postes en entre la vías generales tiene algunos inconvenientes (que estimamos de menor entidad frente a las ventajas) que deben ser analizados, valorados y, en lo posible resueltos, en una investigación posterior que desborda el ámbito de este estudio preliminar. Entre ellos pueden citarse los siguientes:

1. Deben adoptarse nuevos procedimientos para los trabajos de mantenimiento derivados de la menor distancia a los conductores de la vía contigua que son potencialmente activos.
2. Se producen nuevas (y diferentes) disposiciones de la sección transversal de los elementos de electrificación (por ejemplo, en puestos de banalización y en las zonas de escapes).
3. Es preciso resolver (probablemente con postes más altos) la posición de los feederes negativos y de los cables de guarda, que deben mantener unas determinadas distancias con los cables activos de la catenaria.

4. LA SOLUCIÓN EN PUNTOS SINGULARES

Desde luego esta solución (aumento del entreeje y postes entre las dos vías) no puede extenderse a totalidad de la línea: los postes no pueden ponerse entre las vías en las zonas de escapes (donde, sin embargo, sí que puede mantenerse el entreeje aumentado) ni en todos los túneles monotubo de vía doble (donde el aumento de la sección podría suponer un coste mayor). Ello no debe ser obstáculo para obtener las ventajas apuntadas en la mayor parte de la línea sin perjuicio de que pueda ser necesario reducir la velocidad del tren de viajeros en los túneles monotubo de sección muy reducida (y solo en ellos) en los periodos de tiempo en que pasen trenes de mercancías (y solo en estos periodos).

4.1 La problemática de los túneles

Con respecto a la problemática de los túneles, cabe plantearse en qué túneles es posible mantener el entreje de 5.700 milímetros (lo que permitiría, si se desea, poner postes en el centro, y desde luego no habría que hacer transiciones para cambio de entreje en los extremos del túnel).

En los casos en los que no sea posible alcanzar el entreje de 5.700 milímetros en el túnel, no se podrían poner los postes en el centro (lo que no tendría ninguna importancia puesto que pueden anclarse a la bóveda, como se hace habitualmente) y además sería necesario: por una parte, establecer transiciones para pasar del entreje a cielo abierto de 5.500 milímetros al entreje del túnel de 4.700 o 4.800 milímetros, lo que supondría unas transiciones de hasta 700 metros de longitud en la entrada y salida del túnel poder mantener la velocidad de 300 kilómetros por hora con el necesario nivel de confort (este es un valor máximo ya que, como se verá, en la mayor parte de los casos se puede mantener en túnel el entreje de 5.700 milímetros).

Por otra parte, el tener un entreje más reducido en túnel podría aconsejar, por razones de seguridad, limitar en estos túneles la velocidad de los trenes de viajeros al cruce con los trenes de mercancías.

Resulta, pues, de máximo interés conocer en qué casos puede mantenerse el entreje de 5,70 metros en el túnel (lo que comporta las ventajas apuntadas) o, por el contrario, en qué casos no puede llegarse a este entreje sin aumentar la sección del túnel por encima del mínimo necesario (lo que implica los inconvenientes descritos).

Para determinar el radio mínimo interior del túnel compatible con el entreje de 5.500 milímetros hay que tener en cuenta los siguientes sumandos:

- Los 1.200 milímetros necesarios, según la normativa vigente de seguridad, para un paseo o andén para la evacuación situado a una altura de entre 350 y 500 mm sobre el carril.
- Los 2.150 milímetros que se corresponde con la mitad del “gálibo de implantación de obstáculos” a esta altura (entre 400 y 800 milímetros sobre el carril) que es de 4.300 milímetros (el valor característico de 4.700 mm solo se presenta en cotas por encima de 800 mm sobre el carril).
- La distancia horizontal (d) entre el final exterior del andén y la mayor anchura del túnel. Para calcular la hay que tener en cuenta que la altura máxima del andén, según la Instrucción para la Seguridad en los Túneles Ferroviarios (ISTF), es de 500 mm sobre el carril (¿por qué la norma no permite andenes a 760 mm que harían posible una evacuación más fácil y rápida?). Por tanto, el andén está situado en una cota inferior al centro del círculo teórico del diámetro interior del túnel (ubicado según la recomendación IGP-4.2. a 1.830 mm sobre el carril) y es preciso sumar la reducción de anchura del túnel en esta cota que es $(R^2 - (1.830 - 500)^2)^{1/2}$.
- La mitad del entreje, que es la incógnita a despejar.

Por tanto, el radio necesario del túnel para poder tener este entreje es de 6.360 milímetros. Para determinar en qué casos puede alcanzarse radio (y por ello el entreje de 5,70 metros) debe tenerse en cuenta que existe una relación entre la sección libre del túnel (que es la que exige la aerodinámica) y el radio interior del túnel.

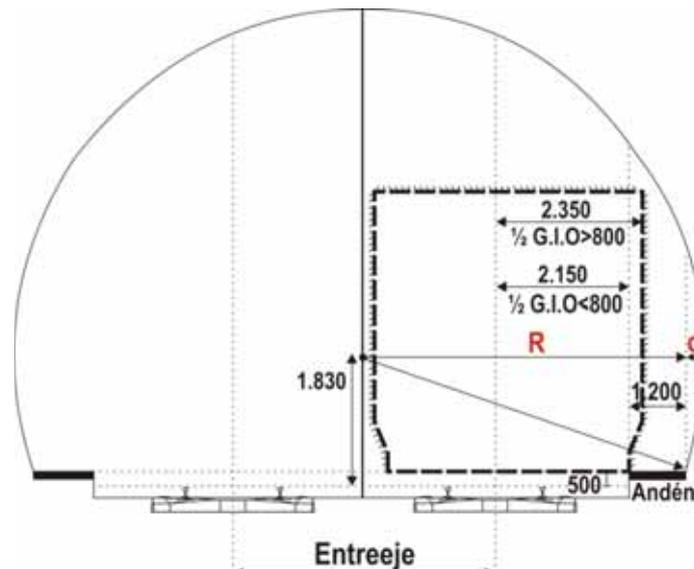


Fig. 6. Sección del túnel monotubo en líneas de alta velocidad

En la tabla se indican, para diversos valores del radio interior del túnel (en el supuesto del centro de círculo a 1.830 mm sobre el carril) el entreeje mínimo compatible con la anchura de andén de 1.200 milímetros y la sección correspondiente.

Tabla 2. Valores del entreeje posible en túnel en función del radio interior y de la sección libre del túnel en líneas de alta velocidad

Radio interior (mm)	Entreeje posible (mm)	Sección libre (m2)
5.860	4.714	65
6.060	5.124	75
6.260	5.534	85
6.460	5.943	95
6.660	6.352	105
6.860	6.760	115
7.060	7.167	125
7.260	7.574	135
7.460	7.981	145
7.660	8.387	155

Ello significa que todos los túneles para dos vías con una sección igual o mayor de 85 metros cuadrados permiten un entreeje de 5.500 milímetros. Se trata ahora de determinar qué túneles precisan esta sección por motivos aerodinámicos.

Atendiendo a las instrucciones de Adif para el cálculo para la sección de túneles (IGP 4.1.), basada a su vez en la ficha 779-11 (2ª Edición, Febrero 2005) de la UIC, puede establecerse una relación entre la longitud del túnel y la sección necesaria por motivos aerodinámicos.

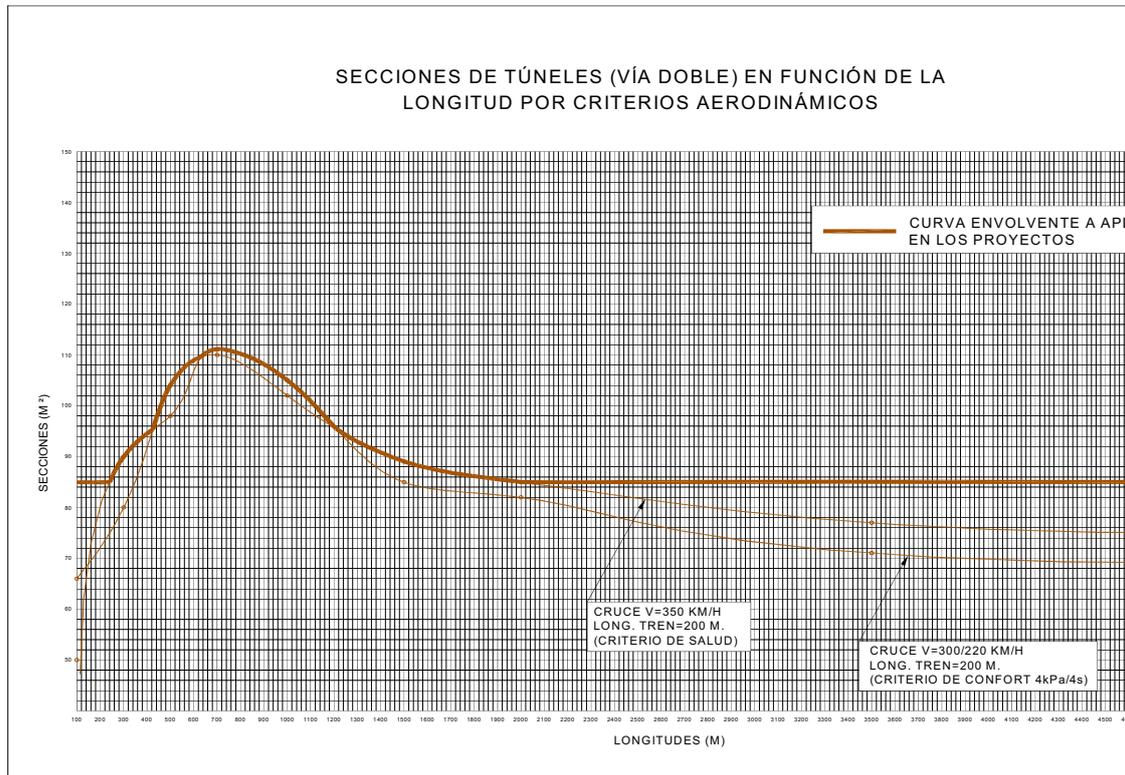


Fig. 7. Sección necesaria en un túnel (por motivos aerodinámicos) en función de su longitud

Esta relación está expresada en la figura. En ella se observa que todos los túneles requieren por aerodinámica una sección superior a 85 metros cuadrados y por ello que prácticamente todos permiten el entreaje de 5,70 metros.

4.2 Escapes

En los escapes y en algunos (muy pocos) túneles de pequeña sección, será precisa una actuación inteligente del diseñador del trazado para resolver las discontinuidades de la sección transversal de la plataforma en las zonas en las que necesariamente los postes de la electrificación deban estar en el exterior de las vías; por ejemplo, en las zonas de los escapes; y probablemente reducir en algún caso ligeramente el entreaje a la entrada de los túneles con transiciones adecuadas.



Fig. 8. Los postes entre las vías son frecuentes en líneas urbanas de nueva construcción y en líneas de alta velocidad en las estaciones, como es el caso de Olmedo

5. EL ORIGEN DE LA POSICIÓN DE LOS POSTES

Las ventajas de la ubicación de los postes en el centro de las vías son tan evidentes que cabe preguntarse por qué no se instalan siempre en las líneas nuevas de esta manera. No hay respuestas claras a esta pregunta. Desde nuestro punto de vista la ubicación de los postes en la parte exterior de las vías no obedece a ninguna razón técnica ni de explotación, sino que probablemente tiene su origen en razones históricas.

En efecto, en la mayor parte de los países de nuestro entorno las dobles vías se remontan a principios de siglo XX, mientras que las electrificaciones de las líneas de vía doble no comenzaron en España hasta el año 1928 (Barcelona a Manresa). Hasta que se constituyó Renfe en 1941 únicamente tres tramos de vía doble electrificada en la red (además del tramo citado, los de Alsasua a Hendaya, en 1929 y el de Bilbao a Portugaleta en 1933). Por ello, cuando los ingenieros de la electrificación llegaban para instalar la catenaria una línea importante ya estaba instalada la vía doble y solo podían poner los postes en el exterior. Sin embargo, son muy numerosas las líneas de nueva construcción (especialmente tranvías urbanos en los que la anchura de la sección transversal es importante) en las que los postes se ubican entre las vías sin que ello represente ningún problema técnico o de explotación.



Fig. 9. La vía doble se implantó, en general, antes que la electrificación en las líneas principales, lo que obligó a ubicar los postes en el exterior de las vías, en lugar de en el centro como hubiera sido lo lógico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009): “Electrificación y trazado de ferrocarriles”, en III Curso de Diseño de líneas CEDEX.

GARCIA ÁLVAREZ, A. (2010): “Requerimientos, desde el punto de vista de la explotación, del tráfico mixto de trenes de alta velocidad y mercancías convencionales” en “Los umbrales técnicos de la compatibilidad del tráfico mixto de alta velocidad y mercancías”, Fundación Caminos de Hierro, Córdoba, junio de 2010

LÓPEZ PITA, a. (1993): “Criterios de planificación de las nuevas infraestructuras ferroviarias”. Revista Situación. Banco Bilbao-Vizcaya, 37-64

LÓPEZ PITA, A. (2001): “La explotación de línea de alta velocidad en tráfico mixto: experiencias disponibilidad disponibles y tendencias”.

LÓPEZ PITA, A. (2008): “Infraestructuras ferroviarias”, en colección “Temas de Transporte y territorio”, TTT), Ediciones UPC, Barcelona, 2006.

LOPEZ PITA, A. (2010): “Alta velocidad en el ferrocarril” en colección “Temas de Transporte y territorio”, TTT), ed.: Ediciones UPC y Comsa-Emte, 2010)

LOZANO DEL MORAL, A. (2010): “Problemática del cruce de trenes de mercancías con trenes de alta velocidad por consideraciones aerodinámicas” en IV Jornadas de Ingeniería para la alta velocidad, Fundación Caminos de Hierro, Córdoba, junio de 2010.

La línea de alta velocidad a Asturias resolverá los problemas de los trenes de mercancías

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Vicente Rallo Guinot

Colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento es una versión actualizada del artículo publicado en la revista “Vía Libre” en el nº 541 de mayo de 2010

La línea de alta velocidad a Asturias resolverá los problemas de los trenes de mercancías

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Vicente Rallo Guinot

Colaborador del Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

Los túneles de base de Pajares, de 25,4 kilómetros de longitud, no solamente servirán como parte de la línea de alta velocidad Madrid-Gijón para reducir tiempo de viaje de los trenes de viajeros, sino que permitirán el encaminamiento de los trenes de mercancías de Asturias hacia el resto de España, dando solución al problema de estrangulamiento de las mercancías que supone el actual trazado por la rampa de Pajares. Esta fue, probablemente, la obra de ingeniería más importante de España en el siglo XIX y una de las primeras líneas en electrificarse en España en 1923, pero hoy resulta absolutamente obsoleta en términos de capacidad, eficiencia, disponibilidad y tiempos de viaje para los trenes de viajeros y de mercancías. En este artículo se describen comparativamente los dos trazados; se analizan las ventajas de los túneles de alta velocidad para trenes de mercancías, comprobando la compatibilidad con el tráfico de viajeros; y se estudia el efecto en el consumo de energía y emisiones que puede tener el encaminamiento de los trenes de mercancías por esta nueva línea.

Para analizar comparativamente los trazados de la línea de alta velocidad y de la convencional, se estudia el recorrido entre La Robla (León) y Pola de Lena (Asturias), que son los puntos comunes a ambos trazados. Este ámbito de análisis permite comparar estrictamente el efecto de la nueva línea, que es independiente de las mejoras en la línea actual y construcción de tramos de nueva línea que se puedan hacer antes de La Robla o después de Pola de Lena.

1. LONGITUD DE LA LÍNEA

La distancia en línea recta entre La Robla y Pola de Lena es de 42,745 kilómetros, mientras que la distancia por la línea ferroviaria convencional (km 25,032 al 108,119) es de 83,087 kilómetros, es decir, casi el doble (concretamente un 94,4 % más). La desproporción es aún mayor en el subtramo entre la boca Norte del túnel de La Perruca (kilómetro 58,465) y la estación de Puente de Los Fierros (kilómetro 95,928), entre los que la distancia en línea recta es de 8,7 kilómetros, mientras que la distancia por ferrocarril es de 37,463 kilómetros (4,3 veces más).

La nueva línea de alta velocidad entre el apartadero de La Robla (kilómetro 3,5) y la estación de Pola de Lena (kilómetro 49,7) tiene una distancia de 46,2 kilómetros, lo que supone un 8,1% más que la línea recta y un 44,4% menos que la línea convencional.

2. RAMPAS Y PENDIENTES

La estación de La Robla está situada a una altitud sobre el nivel del mar de 956 metros, mientras que la de Pola de Lena lo está a 322 metros, siendo por tanto la diferencia de 634 metros. Pero es que además, desde La Robla aún hay que ganar cota hasta llegar a la divisoria astur-leonesa. En concreto, el punto más alto del trazado actual, a la entrada del túnel de La Perruca, está situado a 1.270 metros, lo que supone la necesidad de subir desde La Robla un total de 314 metros en 30,2 kilómetros (lo que representa una rampa media del 10,4 por mil) para después bajar hasta Puente de Los Fierros otros 768 metros en un desarrollo de 40,7 kilómetros (pendiente media del 18,7 por mil) y bajar 180 metros más en los 12,3 kilómetros restantes hasta Pola de Lena, con pendiente media del 14,6 por mil. Las rampas que deben soportar los trenes de mercancías en sentido Norte-Sur (cargados) son prácticamente continuas de 20 por mil desde Puente de Los Fierros hasta La Perruca (que en la práctica se convierte en una rampa ficticia del 22,7 por mil debido a que el trazado está en curva y contracurva casi continua de 300 metros de radio).

Por lo que se refiere a la línea de alta velocidad por los túneles de base, la vía pasa la divisoria a la altitud de 1.028 metros (es decir, casi 250 metros más bajo que el trazado del siglo XIX) por lo que desde esta divisoria hasta Pola de Lena puede tener un desarrollo mucho más corto con la misma rampa de 20 milésimas. Además, como en la línea de alta velocidad los radios de curva son muy grandes, la rampa virtual en ésta para subir de Pola de Lena hacia el alto es de 20 por mil (frente a los 22,7 por mil de la línea antigua).

Tabla 1. Carga máxima (t) remolcable por diversas locomotoras en el trazado convencional y en el de alta velocidad (sentido Norte-Sur)

Maquina serie	Potencia	Trazado convencional	Trazado alta velocidad	Diferencia (%)
	kW	Rampa fic. 23 mm/m	Rampa fict. 20 mm/m	
251 Mercancías	4.650	1.010	1.150	+13,8 %
252	5.600	720	810	+ 12,5%
253	5.600	860	1.000	+16,3%
253 en doble	11.200	1.634	1.900	+16,3%
269.850	6.300	1.260	1.440	+14,3%

Puede observarse que la carga máxima de la maquina más habitual por el trazado convencional (la de la serie 251 en régimen de mercancías) es muy similar a la de la nueva máquina de la serie 253 por el trazado de alta velocidad. Como la máquina nueva tiene freno regenerativo y además una mayor potencia (que le permite mayor velocidad en la subida), la simulación se hará en el trazo antiguo con la máquina 251 y en el trazado nuevo con la máquina 253, en ambos casos remolcado su carga máxima y suponiendo freno regenerativo.

Tabla 2. Características de los trenes de mercancías en Pajares

CARACTERÍSTICAS DE LOS TRENES DE MERCANCÍAS EN PAJARES								
TREN DE PRODUCTOS SIDERURGICOS								
Tren	Línea convencional				Línea alta velocidad			
	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
Locomotora	251	251	269850	269850	2 x 333.300	2 x 333.300	253	253
Peso de la mercancía (toneladas)	676	0	861	0	799	0	676	0
Toneladas brutas remolcadas(TBR)	954	278	1215	354	1128	329	954	278
Masa total del tren (toneladas)	1092	416	1380	519	1368	569	1039	363
Longitud del tren (metros)	153	153	204	204	201	201	151	151
TREN DE CARBÓN								
Tren	Línea convencional				Línea alta velocidad			
	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
Locomotora	251	251	269850	269850	2 x 333.300	2 x 333.300	253	253
Peso de la mercancía (toneladas)	636	0	795	0	742	0	636	0
Toneladas brutas remolcadas(TBR)	960	324	1200	405	1120	378	960	324
Masa total del tren (toneladas)	1098	462	1365	570	1360	618	1045	409
Longitud del tren (metros)	237	237	305,6	305,6	296,66	296,66	234,9	234,9

Rampa característica: Línea convencional 23 mm/m Gijón León, y 22 mm/m León Gijón. Línea de alta velocidad: 20 mm/m en ambos sentidos

3. VELOCIDADES

La velocidad máxima por trazado de la línea de alta velocidad es superior a 300 km/h, ya que los radios de curva son de 5.350 y 4.450 metros. La línea actual, con radios de curva de 300 metros, permite una velocidad máxima a los trenes de mercancías de 75 km/h y los trenes de viajeros pendulares pueden circular a una velocidad máxima de 85 km/h.

En cuanto a las velocidades que se pueden obtener considerando la potencia de los trenes, los de alta velocidad de la serie 102/112 (la serie más numerosa en España) pueden sostener una velocidad de 246 km/h en la rampa de 20 por mil, y éstas será por tanto su velocidad normal en el sentido Asturias-Madrid, mientras que en el sentido Madrid-Asturias se podrán alcanzar los 300 km/h.

Por lo que respecta a los trenes de mercancías, considerando un tren de la carga máxima remolcable por la locomotora en 22,7 milésimas, las velocidades son de 61 a 75 km/h en la línea actual y de 70 a 84 km/h en la línea de alta velocidad.

Ello permite concluir que los tiempos de viaje para los trenes de viajeros entre La Robla y Pola de Lena (suponiendo que no paren en dicha estación) serán de 11 minutos hacia Asturias y de 12 minutos hacia Madrid; frente a los 63 minutos que tardan actualmente en ambos sentidos.

Para los trenes de mercancías, el tiempo actual de marcha de los trenes de 1.000 toneladas remolcadas es de 94 minutos a lo que hay que añadir una media de 23 minutos en las dos paradas que, por término medio, realizan por cruce en la vía única. En la línea de alta velocidad los tiempos de viaje de Pola de Lena a La Robla oscilarán, según las máquinas, entre 42 minutos y 49 minutos, incluyendo la aceleración y deceleración en los extremos (al ser vía doble no será necesaria ninguna parada intermedia adicional).

Perfil de la línea León a Gijón

Tramo La Robla-Pola de Lena (km 20,7 - km 108,2)



Perfil de la LAV León-Asturias

Tramo Túneles de Pajares-Pola de Lena (km 0 - km 49,7)



JIS E. Mesa

Tabla 3. Velocidades y tiempos de viaje de trenes de viajeros y mercancías entre Pola de Lena y la Robla

		Línea convencional		Línea alta velocidad		Dif NS absoluto	Dif SN absoluto	Dif NS %	Dif SN %
		NS (Cargados)	SN (Vacíos)	NS (Cargados)	SN Vacíos				
Rampa real	mm / m	20,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,00	0,00
Rampa ficticia	mm / m	22,7	22,7	20,0	20,0	-2,7	-2,7	-0,12	-0,12
Velocidad tren viajeros	km / h	85,0	85,0	246,0	246,0	161,0	161,0	1,89	1,89
Tiempo tren viajeros	min	62,7	62,7	11,9	11,1	-50,8	-51,6	-0,81	-0,82
Vel. Tren mercancías NS 251 1010 t	km/h	61,0	63,0	70,0	100,0	9,0	37,0	0,15	0,59
Tiempo Tren mercancías NS 251 1010 t	min	94,3	70,5	48,9	36,9	-45,4	-33,6	-0,48	-0,48
Vel. Tren mercancías SN 253 1010 t	km/h	75,0	80,0	84,0	84,0	9,0	4,0	0,12	0,05
Tiempo Tren mercancías SN 253 1010 t	min	80,6	80,1	42,2	37,6	-38,4	-42,5	-0,48	-0,53
V Tren mercancías SN 269850 1010 t	km/h	65,0	80,0	73,0	84,0	8,0	4,0	0,12	0,05
Tiempo Tren mercancías SN 269850 1010 t	min	84,9	80,1	47,3	37,6	-37,6	-42,5	-0,44	-0,53

Con estos tiempos de viaje puede deducirse que se incrementa de forma notable la capacidad de transporte de mercancías entre Asturias y León. Supuesto un tren de viajeros por sentido cada hora entre Asturias y Madrid, la diferencia de tiempo de viaje entre el tren de viajeros y el de mercancías (12 a 42 minutos) permite intercalar entre cada tren de viajeros hasta 4 trenes de mercancías. Si en algunos periodos del día hubiera un segundo tren de viajeros por sentido y hora (por ejemplo un regional o un tren a Barcelona) la capacidad de trenes de mercancías sería de 3 trenes por hora. Por ello, y suponiendo un extraordinario uso de la línea para viajeros (con 22 trenes por sentido y día), la capacidad para trenes de mercancías sería de 58 trenes por sentido (actualmente circulan por termino medio 20 trenes de mercancías por sentido y día). Todo ello siempre y cuando las estaciones extremas del trazado tengan vías suficientes para tener apartados los 3 o 4 trenes de la batería y que deben intercalarse con precisión entre los trenes de viajeros.

4. VENTAJAS PARA LA EXPLOTACIÓN

Para los trenes de viajeros las ventajas en el ámbito de la explotación de la nueva variante son evidentes: menor tiempo de viaje (pasa de 63 a 12 minutos); mayor confort del viajero; mayor capacidad; libertad para la fijación de los horarios (al no haber cruces); y mayor disponibilidad porque la nueva línea se verá mucho menos afectada por las nevadas y otras inclemencias meteorológicas. Además, la vía doble permitiría mantener el tráfico durante

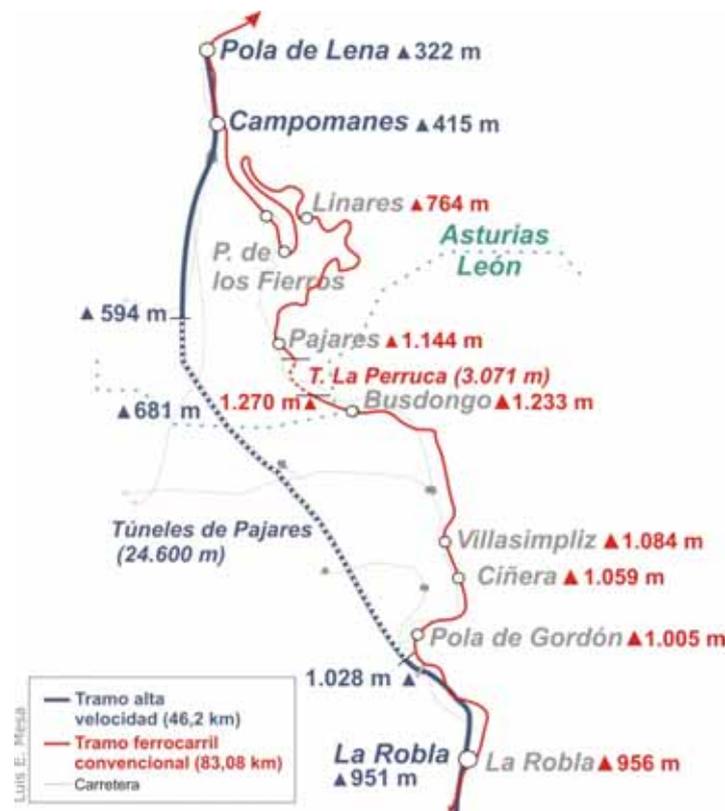
La línea de alta velocidad a Asturias resolverá los problemas de los trenes de mercancías

las 24 horas, limitando la interrupción para mantenimiento a una sola de las dos vías, en vez de suponer una intercepción total como en la actualidad.

Para los trenes de mercancías las ventajas son también obvias: Mayor carga admisible para la misma máquina; menor tiempo de viaje; mayor capacidad; mayor fiabilidad, disponibilidad y amplitud de horario y, por todo ello, menores costes de explotación.

Puede estimarse que un tren de mercancías entre Pola de Lena y La Robla tiene, actualmente, un coste de explotación de 10,94 € por kilómetro, lo que da un total de 909 €, mientras que por el nuevo trazado el coste de explotación sería de 12,48 € por kilómetro, es decir 620 € en total, y por lo tanto un 31,7% menos que en la línea actual. Para el cálculo de los costes se ha partido de los datos del “Observatorio de costes del transporte de mercancías por ferrocarril”, pero se ha supuesto un canon variable para el tren de mercancías en la línea de alta velocidad de 0,84 céntimos de euro por tren.kilómetro (igual a la de los trenes de viajeros de menos de 250 km/h en línea de alta velocidad) frente a los 0,12 céntimos de euro por tren kilómetro en línea convencional.

Habría que estudiar en detalle la conveniencia de que los trenes de mercancías peligrosas (por ejemplo los trenes de butano) circularan por los túneles o se mantuvieran por la línea clásica, tema éste sobre el que es necesaria una reflexión, pues la respuesta sobre cuál es la mejor opción no es obvia.



5. ENERGIA Y EMISIONES

Siendo importantes los ahorros de distancia, tiempo de viaje y costes de explotación, quizá el efecto más positivo para los trenes de mercancías en la nueva variante será el de la reducción del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Esta reducción se produce por diversas causas; entre ellas, las siguientes:

- Menor distancia a recorrer (reduciéndose casi a la mitad el consumo de energía solo por este concepto)

- Menor resistencia al avance por las curvas, que pasa de 1,009 daN/t para el trazado actual a 0,082 daN/t por el nuevo.
- Menor altura a salvar. Los 250 metros de altitud de diferencia entre ambos trazados suponen, para un tren de 1.000 toneladas, unos 750 kWh. Si bien una parte de esta energía se aprovecha para vencer las resistencias al avance en la bajada, otra parte significativa se pierde usando el freno.
- Mayor aprovechamiento de la energía regenerada en el freno. Aún suponiendo que las máquinas con las que se comparan sean las mismas en ambos trazados y estén dotadas ambas de freno regenerativo, en el trazado actual la recuperación de energía sería muy baja, debido a que la vía única impide una densidad de tráfico que permita mayor aprovechamiento de energía. En la línea nueva, de vía doble, el aprovechamiento de energía, aún cuando las subestaciones no fueran reversibles, sería del orden del 16% e incluso podría acercarse al 25% si en la programación de los horarios (que en esta línea pueden ser cadenciados) se tuviera en cuenta la simultaneidad de los trenes bajando con los trenes subiendo.
- Como la línea nueva se electrificará a 25 kilovoltios en corriente alterna, las subestaciones serán reversibles, y por lo tanto se aprovecha totalmente la energía regenerada en el freno que en el caso de los trenes descendentes es una cantidad muy importante. Además, en esta tensión las pérdidas óhmicas son muy inferiores a las que se registran en 3.000 voltios.

Tabla 4. Consumo y emisiones de los trenes de mercancías en pajares

CONSUMO Y EMISIONES DE LOS TRENES DE MERCANCIAS EN PAJARES					
TREN DE PRODUCTOS SIDERUGICOS					
		Línea convencional		Línea alta velocidad	
		Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
		251	251	253	253
Energía importada entrada tren	<i>kWh</i>	4.305	1.140	3.019	382
Consumo neto entrada tren	<i>kWh</i>	4.100	672	2.976	180
Emissiones de CO ₂ producidas	<i>kgCO₂</i>	1.279	210	856	52
TREN DE CARBÓN					
		Línea convencional		Línea alta velocidad	
Tren	Locomotora	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
		251	251	253	253
Energía importada entrada tren	<i>kWh</i>	4.364	1.317	3.137	485
Consumo neto entrada tren	<i>kWh</i>	4.160	849	3.093	283
Emissiones de CO ₂ producidas	<i>kgCO₂</i>	1.298	265	890	82

En la tabla puede observarse, para diversos trenes cargados (Norte-Sur, NS; y vacíos Sur-Norte, SN) el consumo de energía por la nueva línea y por la línea actual con diversos tipos de tracción. Los cálculos están estimados mediante el simulador ALPI 2810®, desarrollado por el *Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril* de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Como puede observarse, por cada tren cargado la diferencia de consumo de energía neta es del orden de 1.100 kW (con una reducción del 30,3% sobre el consumo neto y emisiones actuales).

Para el tren vacío el ahorro es del orden de 500 kilovatios-hora por tren (dividiéndose por cuatro el consumo y las emisiones actuales).

Considerando que el tráfico de Pajares de trenes de mercancías del año 2008, fue de unos 7.400 trenes por sentido (en realidad, en el sentido Sur Norte hay unas 500 circulaciones más, pero se corresponden en su mayor parte con máquinas aisladas), se puede estimar un ahorro de energía de unos 3,3 millones de kilovatios hora al año y una reducción de las

emisiones de 1,36 millones de kilos de CO₂ . Por tener una idea comparativa, puede indicarse que la reducción de emisiones producida solo en Pajares por el encaminamiento de los trenes de mercancías actuales por la línea de alta velocidad, equivale a las emisiones totales en el recorrido de Madrid a Asturias de unos 2.906 camiones al año.

Por lo que se refiere a los trenes de viajeros, el consumo neto de energía de un tren de la serie 130 (los actuales *Alvias*) circulado a 85 km/h entre la Robla y Pola de Lena es de 1.205 kW, mientras que el de un tren de alta velocidad de la serie 102 circulando por el trazado nuevo a 300 km/h (con un 5,6% más de plazas) es de 1.274 kWh, lo que supone un consumo prácticamente idéntico por asiento en este recorrido pese al aumento de la velocidad.

En suma, los nuevos túneles permitirán jubilar el antiguo trazado de Pajares con grandes ventajas para los viajeros y para la economía asturiana. El viejo trazado se ha ganado una nueva vida, como circuito de prueba de locomotoras (uno de sus usos actuales en el que, por la dureza del trazado, resulta insustituible), quizá como línea turística y para trenes de mercancías peligrosas; y desde luego como parte del patrimonio histórico cultural ferroviario para que las generaciones vendieras puedan conocer la más importante obra de ingeniería española del siglo XIX y que durante más de 125 años, ha servido para unir Asturias y La Meseta

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo

La Presente Comunicación es una versión revisada y modificada de la presentada y aceptada en el Congreso IV CONGRESO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE “Soluciones en un entorno económico incierto” celebrado en Castellón los días 26, 27 y 28 de mayo de 2010.

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

Rodolfo Ramos Melero

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Profesor Adjunto. Universidad CEU San Pablo

RESUMEN

La liberalización del sector ferroviario propiciada por la legislación de la UE está generando a nivel europeo diversas oportunidades de mercado. Sin embargo, la entrada en el mercado es desigual. Aunque la legislación permite la libre competencia en el mercado de mercancías el número de competidores es diferente según el país del que se trate. De otro lado, en los países en los que se permite la competencia en el mercado de viajeros la entrada es testimonial. En cualquier caso, la entrada de nuevas compañías es notablemente inferior que el registrado en otros procesos sectores como el aéreo

La razón de estas diferencias pueden deberse a la distinta importancia de las barreras de entrada entre los diferentes modos, e incluso entre el transporte ferroviario de mercancías y pasajeros, y las diferencias entre países. En 2010, en España se encuentra liberalizado el transporte de mercancías y el internacional de pasajeros. Sin embargo, la entrada de nuevos competidores en el transporte de mercancías en España es de los mas reducidos de la UE, 12 licencias representando un 5% del total del mercado y todavía no hay competencia en los servicios de viajeros.

En la presente Comunicación se analiza si las barreras a la entrada son mayores en el ferrocarril español de tal manera que los reducidos efectos de la liberalización pueden estar ocasionados, en parte, por éstas.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque en la literatura económica existen diversas maneras de clasificar las barreras a la entrada, en la presente Comunicación, las barreras a la entrada las clasificamos en dos grandes grupos: legales y de acceso. De esta manera, seguimos la clasificación del Estudio Libindex que se publica cada dos años para medir el avance del progreso de la liberalización en el ferrocarril europeo. Aunque el estudio no está exento de críticas, en especial por la ponderación que realiza de las barreras a la entrada con el fin de otorgar a cada país una valoración numérica individual con respecto a su liberalización, las puntuaciones sin ponderar las procedentes de encuestas completadas por los agentes del sector en las que se basa el Libindex son un estudio, de carácter objetivo, valioso para nuestro propósito. En la Figura 1 se presenta un esquema de las barreras a la entrada y en el Anexo I se ofrecen las tablas con las valoraciones medias de Europa y de España con respecto a las barreras a la entrada del Libindex.

Tabla 1. Esquema de las barreras a la entrada en el ferrocarril

A. BARRERAS LEGALES
A.1. Estructura organizativa del sector
A.2. Posibilidad legal de entrada
A.3. Poder regulador
B. BARRERAS DE ACCESO
B.1. Informativas
Tiempo requerido para obtener información para el acceso
Calidad de la información impersonal
Calidad de la información personal
B.2. Administrativas
Licencia
Homologación
Certificado de seguridad
B.3. Operativas
Material rodante
Personal cualificado
Acceso a la infraestructura: Canon y surcos
Acceso a servicios prestados

1.1 Barreras legales

Las barreras a la entrada las podemos clasificar en dos grandes grupos: legales y de acceso. Las primeras consideran la estructura organizativa del sector, la posibilidad legal de entrada y los poderes del regulador de la actividad.

En conjunto se asume para los operadores un marco de referencia en cuanto a la estructura organizativa del sector referente a la separación de la infraestructura y la explotación, de tal manera que si existe una separación institucional: el administrador de la infraestructura es independiente de cualquier empresa ferroviaria (EF) las posibilidades de entrada a la infraestructura básica (la necesaria para operar un tren diesel punto a punto) son mayores que si la separación es contable o bien orgánica (unidades de negocio diferenciadas para la infraestructura y la explotación dentro de una misma EF). Además, es necesario garantizar el acceso no discriminatorio a aquellas partes de la infraestructura (terminales, talleres, estaciones, etc.) no básicas que sean, no obstante, necesarias para que las EF operen sus servicios.

Mientras que el transporte de mercancías está liberalizado en la UE en viajeros ésta sólo impone desde el 1 de enero de 2010, la liberalización del transporte internacional. En los mercados domésticos una parte de los países mantienen el monopolio de la empresa nacional ferroviaria mientras que otros han abierto el mercado, permitiendo la competencia en el mercado mientras que otros como Reino Unido o Holanda han realizado la apertura mediante la competencia por el mercado (modelo concesional).

En un sector en el que el operador establecido, normalmente la compañía nacional ferroviaria, tiene fuerte poder de mercado es necesario un regulador, independiente, con fuertes poderes legales y medios organizativos suficientes para ofrecer a los nuevos entrantes garantías de no sufrir tratos discriminatorios y salvaguardar la competencia.

1.2 Barreras de acceso

Si existe posibilidad legal de entrada el operador necesita acceder al mercado para lo cual precisa de información, en un tiempo suficiente y calidad apropiada, sobre los requisitos necesarios para el acceso, y cumplir unos trámites administrativos; que esté habilitado como operador por la autoridad pública que concede licencias o autorizaciones; que disponga de un certificado que avale que sus métodos de actuación son seguros y una homologación del material rodante para la prestación de transporte ferroviario sobre las líneas que se desea operar.

Una vez cumplidos estos requisitos precisa para operar lograr de una manera no discriminatoria el derecho de uso (surcos) de la infraestructura básica y pagar por él, de una manera no discriminatoria, una cantidad y que ésta le permita la viabilidad del negocio.

Además, precisa disponer de material rodante previamente homologado, bien mediante su propiedad, comprando en el mercado de primera o segunda mano, u otras maneras como el alquiler. Así mismo precisa de personal cualificado y homologado entre el que destaca los maquinistas. Adicionalmente, precisa del acceso a los servicios que se prestan en la infraestructura que no es básica que sean necesarios para la prestación de los servicios ferroviarios de la EF (por ejemplo, corriente de tracción, fuel, servicios en las estaciones, etc.).

2. LAS BARRERAS LEGALES DE ENTRADA EN ESPAÑA

2.1 Estructura organizativa del sector

Básicamente, el modelo ferroviario español establecido por la Ley del Sector Ferroviario de 2003 (LSF) consiste en la creación de un gestor de la infraestructura independiente denominado Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), un Ente Público empresarial que se forma a partir de las unidades de negocio de infraestructura de RENFE y del antiguo GIF, que desaparece. Las unidades de negocio de RENFE dedicadas al transporte se agrupan en un nuevo Ente público denominado Renfe Operadora. El Ministerio de Fomento se constituye en la autoridad ferroviaria cuyas funciones básicas son: definir la política ferroviaria, la legislación y planificación del sector; otorgar licencias; y encomendar la construcción y/o administración de las infraestructuras. Por último, el Regulador, denominado Comité de Regulación Ferroviaria, supervisa y soluciona conflictos.

En cuanto al acceso a la infraestructura no básica, en la Red Ferroviaria de Interés General y sus zonas de servicio ferroviario será realizada siempre por el administrador de infraestructuras ferroviarias, estando obligado a prestarlo a solicitud de las empresas ferroviarias. Esta disposición recientemente incluida en la reforma de la LSF por la Ley 25/2009 de 22 de diciembre y desarrollada por la modificación del Reglamento del Sector Ferroviario efectuada a través del RD 100/2010 de 5 de febrero, reduce las barreras a la entrada con respecto a la redacción antigua en la que se establecía que el administrador de infraestructuras ferroviarias vendrá obligado a prestar este servicio a las empresas ferroviarias si no existen alternativas viables y en condiciones de mercado para su prestación.

Estructura organizativa del sector: barreras a la entrada en España

En España al igual que en el resto de los países, las EF son funcionalmente independientes de la administración. Un aspecto positivo en España es que se ha adoptado de entre las tres maneras que la UE permite para la separación de la infraestructura y la explotación: contable, orgánica e institucional ésta última que es la que más reduce las barreras a la entrada. Cabe destacar que no se da la separación institucional entre los servicios de viajeros y mercancías en el operador establecido. Puede argumentarse que esta división es necesaria para evitar subvenciones cruzadas entre ambos segmentos de transporte. No obstante, la separación orgánica existente en Renfe (Unidades de negocio diferenciadas para mercancías y viajeros) parece garantía suficiente para evitarlas.

En el acceso a la infraestructura no básica, valorada por el Libindex, antes de las modificaciones legislativas anteriores destaca la falta de acceso a las estaciones, lo cual es lógico al no estar liberalizado el transporte de viajeros así como las dificultades de acceso a las playas de clasificación y apartaderos.

2.2 Posibilidad legal de entrada

En España, los servicios ferroviarios son calificados, tanto los servicios de viajeros como los de mercancías, como servicios de interés general y esenciales para la comunidad que se prestan, con arreglo a la Ley, en un régimen de libre competencia. En ésta, se consideran dos tipos de servicios para los que se establecen regímenes diferentes de acceso: los comerciales y los de interés público.

Los servicios comerciales se operarán en régimen de libre competencia mientras que se declararán, de oficio por parte de Consejo de ministros o a instancia de una CC.AA. o corporación local, como servicios de interés público aquellos prestados sobre líneas y tramos de la denominada Red Ferroviaria de Interés General (RFIG) que sean deficitarios o no se produzcan con la frecuencia y/o calidad suficiente y sean necesarios para garantizar la comunicación de localidades del territorio español (aunque no lo explicita la Ley se sobreentiende que se refiere exclusivamente a los servicios de viajeros). Estos servicios, que recibirán subvenciones de la administración que ha promovido su consideración de interés público, se prestarán en régimen de exclusividad por la compañía ferroviaria a la que se la asigne su prestación mediante licitación pública.

Estos regímenes de acceso, no serán de aplicación al transporte ferroviario de viajeros hasta tanto la Unión Europea no establezca un régimen de apertura del mercado para este tipo de transporte. Esto ya ocurrió en el transporte internacional de viajeros ya que a partir del 1 de enero de 2010 las empresas ferroviarias disfrutaban de libre acceso a la Red Ferroviaria de Interés General para la explotación de servicios internacionales de transporte de viajeros. Para la realización de dichos servicios de transporte será preciso haber obtenido la

correspondiente licencia de empresa ferroviaria otorgada por la autoridad competente de un Estado miembro de la UE.

En lo que respecta a los servicios de mercancías se liberalizan plenamente en el momento de la entrada en vigor de la LSF: El 1 de enero de 2005. Cabe destacar en cuanto al transporte internacional que, siguiendo las líneas marcadas por el primer paquete ferroviario comunitario, que liberalizaba en un primer lugar los servicios internacionales sobre la Red Transeuropea de Transporte Ferroviario de Mercancías (RTTFM) y en 2008 el resto, la liberalización sólo alcanzó en un primer momento al transporte que se desarrollaba en la Red Ferroviaria de Interés General que a su vez formaba parte de la RTTFM. Esta limitación fue temporal hasta la plena liberalización puesto que la apertura total de los servicios internacionales se adelantó a 2006.

Posibilidad legal de entrada: barreras a la entrada en España

Una vez establecida la liberalización total de los servicios internacionales de viajeros y la totalidad de mercancías, la barrera legal a la entrada que resta es la autorización para que las empresas ferroviarias puedan acceder al mercado doméstico de transporte de viajeros bien mediante el régimen de libre acceso o bien mediante competencia regulada. Cabe llamar la atención acerca de la importancia de la transparencia en el desarrollo reglamentario necesario para la liberalización derivados la inexistencia de elementos suficientes para configurar un marco normativo dotado de seguridad y eficiencia jurídica. Así cabe destacar en primavera de 2010 la incertidumbre, entre otros sobre: la Orden Ministerial que desarrolla como será la licitación de servicios de interés público de viajeros, el régimen de apertura del resto de los servicios de viajeros; y el régimen de cabotaje para los servicios internacionales.

2.3 Poder del regulador

Mediante el Art 82 de la LSF se crea el Comité de Regulación Ferroviaria como órgano colegiado integrado en el Ministerio de Fomento. El Comité de Regulación Ferroviaria está compuesto por un presidente, cuatro vocales y un secretario. El presidente y los vocales serán designados por el Ministro de Fomento, entre funcionarios del Ministerio.

Son funciones del Comité de Regulación Ferroviaria las siguientes:

1. Salvaguardar la pluralidad de la oferta en la prestación de los servicios sobre la Red Ferroviaria de Interés General y velar por que éstos sean prestados en condiciones objetivas, transparentes y no discriminatorias.
2. Garantizar la igualdad entre empresas públicas y privadas en las condiciones de acceso al mercado de los referidos servicios.
3. Velar por que los cánones ferroviarios cumplan lo dispuesto en esta Ley y no sean discriminatorios.
4. Resolver los conflictos que puedan plantearse entre el administrador de infraestructuras ferroviarias y las empresas ferroviarias en relación con: el otorgamiento y uso del certificado de seguridad y el cumplimiento de las obligaciones que éste comporte; la aplicación de los criterios contenidos en las declaraciones sobre la red; los procedimientos de adjudicación de capacidad; la cuantía, la estructura o la aplicación de las tarifas que se les exijan o puedan exigírseles.

5. Informar a la Administración del Estado y a las comunidades autónomas que lo requieran en materia ferroviaria y, en particular, respecto del contenido de cualquier proyecto de norma o resolución que afecte a aquélla.
6. Cualesquiera otras que se le atribuyan por la ley o por reglamento

Poder del Regulador: barreras a la entrada en España

El aspecto mas problemático se refiere a sus poderes pues no interviene ex –ante y sus decisiones no son vinculantes (son recurribles en alzada ante el Ministro de Fomento). Además, sus aspectos organizativos no favorecen su eficacia: se trata de un órgano unisectorial, con un reducido número de empleados, entre los que no se encuentran expertos a tiempo completo especializados en regulación económica.

Cabe destacar la escasa transparencia informativa transparencia como aspectos positivos hay que destacar la existencia de un Regulador conforme a lo dispuesto en el artículo 30 de la Directiva, con competencias transparentes y transparencia en las actuaciones referidas a las reclamaciones y sanciones e independiente de influencias políticas. Sin embargo, no publica informes anuales y su accesibilidad es muy limitada.

Es preciso señalar que el Proyecto de Ley de Economía Sostenible aumenta la independencia funcional y los poderes de decisión ya que el Proyecto establece que el CRF no será un órgano colegiado integrado sino adscrito. Se añade que actuará con independencia funcional plena de Adif, el organismo de tarificación, organismo adjudicador de los surcos y candidatos. Además, las disposiciones y resoluciones que dicte el Comité en el ejercicio de sus funciones no serán recurribles en alzada ante el Ministro de Fomento.

3. BARRERAS DE ACCESO

3.1 Información sobre el acceso

Las barreras informativas podemos caracterizarlas por la duración del proceso mediante el que se recaba la información necesaria sobre las obligaciones administrativas necesarias para el acceso. Esta acción se divide en dos fases: el que lleva identificar los contactos responsables de la información y el de respuesta. Las fuentes de información son Adif y el Ministerio de Fomento.

Información sobre el acceso: barreras a la entrada en España

El tiempo necesario para identificar al responsable es considerado pequeño pues es fácil encontrarlo, de tal manera que España se encuentra por encima de la media y con la máxima calificación posible. Sin embargo, el tiempo de respuesta, una semana, está ligeramente por debajo de la media y distanciado de los países que obtienen mejores valoraciones. Debido a esta calificación sobre el tiempo de respuesta España se encuentra sólo en una situación intermedia en cuanto al proceso de información.

En cuanto a la calidad de la información impersonal sobre régimen de acceso, licencia, homologación, Certificado de Seguridad, asignación surcos), se valora la disponibilidad sin mediación de ninguna persona de esta información y su concordancia con lo dispuesto en la Directiva 2001/14.

Sin embargo, en España la información está sólo disponible, en inglés y la escrita es escasa, de tal manera que nos situamos bajo la media en folletos y en publicaciones escritas siendo Internet la mayor fuente de información.

En cuanto a la calidad de la información personal se refiere a la existencia de una persona cualificada para dar información sobre el régimen de de acceso hay disponibles: 3-4 personas, lo que nos sitúa por debajo de la media, y solo capaces de comunicarse en dos lenguas de la UE, lo que nos sitúa por debajo de la media.

La información no está totalmente centralizada, se contacta con al menos 2 instituciones y es positivo destacar que existe confidencialidad.

Un aspecto a destacar es que la declaración de Red está detallada y se especifican los horarios de las terminales y en detalle su tarificación. Sin embargo sería deseable que se incluyese información de otras terminales que no sean de Adif.

3.2 Barreras informativas

3.2.1 Licencia

Según el artículo 44 de la LSF y el 59 y 60 de su Reglamento, la prestación del servicio de transporte ferroviario de viajeros y mercancías esta sometido al requisito de la previa obtención de la licencia de empresa ferroviaria. Corresponde su adjudicación al Ministro de Fomento, previo informe del administrador de infraestructuras ferroviarias, dictar, de forma motivada, la resolución de otorgamiento de la licencia.

Licencia: barreras a la entrada en España

Como aspectos negativos destaca que en España la autoridad otorgante de la Licencia sólo es formalmente independiente de la compañía ferroviaria dominante. De otra parte, aunque el periodo legal para otorgar la licencia es de tres meses, en la práctica, según lo experimentado hasta ahora, se retrasa mucho más: unos 4.

Es positivo que se reconozcan, aunque sólo parcialmente pues unos certificados sirven y otros son necesarios sacarlos en España, las licencias de otros países de la UE. Sin embargo, la validación de una licencia extranjera lleva demasiado tiempo: hasta tres meses. No obstante, es positivo que su duración es ilimitada, siendo necesaria verificarla tras un periodo amplio: cada 5 años. Sin embargo, pierde su validez muy pronto: si no se usa en 6 meses.

Es bueno para la competencia que la licencia sea valida para toda la red si así se solicita y si así se solicita habilita para el transporte de mercancías y para la realización de viajeros para tráficos internacionales.

También hay que destacar positivamente para la competencia que la cantidad minima de seguro necesaria por Ley, está por debajo de la media de la UE y hay menos dificultades que en la media de la UE para contratarla en el mercado domestico. Otro aspecto positivo es que no hay condiciones adicionales por el uso de licencia (por encima de la UE) y todos las decisiones y criterios podemos considerarlos transparentes.

Sin embargo, la cantidad de capital desembolsado necesario por Ley es superior a la media de la UE mientras que los honorarios por la expedición de la licencia también son mayores que los de la media de la UE.

3.2.1 Certificado de Seguridad

Según el Art 57. de la LSF, el certificado de seguridad (CS), que permite prestar servicios sobre la Red Ferroviaria de Interés General, es un documento que emitirá el Ministerio de Fomento o, en su caso, el administrador de infraestructuras ferroviarias u otro ente facultado por aquél. Particularmente, en la medida en que así lo establezca la normativa comunitaria,

se podrá prever, reglamentariamente, que el otorgamiento del certificado de seguridad se lleve a cabo por un ente u órgano administrativo habilitado al efecto.

Certificado de Seguridad: barreras a la entrada en España

El estudio del IBM Index señala, que, los operadores españoles consideran el certificado de seguridad (CS) como tortuoso y que causa gran inseguridad la falta de una autoridad encargada de su concesión no daba garantías de que la decisión fuese suficientemente independiente y una vez entregada la información el tiempo necesario para la respuesta es excesivo: la concesión del CS dura unos 7 meses.

Además, el nivel de detalle comparado con el resto de redes europeas es elevado y el plazo necesario para la convalidación de la certificación de otros países es elevado.

Es positivo que su periodo de validez se sitúa en la media mientras que su plazo de revisión es más amplio. Sin embargo, el plazo en el que se pierde si no se usa es menor y el coste de expedición es alto con respecto a la media UE. Otro problema es la falta de transparencia: no son todas las decisiones y criterios se consideran transparentes.

3.2.1 Homologación

En cuanto a la normativa sobre homologación de material ferroviario, Orden FOM/233/2006, de 31 de enero, por la que se regulan las condiciones para la homologación del material rodante ferroviario y de los centros de mantenimiento y se fijan las cuantías de la tasa por certificación de dicho material, tiene como objetivo último contribuir a garantizar la seguridad de este modo de transporte mediante el establecimiento de los requisitos y condiciones mínimas que el material rodante debe reunir para poder circular.

En concreto, la orden dice que todo vehículo ferroviario que vaya a circular por la red deberá disponer una autorización de puesta en servicio de la Dirección General de Ferrocarriles y otra del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif) que garantice que cumple un conjunto de especificaciones técnicas de homologación.

La normativa reserva al Adif la capacidad para retirar la autorización de circulación de un tren si su propietario no cumple las condiciones de mantenimiento del vehículo o si en una inspección se detecta que presenta un menoscabo de las garantías de seguridad, fiabilidad y compatibilidad exigidas.

En cuanto al material ferroviario con que actualmente opera Renfe, la Orden de Fomento le reconoce como “validado y autorizado a circular”, si bien emplaza a la compañía ferroviaria a presentar en un plazo de dos años una relación de todo su parque y el plan de mantenimiento para obtener la autorización de circulación.

La homologación se realiza por Cetren⁵, una entidad privada e independiente, sin ánimo de lucro, integrada por la mayoría de las empresas y entidades públicas y privadas con actividades ligadas al sector ferroviario. Así, en la homologación se apuesta con el objetivo de garantizar un equilibrio de poderes una entidad sin ánimo de lucro, con el objeto de defender los intereses de las 30 empresas relacionadas con el sector ferroviario que lo fundaron. Francia aplica la misma fórmula, mientras que en países como Holanda o Gran Bretaña esta función es de la iniciativa privada.

⁵ CETREN en el caso de España detenta el monopolio de la certificación. Según los críticos de esta situación como CETREN certifica a las empresas ferroviarias que la integran puede considerarse que se autocertifican.

Homologación: barreras a la entrada en España

El informe Libindex, se señala como aspectos negativos que la homologación no es independiente de Renfe, se tarda por Ley más que la media en la concesión y en la práctica el retraso real, que es frecuente en los países de la UE, es muy importante en España tanto en material rodante diesel como eléctrico.

Además, la homologación española es mas “quisquillosa” que en las otras redes de la UE pero es, sin embargo, mas barata que en otras redes.

La convalidación del material rodante de otras redes es dificultosa tanto en UT diesel como vehículos de alta velocidad, y el tiempo legal de convalidación está por encima de la media así como el que se tarda en la práctica.

Otro aspecto a mejorar es en la transparencia de todas las decisiones y criterios (que el método y criterios esta publicado)⁶.

3.3 Barreras operativas

3.3.1 Asignación de surcos

En cuanto al método de asignación de los surcos se establece por la ORDEN FOM/897/2005, de 7 de abril. Los candidatos a obtener surcos son las empresas ferroviarias con licencia, agrupaciones empresariales internacionales que puedan constituir las compañías con licencia. Igualmente, podrán solicitar surcos otros candidatos distintos a empresas ferroviarias interesadas en el transporte ferroviario: agentes de transporte, cargadores, y operadores de transporte combinado.

Podrán obtener, con arreglo a la Ley, asignación de capacidad de infraestructura, los candidatos nacionales de otros países de la Unión Europea que deseen prestar servicios de transporte ferroviario en España. En todo caso, las previsiones de esta ley resultarán de aplicación a los referidos candidatos en la fecha en la que expire el plazo para que los Estados miembros de la Unión Europea liberalicen, con arreglo a las directivas comunitarias, cada tipo de servicio. Tras la modificación de la Ley del sector ferroviario por la Ley 15/2009 de 11 de noviembre se puede solicitar capacidad para realizar servicios internacionales de viajeros sin el requisito de ser una Agrupación internacional.

Asignación de surcos: barreras de entrada en España

El Libindex, destaca como aspectos positivos en la asignación de surcos que, en el mercado en el que se permite la competencia, mercancías, es transparente y equitativa; hay un mecanismo transparente de resolución de disputas; el tiempo que transcurre entre las fechas en las que se puede solicitar un horario regular es adecuado y es posible pedir surcos “spot” para atender necesidades puntuales de transporte no programadas; es posible establecer acuerdos marco; existen criterios de priorización en el caso de retrasos, averías, etc.; y la información relevante de cómo se hacen las mallas es provisto a las EEFF. En cuanto a los derechos de la asignación de surcos la posición en mercancías es óptima mientras que en viajeros, al no estar liberalizada la entrada, ocurre lo contrario: España se sitúa por debajo

⁶ Por ejemplo las locomotoras de serie 33.300 de la operativa privada Continental tardan 12 meses en ser homologadas mientras que ya estaban rodando las locomotoras de misma serie adquiridas por Renfe.

de la media en el proceso de solicitud de surcos; el derecho de utilización; el uso de las vías y desvíos, el control de la circulación y otros.

Sin embargo podemos destacar aspectos relacionados con la asignación de los surcos que pueden resultar en barreras a la entrada motivadas por el grado de discrecionalidad que posee el Adif en algunas decisiones. En efecto, el grado de discrecionalidad de Adif es importante en las cancelaciones de los surcos y en los criterios adoptados en la Orden Ministerial FOM/897/2005, de 7 de abril, relativa a la declaración sobre la red y al procedimiento de adjudicación de capacidad de infraestructura ferroviaria en caso de existir coincidencia de solicitudes o congestión de red.

Otro aspecto a considerar es la posición de privilegio de Renfe en el Reglamento del Sector Ferroviario en cuanto a la obtención de capacidad ya que amplía estos privilegios, que en la Ley se refieren únicamente a los servicios de transporte de mercancías, a los servicios de transporte de viajeros, señalando que, “cuando el mercado de prestación de estos servicios se abra a la competencia RENFE-Operadora conservará el derecho a explotar la capacidad de red que entonces utilice efectivamente y podrá solicitar que se le asigne otra capacidad de red”.

3.3.1 Canon por el uso de la infraestructura

Los cánones a pagar por el uso de las líneas ferroviarias pertenecientes a la RFIG presenta la siguiente estructura.

- Un Canon por Reserva de Capacidad, mediante el que se recuperan los costes fijos de mantenimiento, explotación y gestión de la infraestructura. Se abona por los km de longitud del surco reservado, considerando el día, hora, tipo de línea y de tren.
- Un Canon por Tráfico, que recupera totalmente o parcialmente, los costes fijos de financiación, amortización del inmovilizado y, en su caso, los necesarios para garantizar el desarrollo razonable de las infraestructuras ferroviarias. Los operadores se reparten estos costes en función del valor económico del servicio medido como plazas-Km, toneladas-Km y TEU-Km, distinguiéndose los pagos por tipo de línea y hora del día.
- Un Canon de Acceso, mediante el que se recuperan los costes administrativos de asignación de capacidad y supervisión de la circulación. Se abona de una vez en función de los km del surco solicitado y tipo de actividad del operador.
- Un Canon de Circulación, mediante el que se cubren los costes variables de mantenimiento, explotación y gestión de la infraestructura. Se abona según los Km efectivamente recorridos en función de la línea, hora, servicio y tipo de tren.

Los cánones por la utilización de estaciones de viajeros, otras instalaciones ferroviarias y sus servicios, que se fijan y modifican de la misma manera que los de uso de la vía, son los siguientes:

- Canon por la utilización de estaciones por parte de viajeros, que se diferencia en función del tiempo de recorrido y la categoría de la estación.
- Canon por el estacionamiento y la utilización de andenes en las estaciones, que se diferencia en función de la categoría de la estación, tiempo de estacionamiento y cambios de vía a petición del operador.
- Canon por el paso en cambiadores de ancho, que se paga en función de los pasos de tren por la instalación.

- Canon por la utilización de vías de apartado, en función del tipo de tren, tiempo de ocupación y tipo de línea.
- Canon por la prestación de servicios que precisen del uso del dominio público ferroviario, que se abona en función de la intensidad de uso de del dominio público

Canon por el uso de la infraestructura: barreras a la entrada en España

En referencia al canon el pago cubre, derecho uso; uso de los cambios de vía y bifurcaciones; control de la circulación; provisión de información; y utilización de las instalaciones de electrificación. Cabe destacar que al abonar el canon no hay una desagregación clara de de conceptos por los que se paga

En comparación con la UE, el precio del canon es alto en los servicios de largo recorrido, mientras que en Regionales es menor a la media⁷. El canon es neutral con los nuevos entrantes en cuanto a que hay un precio estandarizado; publicado; y sin descuentos por peticiones por adelantado o por volumen. Sin embargo, el precio de una cancelación como porcentaje del surco no es alto⁸, lo cual podría invitar a realizar prácticas anticompetitivas.

3.3.1 Acceso al material rodante

Para el transporte de mercancías el acceso a lo vagones se puede realizar mediante compra directa, en el mercado de primera y segunda mano, o alquiler (leasing). A este respecto hay que señalar la importancia de la flota de los operadores privados de mercancías en España. Para la adquisición de locomotoras, unidades de tren y de coches de viajeros hay que recurrir a la compra directa, pues el principal proveedor potencial, Renfe, no oferta su material rodante de segunda mano excedente.

En España el leasing debido al apoyo público en la compra no se desarrolla. En la actualidad sólo hay una compañía de alquiler de material rodante ubicada en España Alpha Trains Ibérica, filial de Alpha Trains, antigua Angel Trains⁹.

Acceso al material rodante: barreras a la entrada en España

Antes de nada hay que recordar que en el caso de España esta cuestión resulta aún más compleja debido al tamaño mucho más reducido de un mercado de segunda mano donde poder comprar o arrendar este material debido a la especificidad de las vías de ancho ibérico. Aunque en el material de ancho estándar esta dificultad no existe persiste el problema de las dificultades para homologar material rodante extranjero que ya analizamos.

Mientras que el acceso a los vagones de segunda mano es mucho más sencillo en España que en el resto de la UE en el caso de los coches de viajeros la dificultad es mucho mayor y en locomotoras la dificultad es exagerada. No obstante la situación ha podido mejorar ya que a principio de 2010, Renfe a puesto a la venta en el mercado español 50 locomotoras eléctricas excedentes. Esto supone un importante cambio de orientación frente a la política

⁷ Para un análisis más detallado véase www.railcalc.org.

⁸ Periodos de elaboración más cortos y la posibilidad de conseguir surcos spot reducen el período de tiempo en la que se puede producir una entrada en el mercado para aprovechar una oportunidad de tal manera que aumentaría la disputabilidad del mercado.

⁹Esta compañía tiene locomotoras de la serie 4000 de Vossloh en leasing con las nuevas operadoras de mercancías.

anterior de achatarrar el material rodante o bien venderlo a operadores extranjeros (Argentina¹⁰, Chile...).

En el mercado de primera mano no se observan dificultades, aparte del precio, en adquirir máquinas mientras que si las hay en coches de viajeros.

3.3.1 Acceso al personal cualificado

Las Escuelas Técnico-Profesionales (ETPs de aquí en adelante) de Renfe son las encargadas de la formación de los maquinistas. En estos momentos hay ETPs en Madrid, Barcelona y Valencia, León.

Además de las ETP recientemente están habilitadas para impartir formación CETREN, CEFOIM y la escuela de maquinistas del operador privado de mercancías Acciona.

Acceso al personal cualificado: barreras a la entrada en España

En el Libindex, se señalan que las dificultades para contratar maquinistas de Renfe, es como en la media de la UE: enormes. Sin embargo los problemas a la hora de entrenar y contratar maquinistas es mucho menor. Esta situación ha mejorado al ampliarse recientemente la oferta de centros de formación.

3.3.1 Acceso a servicios prestados en la infraestructura no básica

Con referencia al acceso a talleres la orden FOM/233/2006, de 31 de enero, por la que se regulan las condiciones para la homologación del material rodante ferroviario y de los centros de mantenimiento y se fijan las cuantías de la tasa por certificación de dicho material, fija el procedimiento para homologar los centros de mantenimiento ferroviario y sus condiciones de funcionamiento así como disposiciones para su acceso no discriminatorio.

En cumplimiento de lo establecido en la disposición transitoria quinta del Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, que aprueba el RSF hasta tanto no exista otra oferta alternativa en el mercado, RENFE-Operadora habrá de prestar a otras empresas ferroviarias y titulares de material rodante ferroviario el servicio de mantenimiento de dicho material.

Para la prestación de los servicios denominados complementarios y auxiliares, tras la modificación de la LSF por la Ley Omnibus de 25/2209 de 22 de diciembre y el RD 100/2010 de 2010 se consideran como servicios complementarios: la corriente de tracción; el suministro de combustible; el precalentamiento de trenes de viajeros; el de maniobras y cualquier otro relacionado con las operaciones sobre el material ferroviario prestado en las instalaciones de mantenimiento, reparación, suministro y terminales de carga y estaciones de clasificación; y los específicos para control del transporte de mercancías peligrosas y para la asistencia a la circulación de convoyes especiales.

De otro lado se consideran servicios auxiliares: el acceso a la red de telecomunicación; el suministro de información complementaria; y la inspección técnica del material rodante.

¹⁰ En 2008, El Consejo de Administración de Renfe del 29 de enero autorizó la firma de un contrato con la Secretaría de Transporte de la República Argentina, para la venta de material rodante - locomotoras, automotores, composiciones Talgo, coches y furgones- por importe de 120 millones de euros. Renfe también prevé participar en el mantenimiento y la rehabilitación de parte del material vendido, que ha dejado de prestar servicio en España, fundamentalmente por la ampliación de la red de alta velocidad.

Corresponde, con carácter obligatorio, al administrador de infraestructuras la prestación de los servicios adicionales pues la Ley establece que si el administrador de infraestructuras ofrece cualesquiera servicios complementarios, deberá prestarlos a cualquier empresa ferroviaria que los solicite en condiciones objetivas y no discriminatorias. De igual modo, no corresponde al ADIF la aprobación de las tarifas, tal como aparecía en la anterior redacción de La LSF, sino simplemente el proponer al Ministerio la aprobación de las tarifas de dichos servicios, lo que de alguna forma modera y actualiza las facultades del ADIF en relación con estos servicios, de acuerdo con la nueva demanda de servicios. Se permite la autoprestación de servicios ferroviarios en las zonas de servicio ferroviario de Adif y se liberaliza en el resto.

Acceso a servicios prestados en la infraestructura no básica: barreras a la entrada en España

El Libindex señala dificultades en el acceso a los centros de mantenimiento. A este respecto hay que destacar que el mayor oferente es la unidad de negocio de Renfe (Integria), que cuenta con 108 instalaciones repartidas por todo el territorio nacional encargadas del mantenimiento del material rodante. Además, Renfe Operadora ha creado sociedades mixtas con los mayores constructores para el mantenimiento y construcción de los trenes.

En España una parte importante de los servicios complementarios y auxiliares los presta en exclusiva Adif, lo que garantiza el acceso e imparcialidad en las prestaciones. Además Adif no puede rechazar las peticiones de prestación de servicios complementarios. Por esta razón ha mejorado la situación presentada en el Libindex en el que el acceso a las instalaciones donde se prestan los servicios complementarios y auxiliares para mercancías en España se sitúa en una muy buena posición no ocurre lo mismo con los servicios de viajeros.

4. CONCLUSIONES

A continuación se resumen las principales barreras a la entrada que según estudio desarrollado en la presente Comunicación permanecen en el sector ferroviario español.

Una vez establecida la liberalización total de los servicios internacionales de mercancías y viajeros, la barrera con respecto a la posibilidad legal de acceso que resta es el establecimiento de empresas ferroviarias que puedan acceder al mercado de transporte de viajeros bien mediante el régimen de libre acceso o bien mediante competencia regulada. Cabe llamar la atención acerca de la importancia de la transparencia en el desarrollo reglamentario necesario para la liberalización. Así cabe destacar en primavera de 2010 la incertidumbre, entre otros sobre: la OM que desarrolla como será la licitación de servicios de interés público, el régimen de apertura de los servicios; el régimen de cabotaje para los servicios internacionales..

Desde la perspectiva del poder regulador es preciso aplicar las disposiciones del Proyecto de Ley de Economía sostenible que aumentan el poder legal y la autonomía de Comité de Regulación Ferroviario (CRF). No obstante, la reforma para aumentar la independencia del Ministerio de Fomento puede ser insuficiente lo cual es problemático máxime si consideramos que la compañía establecida, Renfe, y ADIF son parte del grupo empresarial del este Ministerio. Además es preciso aumentar la transparencia de las actuaciones del CRF mediante la publicación de una memoria anual y una mejora de su comunicación externa.

En lo que se refiere a la información sobre el acceso, es necesario mejorar el tiempo de respuesta a las peticiones de información así como el personal dedicado a estos menesteres

y su capacidad de información en otras lenguas de la UE, aparte del castellano e inglés. También sería deseable una mayor coordinación entre los entes emisores de información.

Las barreras administrativas son de gran importancia. En el ámbito de la concesión de la licencia, es preciso una mayor autonomía funcional de la autoridad otorgante con respecto a Renfe. Además, es necesario agilizar el plazo para otorgar la licencia y el preciso para la convalidación de las licencias extranjeras. Debido a que el periodo en el que expira la licencia es muy corto debería plantearse si es posible aumentar el plazo así como reducir la cantidad de capital desembolsado exigible por Ley.

En el ámbito del certificado de seguridad, para disminuir los trámites burocráticos es preciso simplificarlo, disminuir el tiempo preciso para su tramitación y hacer más transparentes las decisiones sobre su concesión. Es necesario estudiar si puede reducirse su coste y aumentar su plazo de vigencia si no se utiliza.

Finalmente, para terminar con las barreras administrativas en el caso de la homologación, de nuevo es precisa una independencia más clara entre el otorgante y Renfe así como simplificarlo, disminuir el tiempo preciso para su tramitación y hacer más transparentes las decisiones sobre su concesión.

En las barreras operativas es preciso estudiar si es necesaria la reserva de surcos que en el ámbito de la apertura a la competencia Renfe disfrutará y la posibilidad de asignar mediante criterio económicos peticiones de surcos coincidentes entre dos o más operadores de viajeros cuando se realice la apertura del mercado. En el ámbito del cano sería necesaria una desagregación clara de de conceptos por los que se paga y aumentar el coste de cancelación de un surco.

El acceso al material rodante es especialmente problemático en España siendo necesaria una política sobre la disposición del material rodante excedente de Renfe y el impulso de compañías de alquiler de material rodante, bien creando una pública o bien fomentando la operación de las privadas mediante cláusulas que limiten los riesgos que asumen.

Así mismo, es necesario garantizar el acceso a lo talleres en los que Renfe goza de una situación dominante. Para ello es necesaria garantizar la cláusula que recoge la Ley sobre la concesión de acceso obligatorio a lo talleres de Renfe si no se dispone de alternativas viables de mercado especificando que se entiende por alternativa viable de mercado.

Tabla 2. LIBINDEX Resultados detallados

BARRERAS DE ACCESO			
Barreras informativas			
1. Tiempo requerido para la provision de información	2,67	3,00	1,09825
A) Identificación de los contactos	3,89	5,00	1,540063
B) Tiempo de respuesta	2,78	2,50	1,660244
2. Calidad de la información personal	2,45	2,72	0,548894
A) Disposición de la información	1,96	2,06	0,562408
Disponibilidad	1,59	2,00	0,618886
Forma	1,55	2,00	0,609142
Actualización	1,29	1,50	0,424793
Lenguas	1,60	1,20	0,815239
Folletos	0,21	0,10	0,230261
Documentos impresos	0,29	0,05	0,184341
B) Publicación de la Declaración de red	6,20	7,00	1,797323

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

3. Calidad de la información personal	2,34	1,95	0,454871
Disponibilidad	1,98	1,75	0,768759
Manejo lingüístico	1,74	1,00	0,487741
Número de instituciones	1,82	1,25	0,758968
Confidencialidad	2,25	2,50	0,720577
Barreras administrativas			
I. Licencia	2,44	2,12	0,41867
A) Dependencia del organismo otorgante	0,94	0,30	0,215298
B) Tiempo requerido para su emisión	0,25	0,10	0,136082
Tiempo requerido para su emisión para mercancías	2,80	0,80	1,635774
Tiempo legal requerido para su emisión para mercancías	1,09	0,80	0,451777
Tiempo real requerido para su emisión para mercancías	4,50	0,80	3,445564
Para servicio de viajeros	2,10	1,20	1,435538
Tiempo legal requerido para su emisión para viajeros	1,09	0,80	0,509399
Tiempo real requerido para su emisión para viajeros	3,11	1,60	2,96302
C) Validez con respecto al tipo de transporte	0,33	0,50	0,221446
D) Validez con respecto a la red	0,48	0,50	0,089888
Validez con respecto a la red de Mercancías	4,83	5,00	0,866025
Validez con respecto a la red Viajeros largo recorrido	2,42	2,50	0,433013
Validez con respecto a la red Viajeros regional	2,25	2,50	0,720577
E) Reconocimiento de licencias de terceros países	0,87	0,90	0,214834
Reconocimiento de licencias de terceros países en mercancías	4,56	4,50	0,847319
Reconocimiento de licencias de terceros países en viajeros	4,11	4,50	1,5525
F) Examination period for licences of other EU states	0,51	0,30	0,370637
Periodo de examen de licencias de otros estados de la UE para mercancías	2,65	1,50	1,90048
Periodo de examen de licencias de otros estados de la UE para viajeros	2,41	1,50	1,921723
G) Período de validez de la licencia	0,79	1,00	0,328761
Periodo de validez de la licencia para mercancías	4,02	5,00	1,649484
Periodo de validez de la licencia para viajeros	3,89	5,00	1,705947
H) Verification intervals for licences	0,34	0,40	0,151794
Periodo de verificación para mercancías	3,33	4,00	1,506397
Periodo de verificación para viajeros	3,37	4,00	1,535431
I) Validez de las licencias sin utilizar	0,14	0,05	0,166024
Periodo de validez de licencia sin utilizar en mercancías	1,39	0,50	1,660244
Periodo de validez de licencia sin utilizar en viajeros	1,39	0,50	1,660244
J) Cantidad de seguro	0,23	0,35	0,183467
Cantidad de seguro por Ley en mercancías (EUR millón)	2,31	3,50	1,819489
Cantidad de seguro por Ley en viajeros (EUR millón)	2,22	3,50	1,867399
K) Disponibilidad del seguro legal en el Mercado doméstico	0,40	0,50	0,179882
Disponibilidad del seguro legal en el mercado doméstico para mercancías	4,17	5,00	1,781313
Disponibilidad del seguro legal en el mercado doméstico para viajeros	3,83	5,00	2,009592
L) Capital desembolsado por Ley	0,25	0,05	0,225952
Capital desembolsado por Ley para mercancías	2,48	0,50	2,259516

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

Capital desembolsado por Ley para viajeros	2,48	0,50	2,259516
M) Pago por la emisión de la licencia	0,58	0,10	0,327035
Pago por la emisión de la licencia mercancías	2,94	0,50	1,631029
Pago por la emisión de la licencia mercancías para toda la red	2,87	0,50	1,696107
Pago por la emisión de la licencia mercancías para una parte de la red	3,02	0,50	1,655303
Pago por la emisión de la licencia para pasajeros	2,87	0,50	1,696107
Pago por la emisión de la licencia viajeros para toda la red	2,80	0,50	1,755537
Pago por la emisión de la licencia viajeros para una parte de la red	2,94	0,50	1,722774
N) Condiciones adicionales a las dispuestas por la Directiva	0,46	0,50	0,130335
Condiciones adicionales a las dispuestas por la Directiva: mercancías	4,56	5,00	1,303349
Condiciones adicionales a las dispuestas por la Directiva: pasajeros	4,56	5,00	1,303349
O) Transparencia del proceso	0,42	0,50	0,161214
2. Certificado de seguridad	1,24	0,71	0,467358
A) Independencia el organismo otorgante	0,41	0,15	0,163974
B) Tiempo requerido para la emisión	0,44	0,14	0,299144
Tiempo requerido para la emisión : mercancías	2,39	0,50	1,750319
Tiempo legal requerido para la emisión en mercancías	0,71	0,20	0,638106
Tiempo real requerido para la emisión en mercancías	4,06	0,80	3,364436
Tiempo requerido para la emisión; viajeros	2,06	0,90	1,547767
Tiempo legal requerido para la emisión en viajeros	0,71	0,20	0,638106
Tiempo real requerido para la emisión en viajeros	3,41	1,60	3,071197
C) Nivel de detalle	0,46	0,15	0,409581
Nivel de detalle : mercancías	1,50	0,50	1,379799
Nivel de detalle : viajeros	1,57	0,50	1,377733
D) Validez con respecto al tipo de transporte efectuado	0,67	1,00	0,442893
E) validez con respecto a la red	0,71	0,10	0,417597
validez con respecto a la red : mercancías	3,57	0,50	2,087986
validez con respecto a la red : viajeros	3,57	0,50	2,087986
F) Reconocimiento de los CS de otros Estados de la UE	0,37	0,30	0,253578
Reconocimiento de los CS de otros Estados de la UE : mercancías	2,02	2,50	1,274615
Reconocimiento de los CS de otros Estados de la UE : viajeros	1,72	0,50	1,361089
G) Tiempo requerido para el examen de los CS de otros Estados de la UE	0,33	0,15	0,376566
Tiempo requerido para el examen de los CS de otros Estados de la UE mercancías	1,65	1,00	1,875012
Tiempo requerido para la examinación de los CS de otros Estados de la UE : Pasajeros	1,61	0,50	1,892969
H) Periodo de validez del CS	0,20	0,20	0,122028
Período de validez del CS en mercancías	2,06	2,00	1,211589
Período de validez en pasajeros	2,00	2,00	1,248075
I) Período de verificación del CS	0,27	0,45	0,187767
Período de verificación del CS: mercancías	2,80	4,50	1,907774
Período de verificación del CS : viajeros	2,65	4,50	1,925611
J) Expiración del CS	0,20	0,05	0,159012
Expiración del CS: mercancías	1,98	0,50	1,590123

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

Expiración del CS viajeros	1,98	0,50	1,590123
K) Coste de emisión del CS (EUR)	0,54	0,10	0,388437
Coste de emisión del CS mercancías	2,69	0,50	1,942184
Coste de emisión del CS : viajeros	2,69	0,50	1,942184
L) Transparencia del proceso de emisión	0,35	0,05	0,207773
3. Homologación del material rodante	2,05	1,06	0,71619901
A) Independencia del organismo otorgante	1,24	0,45	0,49192192
B) Tiempo requerido para la expedición	0,76	0,15	0,50317567
Tiempo necesario tren AVE	1,17	0,25	0,84742361
Tiempo legal tren AVE	0,89	0,20	0,76124055
Tiempo real tren AVE	3,79	0,80	3,37660798
Tiempo locomotora eléctrica de mercancías	2,50	0,50	1,77795939
Tiempo legal locomotora eléctrica de mercancías	0,95	0,20	0,76980036
Tiempo real locomotora eléctrica de mercancías	4,06	0,80	3,41526655
Tren diesel de viajeros	1,42	0,25	0,88957639
Tiempo legal tren diesel de viajeros	0,96	0,20	0,77724035
Tiempo real tren diesel de viajeros	4,71	0,80	3,34541401
C) Grado de detalle	0,41	0,15	0,41145458
D) Honorarios máximos (EUR)	0,85	1,20	0,55361979
Honorarios máximos: AVE	1,18	2,00	1,01150786
Honorarios máximos locomotora eléctrica de mercancías	3,06	4,00	1,95297275
Honorarios máximos tren diesel viajeros	1,43	2,00	0,99473328
E) Reconocimiento de la homologación de otros países de la UE	0,69	0,15	0,40064833
Reconocimiento tren AVE	0,95	0,25	0,69696125
Reconocimiento locomotora eléctrica	2,44	0,50	1,46978108
Reconocimiento tren diesel de viajeros	1,20	0,25	0,72734051
F) Tiempo requerido para la verificación de la homologación expedida en otros Estados de la UE	0,23	0,10	0,17261521
a) Período legal	0,32	0,20	0,28466254
Tren AVE	0,31	0,25	0,16397397
Locomotora eléctrica de mercancías	0,87	0,50	0,91559767
Tren diesel viajeros	0,44	0,25	0,45779883
b) Valores empíricos	1,98	0,80	1,66348414
Tren ave	0,50	0,25	0,51422084
Locomotora eléctrica de mercancías	1,37	0,50	1,22154216
Tren diesel viajeros	0,60	0,25	0,55148078
G) Transparencia del proceso de emisión	0,94	0,45	0,57317156
Barreas operativas			
1. Petición de surcos	1,89	2,06	0,44091106
A) Peticiones no discriminatorias	0,61	0,60	0,30401773
Mercancías	3,59	5,00	1,83657832
a) Peticiones para la asignación de surcos	1,41	2,00	0,79900223
b) Derechos de uso de los surcos asignados	1,50	2,00	0,73247813
c) Uso de desvíos	1,50	2,00	0,73247813

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

d) Control del tren	1,33	2,00	0,78642326
e) Otra información	1,44	2,00	0,76668525
Viajeros	2,51	1,00	1,96397034
a) Peticiones para la asignación de surcos	0,98	0,40	0,80064077
b) Derechos de uso de los surcos asignados	1,04	0,40	0,80829038
c) Uso de desvíos	1,04	0,40	0,80829038
d) Control del tren	0,98	0,40	0,80064077
e) Otra información	0,98	0,40	0,80064077
B) Miembro de Rail Net Europe	0,43	0,50	0,1629063
C) Relaciones contractuales con el administrador de la infraestructura	0,68	0,40	0,32145503
Mercancías	3,39	2,00	1,60727513
Viajeros	3,39	2,00	1,60727513
D) Acuerdos marco	0,97	1,00	0,17320508
E) Proceso estándar de asignación de surcos	0,84	1,00	0,26469625
Mercancías	4,28	5,00	1,40283596
Viajeros	4,17	5,00	1,62906297
F) Periodos para la petición de surcos	0,26	0,40	0,11607297
Mercancías	2,59	4,00	1,17699942
Viajeros	2,59	4,00	1,14385513
G) Surcos Spot	0,48	0,50	0,08660254
Mercancías	4,83	5,00	0,8660254
Viajeros	4,83	5,00	0,8660254
H) Mecanismos transparentes para resolver conflictos	0,83	1,00	0,3371998
Mercancías	4,15	5,00	1,68599899
Viajeros	4,15	5,00	1,68599899
I) Existencia de reglas de prioridad para ciertos EF	0,90	1,00	0,26527414
J) Registro y comunicación de los surcos disponibles	0,59	0,60	0,25928622
Mercancías	2,96	3,00	1,2704173
Viajeros	2,91	3,00	1,4008036
K) % de surcos no utilizados	0,17	0,25	0,14040945
Mercancías	1,04	0,50	1,03706247
Viajeros	2,33	4,50	2,04751256
L) Provisión de información relevante sobre la oferta de surcos	0,79	1,00	0,34409963
2. Marco de tarificación por el uso de la infraestructura	3,73	3,64	0,804496
A) canon estandarizado	0,47	0,50	0,120096
Mercancías	4,67	5,00	1,200961
Viajeros	4,67	5,00	1,200961
B) Alcance de la tarificación	0,86	0,24	0,286931
a) Petición para la asignación de surcos	1,80	0,20	0,576461
b) Derecho a utilizar los surcos	1,40	1,50	0,360288
c) Uso de desvíos	1,67	0,20	0,712525
d) Control del tren	1,25	0,15	0,534394
e) Provisión de otra información	1,25	0,15	0,534394

Barreras a la entrada en el ferrocarril español

f) Utilización de catenaria	1,20	0,15	0,57194
C) Publicación del marco tarifario	0,47	0,50	0,120096
Mercancías	4,67	5,00	1,200961
Viajeros	4,67	5,00	1,200961
D) Estructura del canon	2,65	3,00	0,885459
Mercancías linera/degresivo	4,33	5,00	1,629063
Viajeros linera/degresivo	4,50	5,00	1,441153
E) Descuentos	0,88	0,55	0,236562
Descuentos por cantidad	4,33	0,50	1,629063
Descuentos por reserva anticipada	4,50	5,00	1,441153
F) Canon medio para tráfico tipo (EUR)	1,73	2,40	0,645068
Mercancías	2,26	5,00	1,347151
Viajeros larga distancia	1,81	0,50	0,645221
Viajeros Regional	1,68	2,50	0,739721
G) Coste de la cancelación entre 0-7 días antes como % del canon	0,40	0,10	0,384789
I) Mercado nacional de acceso al material rodante	0,46	0,55	0,295058
a) Segunda mano	1,82	1,63	1,41107
Locomotoras	1,81	0,50	1,494529
Coches	0,73	0,25	0,831836
Vagones	1,08	2,50	0,890657
b) Primera mano	2,80	3,88	1,810451
Locomotoras	3,20	5,00	2,020373
Coches	0,82	0,25	0,95024
Vagones	1,56	2,50	1,041432
J) Reclutamiento de personal cualificado	0,57	0,50	0,394983
K) Formación de personal cualificado	0,32	0,25	0,192727
3. Servicios en infraestructuras no básicas	1,49	1,42	0,580678
A) Acceso no discriminatorio	0,59	0,55	0,322291
Mercancías	3,36	5,00	1,733939
a) Corriente de tracción	1,39	2,00	0,810473
b) Abastecimiento de fuel	1,30	2,00	0,808361
c) Terminales	0,91	1,50	0,582325
d) Playas de clasificación	1,06	1,50	0,593447
e) formación de trenes	0,74	1,00	0,380433
f) Apartaderos	0,67	1,00	0,40344
g) Talleres	0,64	1,00	0,407934
Pasajeros	2,55	0,50	2,039538
a) Corriente de tracción	1,01	0,20	0,837443
b) Abastecimiento de fuel	1,01	0,20	0,843949
c) Estaciones	0,80	0,15	0,640463
d) formación de trenes	0,80	0,15	0,640463
e) apartaderos	0,79	0,15	0,645597
f) Talleres	0,68	0,15	0,594688

B) Publicación de un marco tarifario estandarizado de servicios en estaciones	0,50	0,10	0,455733
C) Publicación de un marco tarifario estandarizado	0,60	0,55	0,420165
Mercancías	3,33	5,00	2,214463
Viajeros	2,67	0,50	2,291288
D) Acceso a servicios	0,66	0,82	0,325261
a) Corriente de tracción	1,63	2,00	0,70755
b) Pre calentamiento de trenes	0,95	0,20	0,827587
c) Provisión de fuel, servicios de maniobras	1,46	2,00	0,784101
d) Vigilancia de mercancías peligrosas	1,21	2,00	0,785408
e) Asistencia a trenes especiales	1,31	2,00	0,790975
E) Sistema de tarificación de la corriente para la tracción	0,83	1,00	0,356263
F) Acceso a los servicios auxiliares	0,71	1,00	0,334364
a) Acceso a la red de telecomunicación	2,87	4,00	1,62684
b) Provisión de información suplementaria	2,27	3,00	1,153923
c) Inspección técnica del material rodante	1,97	3,00	1,186462
G) Acceso a información	0,35	0,10	0,316484
De la compañía establecida	1,20	0,40	1,289007
En la estación	1,67	0,40	1,592432
Información de tráfico	0,61	0,20	0,696102
H) Asignación no discriminatoria de los números de tren	0,38	0,28	0,168207
Mercancías	4,33	5,00	1,629063
Viajeros	3,17	0,50	2,253203

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KIRCHNER E IBM., Rail Liberalisation Index 2007. Market Opening: Rail Markets of the Member States of the European Union, Switzerland and Norway in comparison, IBM, Berlín, 2008.

Nash, C. A., y Preston, J.M., “Barriers to Entry in Railway Industry”, Working Paper N°. 354, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds, 1992, pp. 15-18.

Ruiz Rua, A., Martínez Aguado, T., “El nuevo sector ferroviario y la competencia: detección de barreras de entrada”, Estudios de construcción y Transportes, n°. 108, 2008, pp. 135-146

Shries, J.D., Preston, J.M., Nash, C.A., y Wardman, M., “Rail Privatization: The Economic Theory”, Working Paper N°. 419, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds, 1994, pp. 15-18

Starkie, D. N., “BR. Privatization Without Tears”, Economic Affairs, octubre/diciembre, 1984.

Swartz, M., y Reynolds, R.: “Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure. Comment”, American Economic Review, vol. 73, n°. 3, 1983, pp. 488-490.

Tye, W.B., The Theory of Contestable Markets. Applications to Regulatory and Antitrust Problems in Railway Industry, Greenwood, New York, 1990.

**PARTE II.
ARTÍCULOS DEL GRUPO DE
ESTUDIOS E
INVESTIGACIÓN DE
ENERGÍA Y EMISIONES EN
EL TRANSPORTE**

Curso 2009-2010

Energía y trazado ferroviario

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

*Este trabajo constituye la base de la presentación realizada en las segundas jornadas en el
"Curso sobre diseño de ferrocarril" organizadas por el CEDEX, el día 13 de noviembre de
2008.*

Energía y trazado ferroviario

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan las relaciones entre el trazado de las líneas ferroviarias y el consumo de energía por parte de los trenes que las utilizan.

Se expone, en primer lugar, que las inversiones en la construcción de nuevas líneas ferroviarias y en la mejora de las existentes se justifican en muchas ocasiones por la reducción del consumo y de las emisiones del conjunto del sistema de transporte. Por ello es conveniente tener en cuenta en el diseño de los trazados las condiciones necesarias para lograr este objetivo. Y para conseguirlo es necesario, por una parte, lograr que el consumo del ferrocarril sea reducido; pero también (y sobre todo) que el ferrocarril resulte atractivo en términos de velocidad media, para que sea capaz de atraer viajeros de otros modos de transporte, especialmente del avión y del automóvil. En este sentido, según estudios del autor, solo una pequeña parte de los ahorros de energía y de emisiones atribuibles al tren de alta velocidad proceden del hecho de que éste consume menos energía que el tren convencional al que sustituye (lo que, por cierto se debe, en buena parte a la diferencia de los trazados). La mayor parte del ahorro energético procede de que el tren de alta velocidad (gracias precisamente al atractivo que le otorga su rapidez) es capaz de captar muchos viajeros del avión y del coche particular.

La más importante de las medidas a adoptar en la fase de diseño del trazado para reducir el consumo de energía del tren es lograr un perfil de velocidades homogéneo. Con este tipo de perfil de velocidades se evita el frenado de los trenes (y la consiguiente pérdida de energía) cuando deben lograr las deceleraciones requeridas por las sucesivas limitaciones de velocidad. Puede estimarse que los trenes españoles pierden actualmente un 13% de la energía en los frenados para cumplimentar limitaciones de velocidad, lo que supone una pérdida de energía al año del orden de 427 GWh en el sistema ferroviario español.

También resulta de especial importancia evitar limitaciones puntuales de velocidad con valores absolutos bajos o muy inferiores a las limitaciones de los tramos precedentes. Estas limitaciones (además de producir el efecto pernicioso de la heterogeneización de las velocidades), requieren para mantener el mismo tiempo de viaje: o bien reducir las “marchas en deriva”; o bien aumentar la velocidad máxima en otros puntos del trazado. Ambas medidas suponen un aumento del consumo de energía. Si como consecuencia de una limitación puntual de velocidad se aumenta el tiempo de viaje, el tren puede perder atractivo frente a otros modos y tener menos viajeros, incrementándose el consumo de energía y las emisiones en el conjunto del sistema de transporte.

La elevación relativa de la cota de las estaciones en las que efectúa parada un número importante de trenes (por ejemplo, en líneas de cercanías o de Metro) también reduce la energía disipada en los procesos de deceleración, y además “lamina” la punta de potencia requerida en el arranque, reduciéndose en consecuencia las pérdidas óhmicas. Por esta última razón, es conveniente también garantizar que el arranque de los trenes no se produzca en rampa, por lo que las zonas de parada deberán en lo posible situarse en horizontal, lo que además es favorable para la seguridad.

Se menciona también la necesidad de armonizar el valor de las pendientes y las velocidades admitidas en las zonas en pendiente, al objeto de reducir el frenado en estas zonas para no rebasar las velocidades máximas.

1. INTRODUCCIÓN

No es preciso insistir en la importancia que tiene, en el momento actual, la reducción del consumo de energía y de las emisiones en todos los sectores, pero especialmente en el del transporte, que además de ser el sector mayor consumidor de energía en España, es el que tiene más alto ritmo de crecimiento y mayor dependencia del petróleo (y, por ello, de las importaciones del exterior).

El ferrocarril es, en ciertas condiciones, el modo de transporte que menos energía consume, debido fundamentalmente a la gran capacidad de los vehículos y a que claramente existe una relación inversa entre el tamaño del vehículo y el consumo específico por unidad transportada: vehículos más grandes permiten menores consumos por viajero o por tonelada transportada.

Por ello, el fuerte apoyo que el ferrocarril está recibiendo en todos los países del ámbito europeo y especialmente en España (que se concreta en la construcción de nuevas infraestructuras), se explica y justifica en un intento de contribuir con estas inversiones a reducir los costes totales del transporte, y singularmente los costes energéticos y ambientales. En definitiva, se invierte en el ferrocarril para que se puedan reducir el consumo de energía en general y de petróleo en particular, así como las emisiones de gases de efecto invernadero.

Esto hace que resulte de la máxima importancia lograr que el ferrocarril consuma poca energía. Pero esto no es suficiente: el servicio del ferrocarril ha de ser atractivo en términos de velocidad media, confort y frecuencia para que sea capaz de atraer viajeros de otros modos de transporte menos eficientes energéticamente: singularmente del avión y del coche particular. De poco serviría un tren muy eficiente energéticamente pero que, por ser poco atractivo en términos de lentitud, falta de frecuencia e incomodidad (y además caro), transportase pocos viajeros y que éstos siguieran viajando en el avión o en coche. Por lo tanto, en el diseño de los trazados conviene no olvidar las condiciones necesarias para que el tren consuma poca energía, pero también las que requiere para que resulte atractivo en términos de velocidad, frecuencia/capacidad y coste operativo y así pueda captar viajeros que empleaban otros modos de transporte menos eficientes energéticamente.

No se trata en este documento, desde luego, de sugerir que deba anteponerse la optimización energética a otros criterios que hay que tener en cuenta para el diseño del trazado. Tan solo se pretende poner de relieve cuáles son los factores de éxito que pueden conducir a lograr un trazado energéticamente eficiente, para que sean aplicados cuando ello sea posible; o cuando no entren en contradicción con otros objetivos de mayor prioridad en el caso concreto de que se trate.

Seguidamente se analizan los puntos en los que se estima que el diseño del trazado puede contribuir a reducir el consumo de energía y las emisiones de los trenes en la fase de explotación posterior de la línea. Y también lo necesario para mantener y aumentar el atractivo comercial del ferrocarril.

1. HOMOGENEIDAD DEL PERFIL DE VELOCIDADES

La homogeneidad del perfil de las velocidades practicadas por los trenes a lo largo de su recorrido es uno de los factores que más inciden en su consumo de energía. Tan importante es este factor que (en parte gracias a él) se produce un hecho aparentemente paradójico, como es que el tren de alta velocidad (pese a la relación cuadrática de la velocidad instantánea con la resistencia aerodinámica) consume normalmente menos energía que el tren convencional. Entre las razones del menor consumo energético del tren de alta velocidad pueden citarse el menor tiempo de uso de los auxiliares (aire acondicionado), o características propias del tren (como su ligereza, menor rozamiento y mejor perfil aerodinámico), un mayor coeficiente de carga, etc... Pero el componente que más aportación en términos absolutos tiene es precisamente la menor necesidad de frenar para decelerar, no sólo en las paradas comerciales, sino en todo el trazado.

El autor ha publicado un artículo comparando el consumo de energía de un tren de alta velocidad en una línea de alta velocidad y con el de tren convencional en una línea mejorada para 200 km/h; en ambos casos con la misma distancia e idéntico número de paradas comerciales. Al analizar el detalle de las razones del menor consumo del primero, se muestra que la energía disipada en el freno de los trenes es un 58 % menor que en la línea convencional, lo cual por si solo permite compensar ampliamente el aumento de la energía empleada en vencer la mayor resistencia aerodinámica.

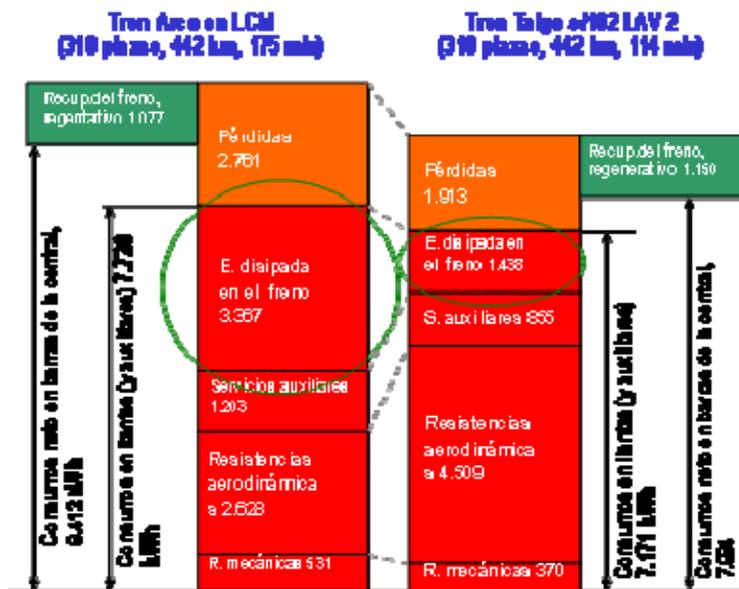


Fig. 1. Comparación del consumo desglosado de un tren de alta velocidad (derecha) con un tren convencional (izquierda). Se ha señalado la energía disipada en el freno por las variaciones de la velocidad. Fuente: García Álvarez (2005)

La energía disipada en el freno de los trenes representa entre un 12 % (alta velocidad) y el 56 % (Metro) de la energía importada en el pantógrafo de un tren¹¹. Si se descuenta el

¹¹ Este dato, como otros de consumo de los trenes citados en este artículo, ha sido obtenido con el simulador de consumos ALPI 2810®, propiedad de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, en su versión 7 de septiembre de 2008.

efecto de paradas comerciales y del frenado en las pendientes, resulta que la energía perdida en el frenado de los trenes por limitaciones de velocidad oscila entre el 6,83% (tren de alta velocidad media distancia) y el 20,92% (tren de media distancia convencional).

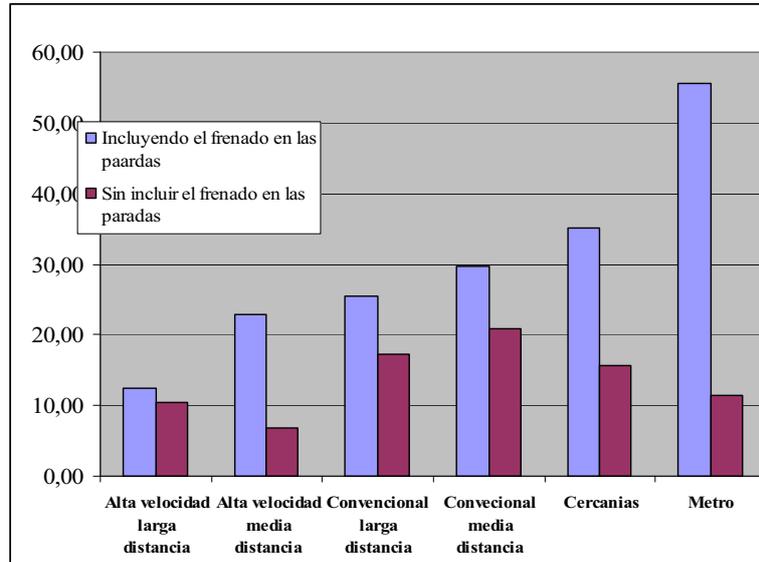


Fig. 2. Porcentaje de energía perdida en el freno (sobre la energía importada en el pantógrafo) según el tipo de servicio. Elaboración propia con el simulador ALPI2810@

En España, en el año 2007 la cantidad de energía disipada por el freno de los trenes eléctricos (incluyendo ferrocarriles convencionales, Metros y tranvías) fue de alrededor de 1.282 GWh [4], lo que representa el 39% de la energía importada en el pantógrafo. Puede estimarse que, de ellos, alrededor de 427 GWh hora al año (el 13% del total) se disipa al frenar los trenes en reducciones de velocidad no debidas a las paradas comerciales. Esta cantidad de energía es aproximadamente equivalente al consumo de 106.000 hogares españoles, y cuatro veces más de la energía generada por todas las plantas fotovoltaicas en España en 2006, que fue de 104 GWh [2].

Una parte de esta pérdida de energía se reduce cuando se utiliza el freno regenerativo. Actualmente en España se recupera cerca de la mitad de la energía generada en el freno eléctrico de los trenes. Aún cuando, afortunadamente, se está ampliando mucho el uso de este tipo de freno y la eficiencia de la recuperación, resulta imposible aprovechar la totalidad de esta energía. En un escenario optimista, en el que todos los trenes eléctricos tuvieran freno regenerativo, existieran subestaciones reversibles y sistemas de almacenamiento de energía, el aprovechamiento de la energía del freno podría llegar hasta el 80% en el caso de la tracción eléctrica, siendo de difícil la recuperación en la tracción diesel ya que solo podría realizarse en acumuladores embarcados (baterías) y en cantidades relativamente pequeñas.

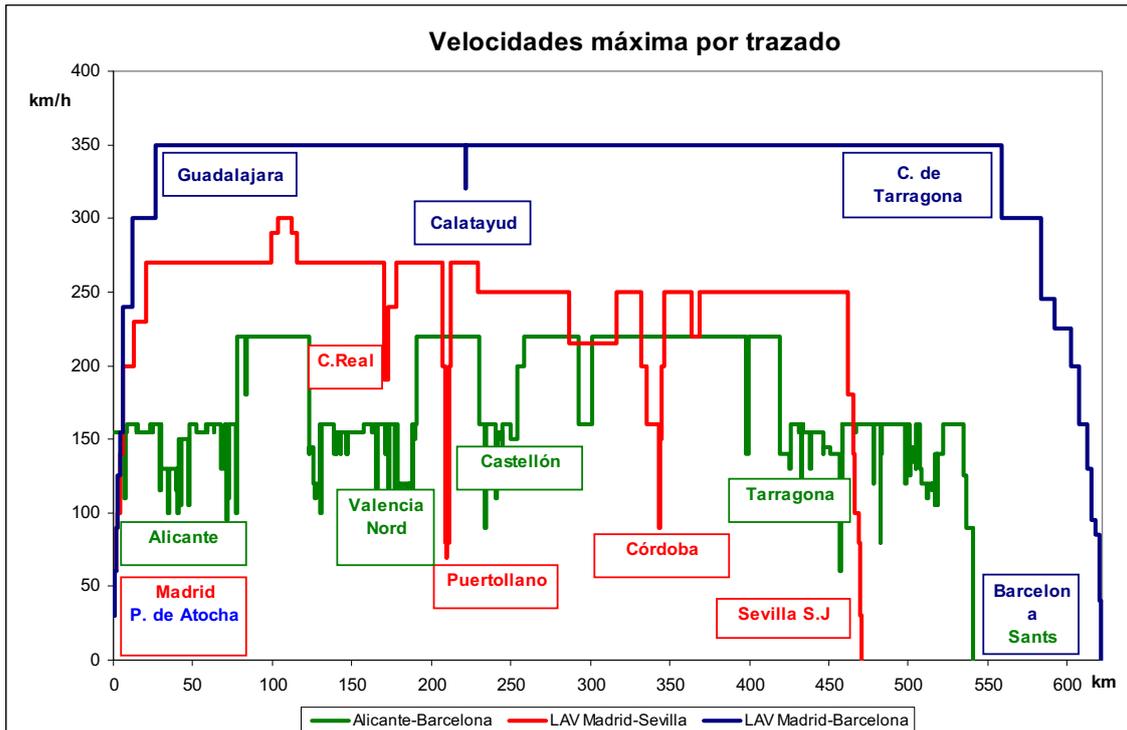


Fig. 3. Perfil de velocidades máximas por trazado en diversas líneas ferroviarias españolas. El perfil de la línea de Alicante a Barcelona tiene para un tren sin paradas comerciales el mismo efecto energético que si tuviera una parada cada 17 kilómetros; el de Madrid a Sevilla cada 120 km y el de Madrid a Barcelona cada 550 km

2. EVITACIÓN DE LIMITACIONES PUNTALES RELEVANTES DE VELOCIDAD

Otra medida de diseño del trazado que reduce el consumo es evitar limitaciones puntuales relevantes de velocidad, entendiendo por tales aquellas que suponen reducción a valores absolutos muy bajos (inferiores a 50 km/h) o reducciones bruscas de la velocidad comparadas con aquella a la que el tren venía circulando antes de llegar a la limitación (por ejemplo, de un porcentaje de reducción mayor que el 50% de la velocidad previa del tren).

Estas limitaciones pueden tener su origen en el propio trazado y en otras ocasiones en la velocidad de paso por la posición desviada de los aparatos de vía, lo que suele aflorar cuando éstos están situados a cierta distancia de la estación o del punto de parada.

Las limitaciones de velocidad de este tipo tienen un efecto potencial serio sobre las velocidades medias. Si se desea mantener el mismo tiempo de viaje (lo que, por ejemplo puede ser necesario para que en una ruta concreta el tren pueda competir con el avión o con el coche particular), su efecto en el consumo puede analizarse en dos casos diferentes:

1. Si se desea mantener el mismo tiempo de viaje con una limitación puntual, es necesario reducir la longitud del recorrido que el tren circula en deriva, y por ello aumenta el consumo de energía. En el AVE de Madrid a Sevilla, los estudios para la implantación de la conducción económica en trenes sin freno regenerativo mostraron que circular en deriva en un 6% del tiempo de viaje suponía reducciones de consumo del orden del 8%. Una limitación temporal de velocidad a 120 km/h en una rampa de 12 mm/m que estuvo vigente durante tres meses en el año 1996 y que suponía una pérdida de 2,5 minutos, originó en esos meses un aumento del 3% del consumo de energía en toda la línea, no tanto por la energía

perdida al frenar para cumplimentar la limitación, sino sobre todo porque reducía la posibilidad de realizar conducción económica.

2. En el caso de las líneas con freno regenerativo, la “marcha en deriva” no es una forma eficiente de ahorrar energía; y además hay casos (con cualquier tipo de freno) en los que la exigencia de un tiempo de viaje ajustado no permite la “marcha en deriva” (por ejemplo, ocurre en las cercanías en hora punta). En estos casos, será necesario elevar las velocidades máximas en otros puntos del trazado para conseguir el mismo tiempo de viaje. Ello provoca, a su vez, un mayor consumo de energía por la mayor velocidad máxima, por la mayor heterogeneidad del perfil de velocidades y por el aumento de la desviación típica de la velocidad media (lo que provoca un aumento del consumo debido a la forma cuadrática de su función). Esta elevación de las velocidades máximas requiere normalmente inversiones mayores que las necesarias para eliminar la limitación de velocidad objeto del problema.

Cuando no sea posible reducir la “marcha en deriva” (por ejemplo porque no existan tramos en que se circule en deriva) o aumentar la velocidad máxima, la existencia de una limitación puntual aumenta el tiempo de viaje, y el tren puede perder atractivo frente a otros modos y puede tener menos viajeros, aumentando así el consumo de energía y las emisiones en el conjunto del sistema de transporte. En ese sentido no deben despreciarse incrementos aparentemente pequeños del tiempo de viaje, porque en muchos casos (especialmente cuando se compite con el avión en el rango entre las dos y las tres horas, o cuando se compite con el coche en distancias cortas), el número de viajeros captados por cada minuto reducido es relevante. En el caso de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, cada minuto ganado supone quitar al avión 8.350 viajeros al año, y en consecuencia, evitar la emisión anual de casi medio millón de kilogramos de dióxido de carbono.

López Sánchez [7] ha recordado que es muy difícil recuperar en plena vía los tiempos perdidos en las estaciones y pone el ejemplo de que una limitación a 30 km/h tan solo en los 500 metros siguientes al andén puede suponer una pérdida de hasta 2 minutos, y que es necesario elevar la velocidad de 300 a 320 km/h a lo largo de 80 kilómetros para ganar solo un minuto.

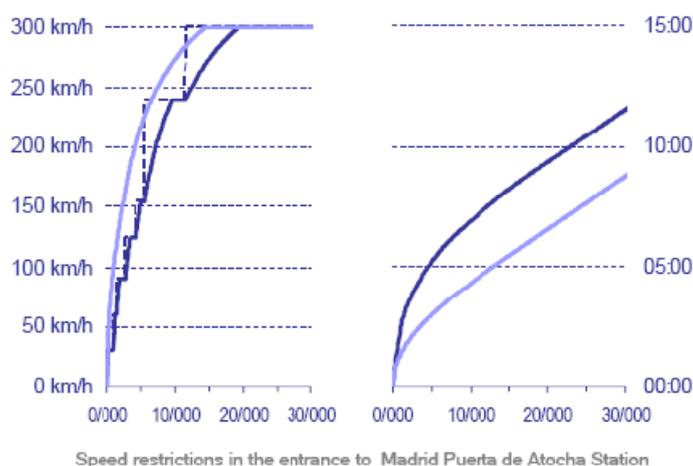


Fig. 4. Restricciones de velocidad en la entrada de la estación de Madrid Puerta de Atocha. Fuente: López Sánchez (2008)

Todo ello pone de relieve la necesidad de evitar al máximo las limitaciones extravagantes de velocidad, especialmente las de valor absoluto muy bajo (que suponen grandes pérdidas de tiempo, mayor energía disipada en el freno y menor ahorro aerodinámico).

3. ELEVACIÓN DE LA RASANTE EN ESTACIONES CON PARADAS DE MUCHOS TRENES

En los tramos en los que un tren precisa decelerar, la existencia de una rampa en dicho tramo de deceleración supone una menor necesidad de usar el freno, y por lo tanto, una menor disipación de energía (además de un menor desgaste del material rodante por evitarse el uso de los frenos de fricción).

Ello significa que existen ventajas energéticas cuando la estación está situada en una cota relativamente más alta que los tramos colaterales. En tal caso, cuando el tren se aproxima a la estación por cualquiera de los dos lados, encuentra una subida (rampa) cuando debe decelerar, lo que ayuda a reducir el uso del freno. Cuando el tren sale de la estación debe acelerar, y en este caso encuentra siempre una bajada (pendiente), lo que reduce la necesidad de potencia.

Esto es especialmente importante en las estaciones de cercanías o en aquellas en las que el porcentaje de trenes con parada sea elevado frente al porcentaje total de los trenes que circulan. A los trenes que circulan sin parada esta medida no les supone perjuicio ninguno, salvo que el valor de la rampa sea superior a un determinado valor que es conveniente evitar que se rebase.

Esta configuración es especialmente apropiada y favorable para estaciones subterráneas, porque además se reduce la altura a salvar por ascensores y escaleras mecánicas. Véase sobre este tema el trabajo de Clemente López.

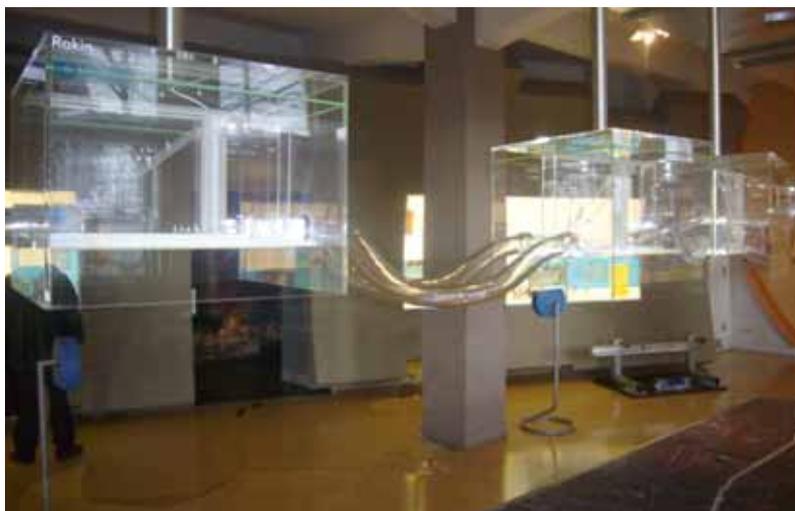


Fig. 5. Maqueta de la nueva Noord/Zuidlijn Lijn del Metro de Ámsterdam, en la que se puede apreciar cómo las estaciones están en una cota más alta que los tramos colaterales.

El valor de inclinación tiene relación con la deceleración o aceleración que se desea conseguir: cuando el tren sube una rampa de valor i mm/m, la fuerza gravitatoria (en daN) que se opone a su marcha tiene por valor M (en t) $\times i$ (mm/m) y la resistencia al avance tiene valores del orden de 2 a 3 daN/t.

Por ello, la fuerza total retardadora es, aproximadamente, de $(i + 2,5) \times 9,81 N/t$ y la deceleración que supone es de $(i + 2,5) \times 9,81 / 1000 m/s^2$.

Si se deseara, por ejemplo, una deceleración de $1 m/s^2$ (que es un valor alto como deceleración de servicio, adecuado para un servicio de Metro o cercanías) se precisaría una rampa de 99 mm/m, a todas luces excesiva para las posibilidades del ferrocarril. Si se adoptan inclinaciones menores, también será menor la deceleración, y por ello el tren

perderá más tiempo en el proceso de deceleración; o, si se desea emplear el mismo tiempo, necesitará el apoyo del freno.

Debe retenerse la idea de que la parte de deceleración que se consiga con la rampa evita el uso del freno en esa parte. En los trenes que carezcan de freno regenerativo, o en los que teniendo freno regenerativo no puedan aprovechar toda la energía del frenado, la ventaja es mayor.

También debe tenerse en cuenta que las señales de entrada a las estaciones no deben estar en rampas excesivas (ya que los trenes se detienen con frecuencia a ante ellas), y que los escapes situados a la entrada de la estaciones deben estar en rasante constante. Como la señal de entrada debe estar delante de los escapes de la entrada de la estación, una buena solución puede ser iniciar el acuerdo vertical justamente después de la señal de entrada, a fin de que la zona de rampa de valor constante coincida con la zona de escapes, y terminada ésta, comience el acuerdo vertical para finalizar la zona en rampa.

Una vez fijado el valor de la rampa, su longitud (en el caso de pudiera escogerse) depende de la velocidad de entrada a la rampa. La ecuación correspondiente es

$$V_f^2 - V_i^2 = 2 \times a \times l$$

de donde se deduce, por ejemplo, que con una deceleración de $a = - 0,4m^2$, y siendo la velocidad de entrada al andén de 15 km/h, y la velocidad a la que inicia la subida de la rampa de 80 km/h, la longitud de la rampa debe ser de 596 metros y la diferencia de cota de 23 metros.

En la tabla se figuran (para diferentes rampas y declaraciones) la energía ahorrada en una estación en la que paran 200 trenes de 250 toneladas cada uno por sentido y día. Se compara la energía con el número de hogares que consumen esa energía en un día, así como las emisiones de gases de efecto invernadero necesarias para producir la energía eléctrica cuyo uso se evita, expresando éstas en el recorrido (en km) en que un automóvil produce el mismo nivel de emisiones. Todos los resultados están calculados para dos casos: a) cuando no hay freno regenerativo, y B) cuando lo hay se aprovecha el 50% de la energía regenerada.

Tabla 1. Ahorro de energía y emisiones por situar una estación en cota más alta que los tramos colaterales

Ahorro de energía y emisiones por situar una estación en cota más alta que los tramos colaterales											
Velocidad inicial en acceso a rampa (km/h)	Velocidad del tren en final rampa (km/h)	Deceleración en la rampa (m/s ²)	Inclinación aproximada de la rampa (mm/m)	Tiempo en la rampa (s)	Longitud de la rampa (m)	Diferencia de cota (m)	Energía no disipada en el freno por un tren (kWh)	Sin freno regenerativo		Con aprovechamiento del 50% de freno regenerativo	
								Nº de hogares con consumo equivalente a energía ahorrada por 200 trenes al día por sentido	Kilómetros a recorrer con un coche para producir la emisiones de CO2 evitadas en un día	Nº de hogares equivalente a energía ahorrada por 200 trenes al día por sentido	Kilómetros a recorrer con un coche para producir la emisiones de CO2 evitadas en un día
80	0	0,4	38,27	200	617	24	21,43	787	10.104	315	4.042
100	0	0,4	38,27	250	965	37	33,49	1.229	15.788	492	6.315
160	0	0,4	38,27	400	2.469	95	85,73	3.146	40.417	1.258	16.167
80	15	0,4	38,27	163	596	23	20,68	759	9.749	304	3.900
100	15	0,4	38,27	213	943	36	32,74	1.201	15.433	481	6.173
160	15	0,4	38,27	363	2.447	94	84,98	3.119	40.062	1.247	16.025
80	30	0,4	38,27	125	530	20	18,42	676	8.683	270	3.473
100	30	0,4	38,27	175	878	34	30,48	1.118	14.367	447	5.747
160	30	0,4	38,27	325	2.382	91	82,72	3.036	38.996	1.214	15.599
80	0	0,3	28,08	267	823	23	21,43	787	10.104	315	4.042
100	0	0,3	28,08	333	1.286	36	33,49	1.229	15.788	492	6.315
160	0	0,3	28,08	533	3.292	92	85,73	3.146	40.417	1.258	16.167
80	15	0,3	28,08	217	794	22	20,68	759	9.749	304	3.900
100	15	0,3	28,08	283	1.257	35	32,74	1.201	15.433	481	6.173
160	15	0,3	28,08	483	3.263	92	84,98	3.119	40.062	1.247	16.025
80	30	0,3	28,08	167	707	20	18,42	676	8.683	270	3.473
100	30	0,3	28,08	233	1.170	33	30,48	1.118	14.367	447	5.747
160	30	0,3	28,08	433	3.176	89	82,72	3.036	38.996	1.214	15.599

Hipotesis:	Valor	Unidad
Rendimiento total en tracción y freno regenerativo	0,8	kWh/llantas / kWhsalida centralgeneradora, o kWhaprovechados / kWhregenerados/llanta
Consumo hogar medio	10,9	kWh / día
Emisiones generación de electricidad España 200	330	grCO ₂ / kWh
Emisiones producidas por un coche	140	grCO ₂ / km
Masa del tren	250	toneladas
Número de trenes por sentido y día con parada	200	trenes

Como puede observarse, para un línea de Metro en la que se admita una rampa de 38 mm/m (correspondiente a una deceleración de $0,4 \text{ m/s}^2$) y suponiendo una velocidad inicial de 80 km/h y una velocidad final 15 km/h, la energía ahorrada en una estación equivale a 759 hogares si no hay freno regenerativo o a 304 hogares contando con el freno regenerativo. Las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas cada día equivalen a las producidas por un automóvil medio circulando 9.749 kilómetros y 3.900 kilómetros respectivamente.

En una línea de cercanías, con una rampa máxima de 28 mm/m y velocidad inicial de 100 km/h y velocidad de entrada al andén de 30 km/h, el ahorro de energía diario equivale al consumo de 1.118 y 447 hogares (con y sin freno regenerativo) y las emisiones evitadas en un día equivalente a las producidas por la circulación de un coche en 14.467 km y 5.747 km respectivamente.

4. TRAZADO DE LÍNEA EN LAS ZONAS DE PARADA Y DE ESTACIONAMIENTO

En las zonas en las que es frecuente la parada de trenes (por ejemplo, en las zonas de andén en las estaciones) es conveniente que la rasante sea horizontal, evitándose con ello rampas en el sentido de arranque del tren. Desde el punto de vista de la energía, el perfil de la zona de estacionamiento no tiene influencia (puesto que el consumo dependerá del perfil de la zona de deceleración previa a la parada), pero la aceleración en horizontal o en suave pendiente reduce la potencia necesaria en el arranque, y por ello las pérdidas óhmicas en la catenaria, además de disminuir el tiempo necesario para el proceso de aceleración con la consiguiente ganancia de tiempo inducida por este concepto.

En el caso de que el trazado en la zona en la que se ubica una estación tenga una rampa fuerte y continuada puede estudiarse la posibilidad de trazar con diferente perfil las vías generales y las de apartado, manteniendo una zona aproximadamente horizontal en estas últimas, como se ha hecho por ejemplo en los casos de las estaciones de alta velocidad de Segovia-Guiomar y Ponte Genil-Herrera.

Esquema de la estación de Segovia

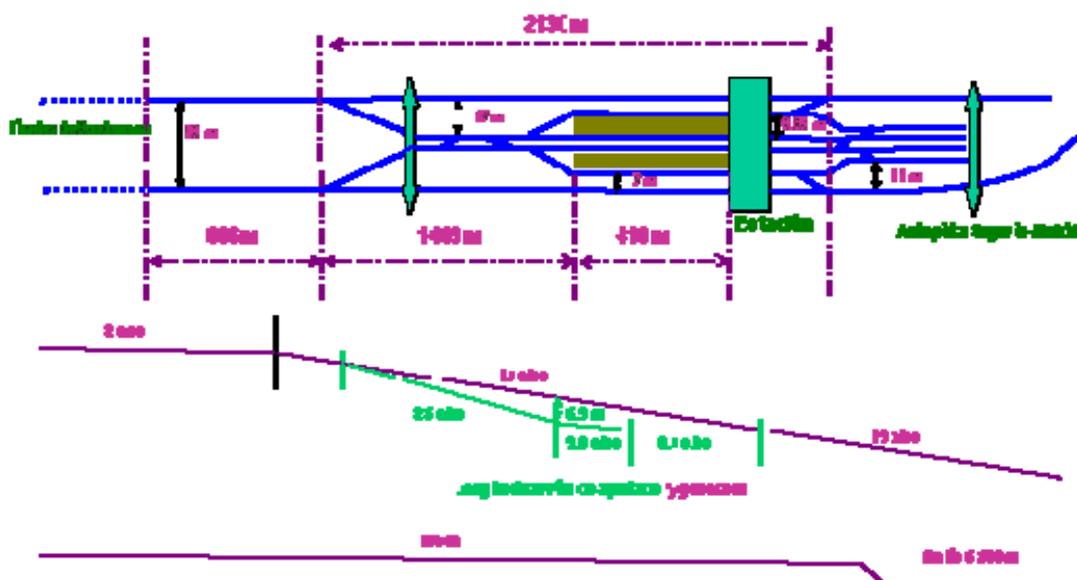


Fig. 6. Planta y perfil de la estación de alta velocidad de Segovia-Guiomar. Fuente: GIF (2001)

5. PENDIENTES ARMONIZADAS CON LA VELOCIDAD

Para la reducción del consumo de energía resulta conveniente adecuar el valor de las pendientes con las velocidades máximas que se admiten en las zonas de dichas pendientes, porque la combinación local de una pendiente fuerte (mayor que la “pendiente de equilibrio”) con una velocidad admitida reducida (lo que es frecuente por las curvas existentes en estas zonas), puede obligar al tren a frenar para no rebasar la velocidad admisible, perdiendo así energía.



Fig. 7. En las pendientes fuertes el tren pierde energía al frenar para no rebasar la velocidad máxima. Los 25 mm/m de la LAV de Madrid a Barcelona penalizan el consumo de los trenes que van a menos de 235 km/h (Foto AGA)

Para cada velocidad admisible (por el trazado o por el material) en la zona de pendiente se puede calcular la “pendiente de equilibrio” (p_e), que sería aquella con la que, a dicha velocidad, se igualan la componente aceleradora de la fuerza gravitatoria y la resistencia al avance. Se calcula con la fórmula:

$$p_e = a + b \times V_{\max} + c \times T_f \times V_{\max}^2$$

(en la que a , b y c son los coeficientes específicos de la resistencia al avance y T_f es el factor de túnel). En ella se observa que, cuanto mayor sea la velocidad máxima admisible, mayor será la pendiente de equilibrio.

Si la pendiente real (p_r) es mayor que la pendiente de equilibrio, hay una parte de la energía potencial que debe ser disipada con el freno con la consiguiente pérdida de energía, concretamente esa parte es:

$$\text{Energía perdida en el freno} = M \times g \times (p_r - p_e) \times L$$

Como puede observarse, esta pérdida de energía es menor cuanto mayor sea p_e ; y por ello, la pérdida de energía es menor cuanto mayor sea V_{\max} .

Como por otra parte, en la mayor parte de las líneas ferroviarias se circula indistintamente en los dos sentidos, esta reflexión es válida en todos los puntos de la línea, siendo la recomendación general adaptar el valor de las inclinaciones de la rasante a la velocidad

permitida por el trazado en el tramo correspondiente (o ésta adaptarse a aquéllas), al objeto de los valores de la pendiente real no superen el de la pendiente de equilibrio.

En este aspecto merece ser destacado lo eficiente del trazado (desde este punto de vista) en la línea de alta velocidad de Madrid a Sevilla, en la que las pendientes reales máximas (12 mm/m) casi coinciden con el valor de la pendiente de equilibrio para la velocidad máxima (300 km/h) y para los coeficientes a , b y c del tren AVE de la serie 100. Ello significa que si el tren circula a 300 km/h nunca debe hacer uso del freno para evitar el rebase de la velocidad por efecto de la pendiente.

En el caso de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, con pendientes máximas de 25 mm/m, los trenes deben emplear con frecuencia el freno para evitar el exceso de velocidad en las pendientes. Por ejemplo, un tren AVE serie 103, circulando a 300 km/h de velocidad máxima, pierde 1.260 kWh (el 11% de la energía importada en pantógrafo) por el freno en las pendientes (sin perjuicio de que una parte de esta energía se pueda recuperar gracias al freno regenerativo). El mismo tren circulando a 350 km/h sólo pierde 392 kWh (alrededor del 3% de la energía importada en el pantógrafo). Se da la paradoja que de si el tren puede circular a una velocidad mayor en las pendientes, además de tener menos tiempo de viaje, consume menos energía.

La posibilidad de reducir el consumo de energía evitando el uso del freno en las pendientes fue la razón por la que, en los años 80, se elevó la velocidad de circulación en la línea de alta velocidad de París a Lyon (en la que son muy frecuentes las rampas y pendientes de 35 milímetros por metro) desde los 260 km/h con que comenzó la explotación a 270 km/h. Con esta elevación de velocidad máxima se logró una reducción del consumo de energía compatible con un tiempo de viaje más reducido. En la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona cuando el 7 de mayo de 2007 se elevó la velocidad máxima en el tramo de Madrid a Camp de Tarragona desde los 280 km/h a los 300 km/h, se produjo una reducción del consumo de energía de los trenes del orden del 3% a pesar de que se introdujo una reducción simultánea de los tiempos de viaje

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLEMENTE LÁZARO, I. (2005): “Reducción del consumo energético por elevación relativa en la cota de altura de la estaciones ferroviarias”. Proyecto de Fin del Master de Sistemas Ferroviarios ICAI curso 2003-2004.

COMISIÓN NACIONAL DE LA ENERGÍA (2008): “Información básica de los sectores de la energía 2007”.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2005): “El tren de alta velocidad no es un depredador de energía”, en *Dyna*, junio 2005, LXXX-5, pág. 33 a 38; edición actualizada en mayo de 2007.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2008a): “Inventario de consumos de energía del ferrocarril en España”, Nota Técnicas ElecRail/1, versión 4.0. de 8 de octubre de 2008.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2008b): “Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad” en “La importancia de la velocidad en el ferrocarril”; Ed.: Fundación Caminos de Hierro, Córdoba, 2008.

GESTOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS (GIF), DIRECCIÓN DE EXPLOTACIÓN (2001). “Estación de Segovia. Datos básicos para el proyecto de ejecución”.

LOPEZ SÁNCHEZ, C. (2008): “Basic principles for the operation of high speed lines and trains. The traffic control centre”, en “5 th Training on high speed systems”, París, junio de 2008.

Influencia de la arquitectura y el tamaño de los trenes en sus costes operativos y su consumo de energía

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento recoge, corregidos, ampliados y actualizados los contenidos de las ponencias: “Influencia de la arquitectura y el tamaño de los trenes en sus costes operativos y su consumo de energía”, presentada en el Congreso de Ingeniería Ferroviaria celebrado en Madrid en julio de 2010; y la ponencia “Incidencia del tamaño y la arquitectura de los trenes de viajeros en su consumo de energía y coste de explotación presentada en V Congreso de Innovación Ferroviaria celebrado en Gijón el 13 de julio de 2010.

Influencia de la arquitectura y el tamaño de los trenes en sus costes operativos y su consumo de energía

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

En lo que se refiere al tamaño de los trenes, en España (y para el servicio en la red de ancho de vía ibérico), ha habido automotores de ejes de gasolina de 18 plazas (como el automotor 9001 de 18 CV de la Compañía de Argamasilla a Tomelloso de 1937), y los más pequeños actualmente son los automotores de bogies de la serie 596 (“Tamagochis”) de 59 plazas en 24,3 metros de longitud. Los trenes de mayor capacidad en España son las ramas autopropulsadas de cercanías de la serie 450 que en sus dos pisos pueden transportar 1.012 viajeros sentados en una longitud de 159,4 metros. En el extranjero merece ser destacado el tren japonés de alta velocidad Max E4 (de JR-East) de dos pisos y caja ancha que, en 400 metros de longitud, puede alojar hasta 1.634 viajeros sentados, muchos de ellos en primera clase. En cuanto a la arquitectura, en la actualidad hay trenes de viajeros remolcados por locomotora (y dentro de ellos, con o sin cabina de conducción en el extremo contrario) y autopropulsados. Unos y otros pueden ser articulados, parcialmente articulados o no articulados; de ejes o de bogies (o de rodales tipo Talgo); de caja ancha o normal; de un piso o de dos pisos... casi todas las combinaciones son posibles, dando lugar a una variada gama de arquitecturas que, cruzada con la diversidad de tamaños, hace que sean las posibilidades casi infinitas.

Esta variedad ofrece a quienes compran y operan los trenes muchas alternativas, cada una de ellas con unas determinadas consecuencias económicas u operativas. El objeto del presente trabajo es precisamente analizar las relaciones entre la arquitectura y el tamaño de los trenes de viajeros y su consumo de energía y costes operativos.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza el efecto de las diferentes arquitecturas y tamaños de los trenes en el consumo de energía, las emisiones y los costes operativos del servicio.

El ferrocarril (a diferencia del resto de modos de transporte) presenta una gran variabilidad en la arquitectura y tamaños de los vehículos: entre 59 plazas (el caso de un autopropulsado de un único vehículo) y 1.634 plazas sentadas (tren de gálibo ancho y dos pisos). Los trenes pueden ser remolcados o autopropulsados; de tracción concentrada o distribuida; no articulados, articulados total o parcialmente; de caja ancha o normal; con uno o dos pisos; y la combinación de estas características da lugar a diversas arquitecturas. En cuanto a la tracción, emplean gasóleo o electricidad (y ésta con muchos orígenes diferentes). Además,

los trenes son diferentes dependiendo del país en el que operen y de las características de su explotación, a diferencia de los automóviles, autobuses y aviones que son prácticamente iguales en todo el mundo. Todas estas peculiaridades del ferrocarril hacen que el cálculo de su consumo de energía y de sus costes operativos sea más complejo y que resulte desaconsejable generalizar conclusiones para todo el sistema ferroviario.

El estudio identifica los parámetros relevantes que influyen en el consumo de energía y en el coste operativo: masa, número de ejes, superficie transversal y “perímetro mojado” o “piel”. Seguidamente, se estudian los valores de cada uno de estos parámetros relevantes para cada arquitectura y las funciones que los relacionan con la capacidad del tren. Puede observarse cómo, en general, los parámetros relevantes específicos (divididos por la capacidad) se reducen a medida que aumenta la capacidad, pero lo hacen en distinta proporción según sea la arquitectura. También se observa cómo, para una misma capacidad, los parámetros tienen valores muy diferentes según sea la arquitectura del tren.

Los resultados del estudio se han empleado en el proyecto de investigación EnerTrans, que estudia el consumo de los diferentes modos de transporte; ElecRail que analiza todas las formas de reducir el consumo del ferrocarril eléctrico y en el estudio “Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario” realizado por la FFE para el Instituto para la diversificación y ahorro energético (IDAE).

1.1 Unidades de tamaño o capacidad

El “tamaño” del tren es una de las variables con las que, en este estudio, se pretende relacionar el consumo de energía y el coste operativo.

Cuando hablamos de “tamaño” no nos referimos a las dimensiones del tren (longitud, altura, anchura), sino a su capacidad de transporte. Es preciso emplear una unidad adecuada para medir la capacidad del tren. Podría pensarse en las plazas del tren como la unidad de medida idónea de la capacidad (y por ello del “tamaño” del tren), pero si se emplean las plazas se están haciendo diferentes los consumos y costes operativos de trenes iguales en su tamaño, arquitectura y características pero con una distribución de asientos diferente (por ejemplo, dos trenes iguales, uno sólo con 2ª clase y otro con 1ª y 2ª; o uno que sólo admite viajeros sentados y otro que, además admite viajeros de pie).

Por lo tanto, como unidad de capacidad de los trenes de viajeros emplearemos la “superficie útil bruta”, entendiendo por tal toda aquella superficie interior del tren en la que pueden ubicarse butacas para viajeros sentados, viajeros de pie, plataformas, aseos, cafeterías, restaurantes, etc. Se excluye de la “superficie útil bruta del tren” la empleada para las cabinas de conducción, los espacios para motores, convertidores, equipamiento (incluyendo los cajones y armarios con más de 550 milímetros de altura sobre el piso), los pasos entre coches, las escaleras y ascensores para comunicar los dos pisos y el espesor ancho de los paramentos exteriores.

Adoptando la equivalencia, puramente convencional, de que una “plaza estándar” requiere un metro cuadrado de superficie útil bruta en un tren de anchura normal, se puede emplear el mismo número que mide la superficie útil bruta para designar una “capacidad estándar” que es algo más intuitivo. La equivalencia entre la capacidad estándar y la capacidad real dependerá del tipo de servicio, pero no del tipo de tren. Si, por ejemplo, para servicios de Metro muy densos puede ser de hasta 5-6 plazas reales por “plaza estándar” (de pie), y en trenes de alta velocidad puede bajar a 0,8 plazas reales por cada plaza sentada (o incluso de 0,6 en trenes nocturnos). En trenes de caja ancha es preciso hacer una corrección, pues por aumentar la anchura de la caja no es necesario aumentar la anchura del pasillo, y por ello la

capacidad equivalente (a los efectos del cálculo del presente estudio) aumentan en una plaza por cada 40 centímetros que aumente la anchura interior.

1.2 Unidades de medida del consumo y del coste

El estudio requiere la utilización de unidades de medida adecuadas, tanto para el consumo de energía (y emisiones asociadas), como para el coste operativo. En ambos casos deben ser indicadores relativos, relacionados con la capacidad ofertada por el tren. Podría pensarse que las unidades adecuadas serían el “kilovatio-hora/plaza-kilómetro” para el consumo de energía; los “gramos de dióxido de carbono/plaza-kilómetro” para las emisiones de gases de efecto invernadero y los “céntimos de euro/plaza-kilómetro” para el coste operativo.

Sin embargo, por las razones apuntadas anteriormente, se emplea la superficie útil bruta del tren (y su equivalente de “plazas estándar”) no sólo como indicador del tamaño del tren y para relacionar éste con los costes y el consumo; sino también como divisor de los consumos, emisiones y costes absolutos.

La comparación de los consumos, emisiones o costes entre dos o más trenes de diferente tamaño o arquitectura debe hacerse, para una adecuada valoración de las diferencias, cambiando solamente una de las características. Es decir, para un mismo tamaño o capacidad del tren se pueden comparar los consumos, emisiones y costes de diversas arquitecturas y configuraciones; y para una misma arquitectura o configuración se pueden comparar los consumos, emisiones y costes con distintos tamaños o capacidades. La comparación clásica entre un “TGV” normal de ocho remolques y un “TGV Dúplex” del mismo número de remolques pero de dos pisos no refleja exactamente la mejora que supone la configuración de dos pisos, puesto que en resultado se están incluyendo tanto el efecto de la configuración de dos pisos, como el mayor tamaño y capacidad del tren. La comparación más correcta para identificar el efecto de los dos pisos sería entre dos trenes de la misma capacidad, uno de ellos de dos pisos (por ejemplo de seis coches) y el otro de un piso (por ejemplo, de ocho coches).

Ello no obstante, es cierto que arquitecturas de caja ancha y de dos pisos permiten trenes de mayor capacidad con la misma longitud; y que en muchas ocasiones (por ejemplo, en Metros o cercanías con andenes que no se pueden prolongar), la longitud disponible constituye un límite irremediable, por lo que tales arquitecturas ofrecen en estos casos dos efectos positivos que es posible evaluar separadamente: el de los menores consumos y costes específicos derivados de la arquitectura (para la misma capacidad) y el de los menores consumos y costes específicos derivados de la mayor capacidad.

2. ARQUITECTURAS DE LOS TRENES

2.1 Clasificación de las posibles arquitecturas

Desde el punto de vista de su arquitectura, pueden establecerse tres diferentes criterios de clasificación de los trenes:

1. Según sean: a) de tracción concentrada (incluyendo los trenes traccionados por locomotora); o b) de tracción distribuida. Esta terminología habitual no se acomoda con las características de algunos de los más recientes trenes, en los que la tracción se puede considerar “concentrada” (en menos del 40% de los ejes), pero en los que todos los coches pueden ocupados por viajeros. Por ello, parece preferible hablar de trenes de “viajeros concentrados” (en algunos vehículos del tren) y de “viajeros distribuidos” (en todos los

vehículos del tren); y cada una de las dos categorías sería compatible con una “tracción concentrada” (en menos del 40% de los ejes) o con una “tracción distribuida”.

2. Según el tipo de rodaje, puede distinguirse entre; a) trenes no articulados; b) trenes articulados; c) trenes parcialmente articulados; y d) trenes articulados con rodales Talgo;

3. Desde el punto de vista del tamaño de la caja, existen: a) trenes de caja normal; b) trenes de caja ancha; c) trenes de dos pisos; y d) trenes de caja ancha y de dos pisos.

Cada una de estas clasificaciones inducen características muy diferentes en cuanto a las prestaciones del tren y por ello, en cuanto a su consumo de energía y emisiones.

2.2 Viajeros concentrados o distribuidos

2.2.1 Viajeros concentrados

Los trenes clásicos están integrados normalmente por una o varias locomotoras que traccionan (remolcan) un número variable de coches o de vagones. Esta configuración es la aplicada en casi todos los trenes de mercancías, y en muchos trenes de viajeros (especialmente en trenes de velocidades convencionales cuando son muy largos). En España este tipo de configuración se aplica poco en trenes de viajeros, pero en otros países europeos mantiene una presencia importante.

Una configuración equivalente es la configuración de “tracción concentrada” (que en realidad debería llamarse de “viajeros concentrados”) en algunos trenes de alta velocidad. Aunque éstos son trenes autopropulsados y no cabe referirse a “máquinas” separables del resto de los vehículos del tren, el hecho es que en la composición hay dos (o a veces uno) vehículos llamados “motrices” o “cabezas motrices” cuya función es equivalente a la de una locomotora, si bien suelen tener una única cabina de conducción.

Trenes de alta velocidad representativos de esta arquitectura son todos los derivados del TGV francés (incluyendo al AVE serie 100 de España); los trenes Talgo Bombardier de alta velocidad series 102 y 112; los trenes alemanes de la primera generación (ICE 1) y de la segunda generación (ICE 2, éste con una única motriz); y los trenes de alta velocidad italianos.

2.2.2 Viajeros distribuidos

Los trenes de alta velocidad de tracción distribuida no cuentan con vehículos exclusivamente dedicados a la tracción, sino que ésta se encuentra distribuida por todo el tren, y en los extremos del mismo únicamente hay sendas cabinas de conducción.

En trenes convencionales la configuración de “viajeros distribuidos” es muy frecuente en trenes de cercanías (todos los españoles han sido de este tipo), y en trenes regionales (también en España todos los trenes para servicios regionales son y han sido de “viajeros distribuidos”).

Ejemplos de estos trenes de alta velocidad de “viajeros distribuidos” son los trenes japoneses Shinkansen de diversas generaciones, el alemán ICE 3 (y sus derivados, entre ellos el español serie 103) o los futuros trenes “AGV” de Alstom o “Avril” de Talgo. También tienen esta configuración los trenes de alta velocidad con un reducido número de coches y para velocidades máximas entre 200 y 250 km/h, como son los derivados de los “Pendolinos” (entre ellos los españoles de las series 490, 104 y 114) o los trenes de alta velocidad de ancho variable de CAF series 120, 120.050 y 121.

Obsérvese que en tanto en los trenes de “viajeros concentrados” como en los de “viajeros distribuidos”, caben los diversos tipos de articulación y tamaños de caja, lo que pone de relieve que la característica de tren de “viajeros concentrados” o “viajeros distribuidos” es independiente de las características de articulación y tamaño de caja.

2.3 Articulación

La arquitectura más clásica de los coches, vagones y locomotoras, en cuanto a su rodaje, es que éstos tienen dos o tres ejes, o dos o tres bogies (cada uno, a su vez, con dos o tres ejes), en los que se apoya la caja del coche, vagón o locomotora en puntos intermedios de la caja. Una arquitectura alternativa se presenta cuando los ejes o bogies, en lugar de estar en puntos intermedios de la caja, lo están en la unión entre coches creando una articulación entre ellos.

La primera aplicación a gran escala de la articulación en coches de viajeros fue en el tren español Talgo (en cuyo acrónimo la “A” significa precisamente articulado), ya que desde 1950 todos sus trenes tienen este carácter.

Desde 1981 los trenes franceses de alta velocidad (TGV) y sus derivados son también articulados, característica que se mantiene en el AGV.

Modernamente, muchos trenes de cercanías y regionales se construyen con coches articulados, y en España en concreto son articulados los cercanías de la familia Civia y los nuevos trenes regionales de la serie 449 (CAF 2009).

Fieles a la tradición de trenes no articulados se mantienen los Metros y trenes diésel en España o los trenes de alta velocidad alemanes y japoneses.

Algunos trenes pueden ser parcialmente articulados, cuando una locomotora o una cabeza motriz no articulada está situada en uno de los dos extremos del tren. Es el caso de los trenes Talgo remolcados por locomotora convencional o de los trenes franceses TGV y sus derivados, que tienen cabezas motrices no articuladas en los extremos.

2.4 Trenes de caja ancha y de dos pisos

Existen muchos trenes de viajeros y algunos de mercancías que tienen dos niveles (“dos pisos”) para la acomodación de los viajeros o de la carga. La altura máxima de estos trenes suele ser la misma que la de los trenes convencionales (si bien se aprovecha más el espacio en altura) pero también en algunas ocasiones son algo más altos.

Los trenes de dos pisos son muy antiguos en el ferrocarril, y en su versión moderna aparecieron inicialmente como una manera de aumentar la capacidad en una misma longitud de tren y por ello se aplicaron intensivamente en servicios de cercanías. Como además los trenes de dos pisos son más baratos (por plaza) y presentan menores costes de operación se han aplicado también en toda clase de trenes, desde “ferrobuses” de un único coche para servicios regionales, hasta trenes de alta velocidad (muy extendidos en Japón y Francia).

En cuanto a los trenes de caja ancha, serían aquellos que presentan una caja más ancha de lo normal (lo que requiere una definición de lo que se considera “normal”).

Son trenes de caja ancha muchos de los diseñados para circular por líneas con gálibo más ancho del definido como referencia en las fichas UIC, como es el caso de los trenes de alta velocidad en Japón y China.

También son trenes de caja ancha compatibles con el gálibo de anchura normal algunos que tienen coches más cortos (generalmente articulados) lo que le permite una “sagita” menor en las curvas y, por lo tanto, un gálibo más ancho. Ejemplos de estos trenes son los trenes Talgo de las generaciones II y III, así como los proyectados Talgo de alta velocidad 3G y Avril 4G y el tren de cercanías francés “Francilien”.

Los trenes pueden ser a la vez, de caja ancha y de dos pisos, ya que, en principio, son características independientes y no incompatibles entre sí. El ejemplo más conocido de un tren de estas características es el tren de alta velocidad japonés MaxE4 de JREste, que, en 400 metros de longitud consigue ubicar más de 1.600 confortables asientos.

3. INCIDENCIA DE LA ARQUITECTURA DE LOS TRENES EN SUS CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Cada una de las opciones arquitectónicas (“viajeros concentrados” o “distribuidos”; articulados o no articulados; caja normal, ancha y/o dos pisos) inducen unas características concretas en el tren en cuanto a su masa, ejes, tamaño (alto, ancho y largo) y capacidad (superficie útil bruta, o plazas, o toneladas de capacidad).

El análisis que sigue se realiza para una misma capacidad de transporte, es decir se analizan las características de peso, número de ejes y tamaño de trenes de diversas arquitecturas para una misma capacidad.

3.1 Características diferencias de trenes de “viajeros concentrados” y de “viajeros distribuidos”

Los trenes de “viajeros concentrados” (es decir, los remolcados por locomotora y los de alta velocidad con cabezas motrices) tienen una mayor longitud que los trenes de “viajeros distribuidos” de la misma capacidad. La razón es evidente: es preciso añadir la longitud de las máquinas o cabezas motrices a la longitud del tren de “viajeros distribuidos”. Una locomotora con dos cabinas típicamente mide alrededor de 20 metros, y una cabeza motriz de alta velocidad con una única cabina, mide alrededor de 17 metros. Teniendo en cuenta que las dos cabinas de los trenes autopropulsados restan a éste unos 7 metros de longitud útil, puede concluirse que típicamente un tren remolcado por locomotora, mide (para la misma capacidad) unos 13 metros más que un tren de “viajeros distribuidos”; mientras que un tren de alta velocidad con dos cabezas motrices suele medir alrededor de 27 metros más que un tren de “viajeros distribuidos” de la misma capacidad. Y un tren de alta velocidad con una única cabeza motriz tiene una longitud aproximadamente 10 metros mayor que el de “viajeros concentrados” de la misma capacidad.

Naturalmente, el peso relativo del incremento de la longitud depende de la longitud del tren. El incremento de longitud de la “viajeros concentrados” es significativo en trenes cortos (por ejemplo, de un 12,5 % en un tren remolcado de cuatro coches o de un 18 % en un tren de alta velocidad de 200 metros); pero se diluye bastante para trenes muy grandes (representa un 4 % en un tren convencional remolcado de 17 coches o un 9 % en un tren de alta velocidad de 400 metros como el Eurostar).

Por otra parte, los trenes de “viajeros concentrados” suelen tener una mayor masa por unidad de capacidad si se compara con un tren de “viajeros distribuidos”, pero solo en el caso de trenes no autopropulsados remolcados por locomotora cuando su longitud es menor que la máxima que, con su potencia, puede remolcar una locomotora. Típicamente un coche motor de 26 metros pesa 10 toneladas más que un coche remolcado, y una locomotora suele pesar unas 90 toneladas. Por ello, en trenes de más de 9 coches se compensa el incremento de peso.

En los trenes de alta velocidad, por ser autopropulsados de composición indeformable y dimensionados adecuadamente para su composición, no hay una mayor masa derivada del hecho de ser “viajeros concentrados”.

En síntesis, puede concluirse que los trenes de “viajeros concentrados” tienen una mayor longitud para la misma capacidad (en porcentaje decreciente al crecer la capacidad del tren y casi despreciable para trenes muy largos). Los trenes remolcados de velocidad convencional tienen también una mayor masa por unidad de capacidad (en un porcentaje

que va decreciendo al aumentar la capacidad del tren, hasta llegar a anularse en trenes con 9 o más coches por locomotora).

3.2 Características diferencias de los trenes articulados y no articulados

Los trenes articulados tienen, para una misma capacidad, un menor número de ejes y una menor masa, que se deriva precisamente de los ejes y de los bogies que se evitan.

Por otra parte, al ser los coches más cortos en los trenes articulados, para la misma capacidad es necesario un mayor número de coches, lo que supone una mayor pérdida de longitud en los pasos entre coches, y por ello generalmente, un tren articulado tiene una longitud algo mayor que un tren no articulado de la misma capacidad.

En el caso de los trenes articulados con rodaje Talgo, las dos características anteriores se acentúan: por una parte, la masa y las masas rotativas son menores que las de los trenes no articulados y las de los trenes articulados de bogies de la misma capacidad (ya que el rodal Talgo pesa menos que la mitad que un bogie de dos ejes) y sus masas rotativas son mucho menores al no tener eje montado entre las dos ruedas.

Como consecuencia de que los coches Talgo tienen un único rodal por coche, la longitud de los coches es menor (incluso que los articulados de bogies) y se pierde más longitud en los pasos entre coches. Por tanto, la longitud es algo mayor que en los trenes convencionales y que en los trenes articulados de bogies de la misma capacidad.

3.3 Características diferenciales de los trenes de caja ancha y/o de dos pisos

Los trenes de caja ancha tienen una longitud mucho menor que los trenes de ancho normal de la misma capacidad, ya que el incremento de anchura permite conseguir el mismo espacio disponible en una menor longitud. Debe observarse que el aumento de la capacidad por metro lineal de tren crece más que proporcionalmente que la anchura, pues en todos los trenes es necesario un pasillo interior que tiene la misma anchura para trenes desde dos hasta seis filas por coche; es decir, para todos los trenes existentes actualmente. Así, típicamente un tren normal de 2.900 milímetros de anchura exterior con un pasillo de 500 milímetros tiene 4 plazas por fila; mientras que un tren de 3.200 milímetros de anchura exterior (es decir, un 10,3 % más ancho) tiene 5 asientos por fila (es decir, un 25% más de capacidad).

En la práctica, el aumento de peso derivado de un 10% más de anchura es insignificante dado que al ser los coches de gran longitud y poca anchura, las características estructural-resistentes hacen que no tengan que aumentarse notablemente la masa.

Por lo que se refiere a los trenes de dos pisos, su capacidad, por unidad de longitud es también notablemente mayor que los de un piso, pero en la práctica no llega al doble porque las plataformas de acceso normalmente están ocupadas en zonas que ocupan toda la altura del tren, y además se pierde, en los dos niveles, la superficie en planta destinada a las escaleras de subida y de bajada. Puede estimarse que un tren de dos pisos aproximadamente para la misma capacidad tiene un 65% de longitud que un tren de un piso.

Tampoco en este caso hay un aumento significativo del peso por unidad de longitud por el hecho de ser de dos pisos.

4. CONSUMO DE ENERGÍA

La expresión del consumo de energía para el movimiento y de los servicios auxiliares puede simplificarse, en función de las principales características del tren (masa, masas rotativas, número de ejes y coeficiente aerodinámico C) y del servicio (distancia entre paradas, velocidad media y velocidad media con paradas) de la siguiente forma:

$$\frac{E(kWh)}{pl_{est} \cdot km} = [(K_1) + (K_2 \times N/pl_{est}) + (K_3 \times M/pl_{est}) + (K_4/D_p \times (M + M_{rot})/pl_{est} \times V_{max}^2) + (C/pl_{est} \times V^2) + (\frac{K_5}{V_{conpar}})]$$

Donde M es la masa del tren; M_{rot} sus masas rotativas equivalentes, N su número de ejes, C es el coeficiente aerodinámico; D_p la distancia entre paradas (incluyendo las “paradas equivalentes” por reducción de velocidad); V_{max} la velocidad máxima (o media de las máximas cuando hay varias), $V_{conparadas}$ la velocidad media contando el tiempo de paradas.

En la ecuación anterior, M/pl_{est} y C/pl_{est} son decrecientes con el tamaño del tren, y estos índices, así como N/pl_{est} y varían fuertemente con la arquitectura del mismo.

Puede observarse en la ecuación que la masa tiene un efecto que es proporcional al cuadrado de la velocidad, e inversamente proporcional a la distancia entre paradas y que el coeficiente C es proporcional al cuadrado de la velocidad. Los efectos de la masa y del cociente C son independientes entre sí.

4.1 Relaciones funcionales

Resulta evidente que, en valores absolutos, cuando más pequeño sea un tren, menor será su consumo de energía (medido en kilovatios hora por kilómetro). Pero no son los valores absolutos los que interesan, sino los valores relativos específicos por cada plaza estándar ofertada. Con estos indicadores los trenes pequeños ya no ofrecen mejores resultados, sino que al revés, los trenes de mayor tamaño tienen un menor consumo específico y un menor coste operativo. Hay, pues, en los trenes “economías de tamaño”.

El tamaño de los trenes y su configuración inciden en el consumo energético a través de dos indicadores fundamentales:

- La masa por unidad de oferta (M/pl_{est}) Una mayor masa produce mayores resistencias mecánicas, y además mayor necesidad del uso del freno en las reducciones de velocidad y en las pendientes.
- El coeficiente aerodinámico por unidad de oferta (C/pl_{est}) que se traduce en una mayor superficie de la sección y de la “superficie mojada” o “piel” del tren conduciendo a una mayor resistencia aerodinámica

Estos dos indicadores podrían definirse como la “densidad del tren” y la “superficie exterior específica”. Cada configuración del tren produce para la misma capacidad diferentes masas y coeficientes “ C ”; es decir, diferentes “densidades” y “superficies específicas”.

Las resistencias mecánicas e inerciales (proporcionales a la masa) son dominantes en velocidades bajas, mientras que las aerodinámicas (proporcionales al coeficiente C) lo son en velocidades altas. Por ello, es de esperar que el efecto de la variación de la masa sea fuertemente dependiente de la distancia entre paradas equivalentes (D_p) y que el efecto de la variación del coeficiente aerodinámico C sea importante en altas velocidades.

En la tabla se observa, para diferentes servicios (caracterizados por su velocidad media y por una determinada distancia entre paradas, incluyendo las “paradas equivalentes por

reducciones de velocidad”), la elasticidad del consumo con respecto a la masa (y las masas rotativas) y el coeficiente C.

Tabla 1. Elasticidad del consumo de energía con respecto a la masa y coeficiente aerodinámico

Elasticidad del consumo de energía a variaciones de la masa y del coeficiente C según tipo de servicio ($\Delta\text{Consumo}_{\text{neto}}/\Delta M$ o $\Delta\text{Consumo}_{\text{neto}}/\Delta\text{CoefC}$)		
	$\Delta\text{Cons}_{\text{neto}} / \Delta\text{Masa}$	$\Delta\text{Cons}_{\text{neto}}/ \Delta\text{Coeficiente C}$
Alta velocidad	0,21	0,43
Larga distancia convencional	0,48	0,17
Media distancia alta velocidad	0,47	0,20
Media distancia	0,61	0,05
Cercanías	0,48	0,03
Metro	0,76	0,01

Fuente: García Álvarez, 2010

Como puede observarse, la elasticidad del consumo con respecto a las variaciones de las masas es muy baja en servicios de alta velocidad, y va creciendo al reducirse la distancia entre paradas, aunque no proporcionalmente pues también se reduce la velocidad media, cuyo cuadrado también afecta a la energía disipada por el freno. De hecho, puede observarse que en cercanías es menor que en media distancia, debido tanto a la menor velocidad media como al mayor aprovechamiento del freno regenerativo

En lo que se refiere a la elasticidad del consumo con respecto al coeficiente C, es muy importante en el caso de alta velocidad, y decrece fuertemente al bajar la velocidad media del servicio, hasta el punto de ser casi despreciable en servicios de cercanías y Metros.

4.2 Relación de la masa con la arquitectura

Si ahora se analiza la variación de masa por plaza estándar para diversas configuraciones y tamaños del tren se pueden apreciar importantes variaciones como se recoge en la figura.

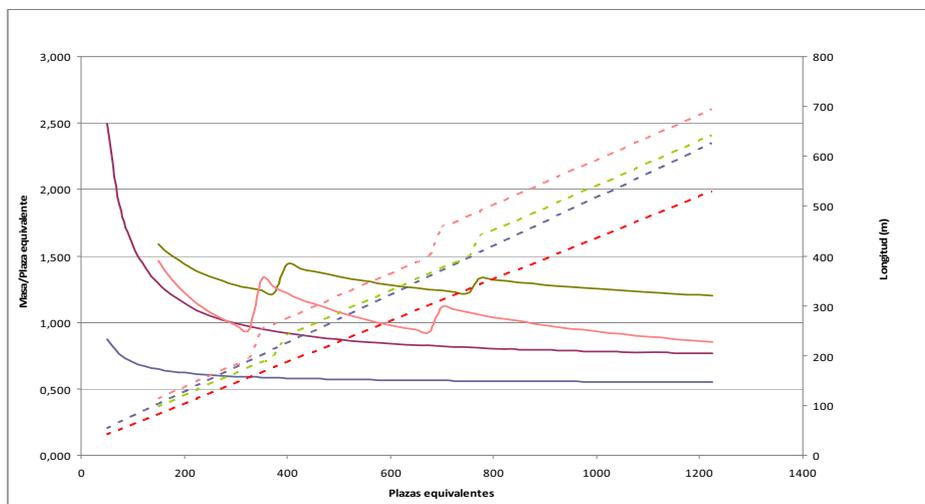


Fig. 1. Efecto de la variación del tamaño y de la arquitectura del tren en la masa por plaza estándar en diversas configuraciones de trenes convencionales

En la tabla se recoge la masa por plaza para dos tamaños de tren y diversas configuraciones.

Tabla 2. Masa por plaza estándar para diversas configuraciones de tren

MASA POR PLAZA ESTANDAR PARA DIVERSAS CONFIGURACIONES Y TAMAÑOS DE TREN	325	650	Dif 650/325
	plazas.est	plazas.est	
Composición de coches clásicos no articulados	969	830	0,86
Remolcado. Coches rodales articulados	589	563	0,96
Tracción concentrada 2 motrices coches articulados bogies	1.259	1.150	0,91
Tracción concentrada 2 motrices coches articulados rodales	943	903	0,96
Autopropulsado. Tracción distribuida. No articulado	1.045	943	0,90
Autopropulsado. Tracción distribuida. No articulados 2 pisos	723	696	0,96
Autopropulsado. Tracción distribuida. Caja ancha. 2 pisos	429	426	0,99

Datos en kg/plaza estandar

De la figura y de la tabla pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La masa por unidad de capacidad decrece –como se esperaba- al aumentar el tamaño del tren, especialmente en tamaños pequeños y para trenes de “viajeros concentrados”. En tamaños grandes del tren, la variación va siendo cada vez menor. Entre trenes muy grandes (de 650 plazas estándar) y trenes medios (325 plazas estándar) el cociente de masas por plaza suele ser del orden de 0,85 a 0,96; y entre trenes medios y trenes pequeños de 0,75 a 0,82.
- Para una misma arquitectura (por ejemplo, para “viajeros distribuidos” coches no articulados) los dos pisos reducen la masa en un 31%; y la simultaneidad de la caja ancha y dos pisos un 59%.
- Para la misma arquitectura, los trenes articulados tienen un 24,9% menos de peso por plaza equivalente que los no articulados, mientras que los de rodales sin ejes y articulados tienen un peso por unidad de capacidad inferior en un 40% a los de un tren de la misma capacidad de bogies no articulados.

4.3 Relación del coeficiente aerodinámico con la arquitectura

En cuanto a la variación del coeficiente aerodinámico C en función de la arquitectura y del tamaño del tren, la figura da una idea de estas variaciones en los trenes autopropulsados.

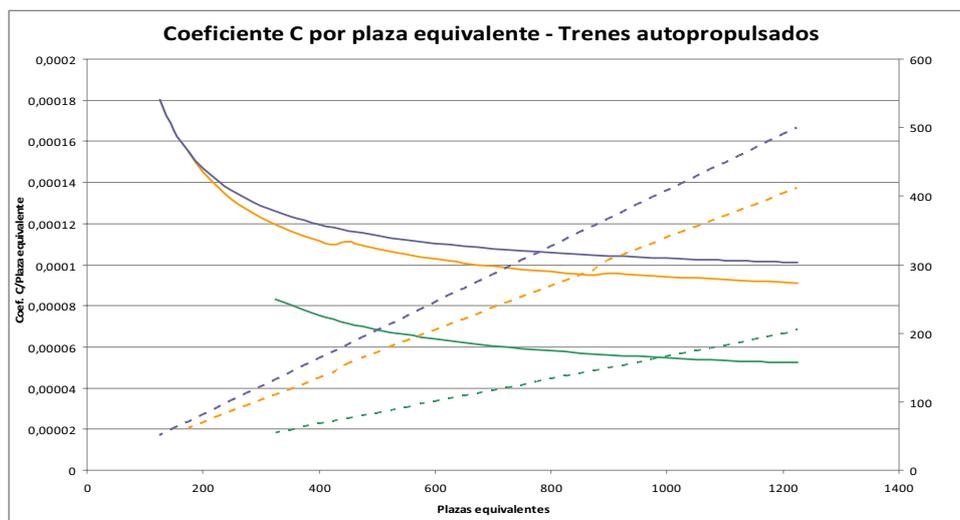


Fig. 2. Efecto de la variación del tamaño y de la arquitectura del tren en el coeficiente C por plaza estándar en diversas configuraciones de trenes autopropulsados

En la tabla se recogen los valores concretos para algunas configuraciones en dos tamaños de trenes (medios y grandes).

Tabla 3. Coeficiente aerodinámico por plaza estándar para diversas configuraciones de tren

COEFICIENTE C POR PLAZA ESTÁNDAR PARA DIVERSAS CONFIGURACIONES Y TAMAÑOS DE TREN	325	650	Dif 650/325
	plazas.est	plazas.est	
Composición de coches clásicos no articulados	152	125	0,82
Remolcado. Coches rodales articulados	159	129	0,81
Tracción concentrada 2 motrices coches articulados bogies	127	110	0,87
Tracción concentrada 2 motrices coches articulados rodales	160	143	0,89
Autopropulsado. Tracción distribuida. No articulado	429	426	0,99
Autopropulsado. Tracción distribuida. No articulados 2 pisos	119	101	0,85
Autopropulsado. Tracción distribuida. Caja ancha. 2 pisos	83	62	0,75

Datos en 10^{-6} daN.(km/h)⁻²/plaza.estándar

De la figura y de la tabla pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las variaciones del coeficiente “C/plest” con respecto al tamaño del tren son más homogéneas que las variaciones de la masa. Oscilan entre 0,75 y 0,87.
- El tipo de rodaje no ofrece diferencias significativas en el coeficiente C/plest (al revés que en el caso anterior, los trenes articulados tienden a presentar un coeficiente C por unidad de capacidad ligeramente mayor y los de rodales más aún) probablemente por el mayor número de coches del tren en la misma longitud.
- Las diferencias entre los trenes de uno y de dos pisos y de de caja ancha son enormes, y mucho mayores que las variaciones inducidas por la masa.

4.4 Análisis conjunto de la masa y del coeficiente C

En la figura se puede ver la variación de la tara y de la longitud del tren para una misma capacidad (252 metros cuadrados útiles) según diversas arquitecturas.

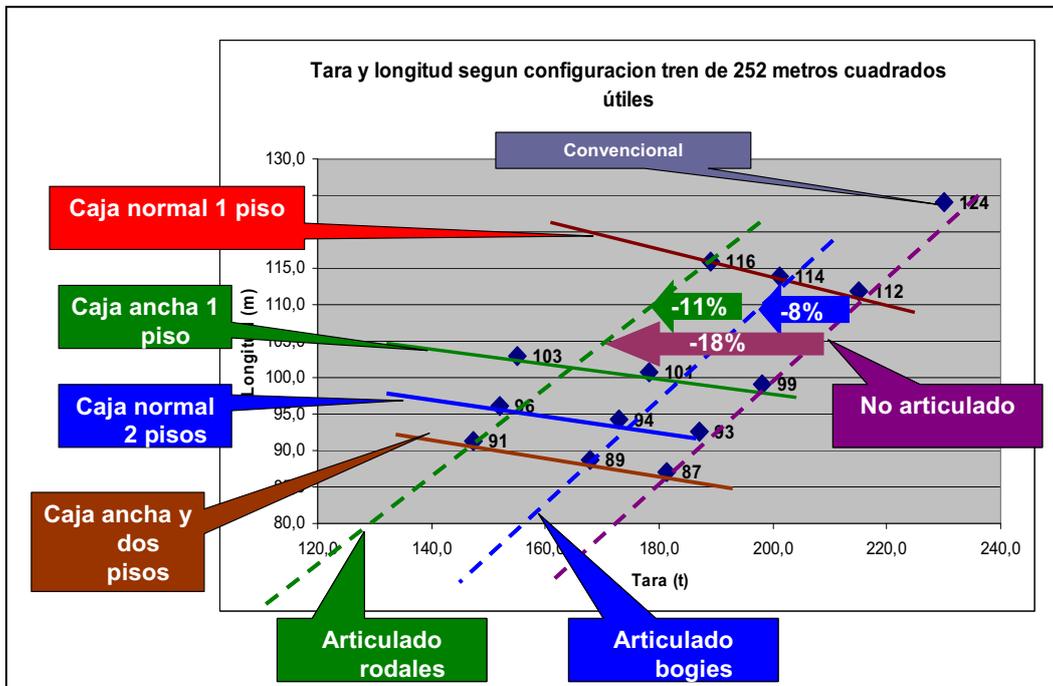


Fig. 3. Tara y longitud según configuración de trenes de la misma capacidad.

Fuente: García Álvarez (2010)

Del análisis de la figura y del cruce de los resultados anteriores, así como del análisis de sensibilidades se deduce que:

1. Los trenes de “viajeros distribuidos”, articulados, de rodales sin ejes, de caja ancha y de dos pisos son más eficientes energéticamente que los convencionales.
2. El efecto de la articulación y de los rodades sin eje es más favorable en servicios con numerosas paradas (ya que tiene una incidencia mayor en la masa)
3. El efecto de la caja ancha y de los dos pisos es más favorable en servicios de alta velocidad (ya que tiene un mayor efecto en el coeficiente aerodinámico).

5. COSTES OPERATIVOS

Por lo que se refiere a la incidencia de la arquitectura en el coste operativo, el estudio se encuentra en una fase menos avanzada. Unos primeros resultados (que puede ser corregidos con posterioridad al avanzar en el trabajo) de los costes operativos (sin considerar servicios al cliente ni costes de infraestructura) son los recogidos en la tabla para trenes de tamaño homogéneo.

Tabla 4. Costes operativos para diferentes configuraciones del tren

Tipo de tren	Arquitectura		Coste operativo		
	Tracción	Artic.	Caja	c€/pl.est.km	Indice
Tren AV tracción distribuida no articulado bogies	D	No	Normal	3,80	0,86
Tren AV tracción concentrada articulado bogies	C	Si bogies	Normal	4,40	1,00
Tren AV tracción concentrada articulado rodales	C	Si rodales	Normal	4,20	0,95
Tren AV tracción concentrada articulado bogies 2 pisos	C	Si bogies	2 Pisos	3,21	0,73
Tren AV tracción concentrada rodales caja ancha	C	Si rodales	Ancha	3,20	0,73
Tren AV tracción distribuida rodales caja ancha	D	Si rodales	Ancha	2,84	0,65
Tren AV tracción distribuida bogies caja ancha 2 pisos	D	Si rodales	Anch.2pis.	2,73	0,62

En la tabla de resultados puede observarse que:

- Para un mismo tamaño, tecnología y tipo de servicio, la variación de la arquitectura del tren tiene efecto muy importante en el coste operativo, con una relación de 0:62 a 1 entre el tren más eficiente (el de “viajeros distribuidos”, caja ancha y dos pisos) y el tren de referencia.
- El efecto de la caja ancha (-24%) y de los dos pisos (-28%) es similar entre sí, pero mayor que el efecto de la articulación o los rodales (-5%).
- La “viajeros distribuidos” tiene un efecto importante sobre el coste operativo suponiendo reducciones del orden del 18% sobre el tren equivalente de “viajeros concentrados”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2010): “Incidencia del tamaño y arquitectura de los trenes de viajeros en su consumo de energía y costes de explotación”, en libro de actas del “V Congreso de Innovación Ferroviaria”, Gijón, febrero de 2009.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. y LUKASZEWICZ, P. (2010): “Ventajas energéticas y en coste de los trenes de caja ancha”, en libro del actas del “1st International Congress on Rail Transport Technology 2010”; Zaragoza, abril de 2010.

Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y en el confort de los viajeros

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento corresponde a la ponencia presentada en el IX Congreso de Ingeniería Ferroviaria "CIT 2010", celebrado en Madrid, en julio de 2010.

Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y en el confort de los viajeros

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

El objetivo de este estudio es analizar cómo una mayor rapidez y facilidad del acceso de los viajeros al tren puede suponer una disminución de tiempo de parada y la posibilidad de reducir en el consumo energético. Ello se debe a que el tiempo ganado en las paradas se podrá compensar parcialmente con una menor velocidad máxima o con la posibilidad de economizar en la conducción.

El tiempo de parada de un tren en una estación depende del número de viajeros a atender en la puerta crítica, de la diferencia de altura entre el piso del tren y andén, de la anchura de la puerta,...etc. Con estos datos se calcula el “tiempo de parada” para diversos trenes españoles en servicios representativos y se cuantifica la energía que podría ahorrar el tren de mejor accesibilidad, suponiendo que el tiempo ganado en la parada se emplea en reducir la velocidad media en el recorrido.

También se incluye una tabla con las características relevantes de los principales trenes españoles, así como el “tiempo de paradas” de cada uno de ellos en una estación tipo.

1. OBJETO Y METODOLOGÍA

1.1 Objeto

La reducción del tiempo de parada puede suponer alternativamente una disminución del tiempo de viaje o del consumo de energía. Ello, junto con la mayor comodidad del viajero para acceder al tren, repercute en un aumento de la demanda del precio pagado y de la productividad, ya que el tren sería capaz de elevar su velocidad media operativa, lo que supone un incremento del número de kilómetros que puede recorrer en su vida útil, y por ello puede reducir los costes operativos por plaza kilómetro.

1.2 Conceptos básicos y definiciones

Se trata de mostrar cómo la variación de determinados parámetros característicos del tren (ancho de las puertas, salto vertical entre piso del tren y altura del andén, etc...) puede suponer una reducción del consumo de energía y/o del tiempo de viaje.

Para el desarrollo del estudio se consideran dos tipos de servicios distintos; uno será de trenes de alta velocidad y el otro será de trenes de cercanías.

Los parámetros de un tren que inciden en su accesibilidad son: distancia horizontal y vertical entre el piso del tren y el andén, número de las puertas de acceso (en función de las plazas) y paso libre de las puertas de acceso.

A continuación se definirán los conceptos utilizados en este estudio.

Accesibilidad

Consideramos la “accesibilidad” como la cualidad de un tren para que a un cliente le resulte fácil y rápido entrar y salir del mismo y moverse en su interior, y no solo a las personas con movilidad reducida.

La accesibilidad debe de ser un indicador a tener en cuenta, no solo desde el punto de vista social (para no provocar una discriminación a las personas con movilidad reducida) sino también desde el económico, ya que una buena accesibilidad puede llegar a suponer un ahorro considerable en el tiempo recorrido y una reducción en el consumo de energía.

Tiempo de viaje

El tiempo de viaje comprende desde la salida del tren de la estación de origen hasta la llegada a la estación de destino, este tiempo es la suma del que se denomina “tiempo de recorrido” que es el tiempo que emplea el tren en moverse entre origen y destino (y que es función de la velocidad media en al marcha); y del “tiempo de paradas” que es el tiempo que el tren está detenido para subir y bajar en las estaciones intermedias (y es función de las características de accesibilidad del tren y andén).

Para un mismo “tiempo de viaje”, cuanto mayor sea el “tiempo de paradas”, menor será el “tiempo de recorrido” y viceversa.

$$\text{Tiempo de viaje} = T. \text{ de recorrido } [f(\text{vel. media})] + T. \text{ de parada } [f(\text{accesibilidad})]$$

Distancia horizontal y vertical entre tren y andén

La distancia vertical o salto vertical (H). Es la distancia vertical que existe entre el piso de la plataforma del vehículo hasta el andén. Se calcula como la diferencia entre la distancia vertical que existe entre el piso del coche y el plano de rodadura (H_{tp}) y la distancia vertical que existe entre el extremo del andén y el plano de rodadura (H_{ta}).

$$H = H_{tp} - H_{ta}$$

La distancia en horizontal (L) entre tren y al andén. Se calcula como la diferencia entre la distancia que existe entre el eje de la vía y el borde del andén (L_e ; longitud especificada en la normativa sobre gálibos mínimos) y la distancia existente entre el extremo del tren (último escalón, estribo, etc...) y el borde del andén (L_c).

$$L = L_e - L_c$$

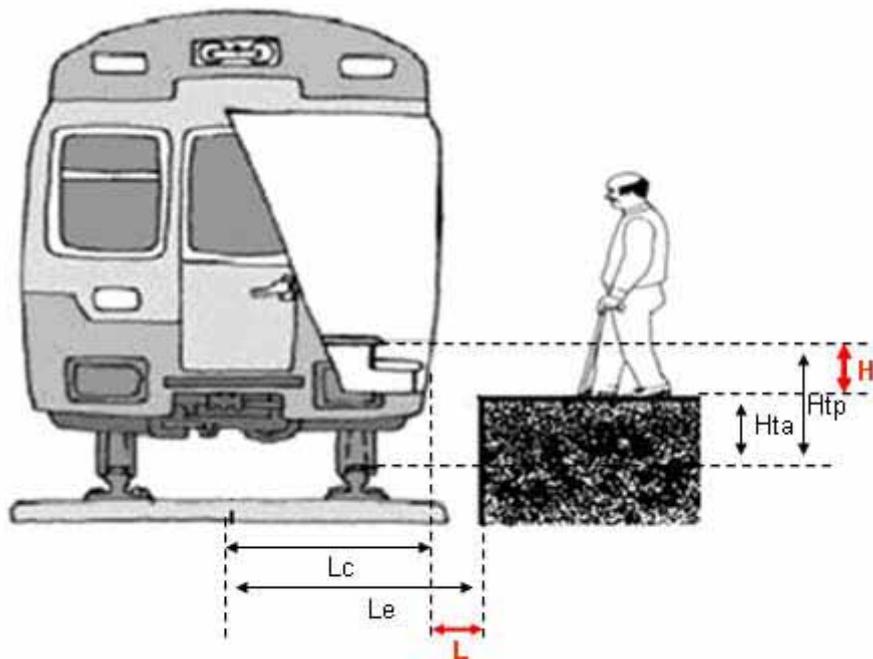


Fig. 1. Representación del salto vertical y de la distancia horizontal entre tren y andén

Número de puertas de acceso

El número de las puertas de acceso al tren, por cada costado, corresponde a las que se emplean para acceso y desalojo del mismo por los viajeros. Es preciso asignar a cada una de las puertas un número de plazas que se corresponda con las plazas que tienen esa concreta puerta como la más próxima. En los trenes en los que tienen todo el interior “corrido” (por ejemplo, el Civia) el número de plazas asignadas a cada puerta se calcula dividiendo las plazas totales del tren entre el número de puertas del costado en cuestión.

Puerta crítica

Puerta crítica es la puerta que atiende a un mayor número de plazas. De todas las puertas que tiene el tren, es la puerta por la que entra y sale mayor número de viajeros en una parada comercial.

Cuanto menos plazas haya asignadas a la puerta crítica mayor será la reducción del “tiempo de paradas” para el mismo número de viajeros.

Paso libre de las puertas de acceso (W_d)

El paso libre de las puertas de acceso debe de ser tal que debe permitir a los viajeros, junto con sus equipajes, acceder y abandonar el tren en un tiempo aceptable y sin dificultades. Es la anchura libre en la zona más estrecha de disponible para la entrada y salida de los viajeros. Cuanto mayor sea esta distancia, mejor accesibilidad tendrá el tren. Mejoras importantes se consiguen cuando el ancho es suficiente para que sea utilizada por dos viajeros a la vez (>1.200 mm) o por tres viajeros a la vez (>1.600 mm).

Tiempo de parada

Según lo demostrado en García Álvarez et al.(2008) el proyecto de investigación “Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros”

el tiempo necesario para subir y bajar los viajeros a un tren en una parada comercial se puede estimar mediante las siguientes fórmulas:

1. Viajeros con poco equipaje, para cualquier valor del número de viajeros que entran y de viajeros que salen.

$$T = [Ve + Vs] \times 811 \times Wd^{-0.972} \times \left[1 + \frac{H^{1.015} - 100}{900}\right]$$

2. Viajeros con equipajes grandes, si entran más de 12 viajeros ($Ve > 12$)

$$T = [1,11 \times Ve - 1,32 + Vs] \times 1.398 \times Wd^{-0.972} \times \left[1 + \frac{H^{1.015} - 100}{900}\right]$$

3. Viajeros con equipajes grandes, si entran menos de 12 viajeros ($Ve < 12$)

$$T = [Ve + Vs] \times 1398 \times Wd^{-0.972} \times \left[1 + \frac{H^{1.015} - 100}{900}\right]$$

En todos los casos: T es el tiempo (s); Ve número de viajeros que entran; Vs número de viajeros que salen; Wd paso libre de la puerta (mm); H distancia vertical entre el piso y el andén (mm).

2. CASO DE ALTA VELOCIDAD

2.1 Características de la línea

En el caso de la línea de alta velocidad se ha utilizado para la simulación la línea de Madrid-Barcelona por considerarla una línea representativa de este tipo de servicios. Esta línea tiene una longitud 640 kilómetro, está electrificada a 2 x 25 kV en corriente alterna y su velocidad máxima actual de servicio es de 300 km/h.

Para la simulación se ha considerado que el tren de alta velocidad realiza cinco paradas comerciales (Guadalajara, Zaragoza, Lleida, Camp de Tarragona y Barcelona), las estaciones de todas las paradas comerciales disponen de andenes a 760 mm de altura (H), exceptuando la estación de Madrid puerta de Atocha que tiene andenes a 550 mm de altura (H).

El porcentaje de personas que suben y bajan en cada una de las paradas se indica en la siguiente tabla con relación a la capacidad del tren. Se ha supuesto para esta línea que los viajeros llevan equipajes grandes.

Tabla 1. Viajeros que suben y bajan en las distintas paradas en porcentaje de la capacidad del tren

	Suben (%)	Bajan (%)
Madrid	75	
Guadalajara	5	5
Calatayud	5	5
Zaragoza	30	40
Lerida	1	10
Camp de Tarragona	0	15
Barcelona		41

2.2 Características del material

Para el estudio se emplearán las distintas combinaciones de trenes de alta velocidad. Se utilizará el tren de la serie 100 de Alstom, los de las series 102 y 130 de Talgo-Bombardier, los de la serie 103 de Siemens y los de la serie 120 de CAF.

A continuación se muestra una tabla con las características de los trenes de las distintas series necesarias para el cálculo de los tiempos de paradas.

Tabla 2. Características de los trenes de alta velocidad

Tren	Fabricante	Masa (toneladas)	Plazas	Potencia (kW)	Plazas puerta crítica	V.máx (km/h)	Altura piso H (mm)	Paso Libre de las puertas Wd (mm)
100	Alstom	422	332	8.800	56	300	1.065	810
102	Talgo	357	318	8.000	66	330	760	813
103	Siemens	425	404	8.800	66	350	1.265	910
120	CAF- Alstom	247	238	4.000	80	250	1.300	1.000
130	Talgo	312	299	4.800	56	250	760	810

2.3 Tiempos de paradas

El porcentaje de viajeros que suben y bajan en las distintas paradas, se relaciona con el número de plazas del coche que tiene que atender la *puerta crítica*. En la *puerta crítica* suben y bajan el mayor número de viajeros lo que supone que el tiempo de cada parada esté condicionado por la accesibilidad en esa puerta.

A continuación se muestran los tiempos de parada, calculados para la *puerta crítica* para los diferentes trenes en las distintas paradas.

Tabla 3. Tiempos de parada para el tren de la serie 100 en diferentes paradas

s100	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada (s)
Madrid	42	0	122
Guadalajara	3	3	15
Calatayud	3	3	15
Zaragoza	17	22	104
Lerida	1	6	16
Camp de Tarragona	0	8	22
Barcelona	0	23	57
Tiempo de paradas intermedias			172

Tabla 4. Tiempos de parada para el tren de la serie 102 en diferentes paradas

s102	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada (s)
<i>Madrid</i>	50	0	99
Guadalajara	3	3	12
Calatayud	3	3	12
Zaragoza	20	26	87
Lerida	1	7	13
Camp de Tarragona	0	10	18
<i>Barcelona</i>	0	27	47
Tiempo de paradas intermedias			143

Tabla 5. Tiempos de parada para el tren de la serie 103 en diferentes paradas

s103	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada (s)
<i>Madrid</i>	50	0	150
Guadalajara	3	3	18
Calatayud	3	3	18
Zaragoza	20	26	132
Lerida	1	7	20
Camp de Tarragona	0	10	28
<i>Barcelona</i>	0	27	72
Tiempo de paradas intermedias			217

Tabla 6. Tiempos de parada para el tren de la serie 120 en diferentes paradas

s120	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada (s)
<i>Madrid</i>	60	0	167
Guadalajara	4	4	20
Calatayud	4	4	20
Zaragoza	24	32	146
Lerida	1	8	22
Camp de Tarragona	0	12	31
<i>Barcelona</i>	0	33	80
Tiempo de paradas intermedias			240

Tabla 7. Tiempos de parada para el tren de la serie 130 en diferentes paradas

s130	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada (s)
<i>Madrid</i>	42	0	84
Guadalajara	3	3	10
Calatayud	3	3	10
Zaragoza	17	22	74
Lerida	1	6	11
Camp de Tarragona	0	8	16
<i>Barcelona</i>	0	23	40
Tiempo de paradas intermedias			121

Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y el confort de los viajeros

Se observa que el “tiempo de paradas intermedias” varía para unos trenes a otros (oscila entre 121 y 240 segundos), debido a que, como se ha expuesto anteriormente, este tiempo depende de parámetros como el número de viajeros que suben, número de viajeros que bajan, del salto vertical y ancho de las puertas.

Se puede apreciar que el tiempo parada es menor para los trenes de la series 102 y 130, esto es debido a que la altura del piso de los coches en estos trenes (altura desde el plano de rodadura del carril hasta el piso del tren) es igual a la altura de los andenes, 760 mm, lo que facilita la entrada y la salida de los viajeros, ya que éstos no tienen que subir ni bajar escalones.

El mayor tiempo de parada corresponde al tren de la serie 120 que es el que tiene la mayor altura de piso (1.300 mm) y además el mayor número de plazas en la puerta crítica (80) a pesar de que la puerta es más ancha (1.000 mm).

Consumos de energía

El consumo de energía y las emisiones se han estimado para los distintos trenes de alta velocidad en el trayecto Madrid- Barcelona, dependiendo del tiempo de parada y del número de viajeros que suben y bajan.

Para el cálculo se considera un “tiempo de viaje” igual para todos los trenes e igual al tiempo establecido en el horario (3:18:00). A este tiempo se le resta el “tiempo de paradas intermedias” de cada uno de los trenes de alta velocidad. El tiempo obtenido por diferencia, sería el “tiempo de recorrido”, por lo que se puede calcular la velocidad media sin paradas para cada caso, que será menor cuanto menor sea el tiempo de paradas intermedias.

Introduciendo estos parámetros en el simulador se obtienen los consumos netos en pantógrafo (kWh en el total del recorrido) para cada tren con sus “tiempo de paradas”.

Se toma como referencia el tren de la serie 120, por ser el mayor “tiempo de paradas intermedias”. Para cada tren se calcula el consumo de energía si tuviera que alcanzar la velocidad media del tren de la serie 120 (que es el mayor pues “pierde” mayor tiempo en las paradas)

A continuación se presenta una tabla en la que se reflejan los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 8. Consumo y emisiones de los distintos trenes de alta velocidad para el recorrido considerado

	T. de viaje	T. de paradas (s)	T. viaje sin paradas	V. media (km/h)	Consumo en relación a su v. media (kWh/recorrido)	Consumo en relación a la v. media s120 (kWh/recorrido)	Diferencia en valor absoluto (kWh/km)	Porcentaje (%)
Serie 100	3:18:00	172	3:15:09	192,53	10.500	10.558	-58	-0,55
Serie 102	3:18:00	143	3:15:38	192,05	8.332	8.411	-79	-0,95
Serie 103	3:18:00	217	3:14:24	193,27	10.284	10.305	-21	-0,21
Serie 120	3:18:00	240	3:14:00	193,67	6.181	6.181	0	0,00
Serie 130	3:18:00	121	3:15:59	191,71	7.689	7.777	-87	-1,13

En la tabla se muestra que, a cada uno de los trenes le corresponde una velocidad media distinta. Esto es debido a que tiene “tiempos de parada intermedias” diferentes y por lo tanto, como es lógico, trenes que tengan menor tiempo de parada podrán recorrer el trayecto a menores velocidades medias, ya que les queda un mayor margen para alcanzar el “tiempo de recorrido”.

Según se observa, reduciendo el “tiempo de parada” y utilizando este “tiempo de parada” para realizar una conducción más económica (a una menor velocidad media), se puede

conseguir un consumo alrededor de un uno por ciento menor (es el caso del tren de la serie 130, en el que la reducción del consumo sería del -1,13%).

3. CASO DE CERCANÍAS

3.1 Características de la línea

Para el caso de la línea de cercanías se ha utilizado para la simulación la línea Manresa-Martorell. Tiene una longitud de 51 kilómetros, está electrificada a 3.000 voltios en corriente continua, su velocidad máxima de servicio actual es de 100 km/h. Las estaciones de todas las paradas comerciales disponen de andenes con altura de 680 mm.

En la siguiente tabla se indica el porcentaje de viajeros que suben y bajan en cada una de las distintas paradas. Se ha considerado que existen dos tipos de paradas distintas: unas en las que suben viajeros en un número igual al tres por ciento de las plazas y baja el uno por ciento (serían un tercio de las paradas totales del trayecto); y otras paradas en las que sube el cinco por ciento y baja el dos por ciento (serían los dos tercios restantes de las paradas totales del trayecto).

Tabla 9. Porcentaje de los viajeros que suben y bajan en trenes de cercanías

	Suben (%)	Bajan (%)
Manresa	60	
1/3 paradas	3	1
2/3 paradas	5	2
Martorell		65

3.2 Características del material

Los trenes utilizados para la simulación son los trenes de la serie 447, los Civia (serie 465) y los trenes de la serie 450.

A continuación se muestra una tabla en los que indica las características de cada uno de los trenes utilizados en la simulación.

Tabla 10. Características de los trenes de cercanías

Tren	Masa (toneladas)	Potencia (kW)	Puertas por costado	Plazas totales	Plazas por puerta crítica	V.máx (km/h)	Altura piso (mm)	Ancho puerta (mm)
447	162,5	2.400	9	702	81	120	1.150	1.300
450 (2 p)	350,4	2.960	12	1.844	171	140	1.010	1.800
Civia	157,3	2.200	10	997	100	120	1150/680	1.300

3.3 Tiempos de parada

En el caso de los trenes de cercanías Civia no se calcula el “tiempo de paradas” en relación a una puerta crítica, debido a que este tipo de tren tiene un interior continuo o “corrido” (no hay puertas que separen los distintos coches) y los viajeros suben y bajan por la puerta que más les convenga.

Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y el confort de los viajeros

Por ello, para el cálculo se parte el número de plazas totales del tren y se divide por el número de puertas que dispone, obteniendo el número de plazas que corresponden a cada puerta.

Para el caso de la serie 447 y de la serie 450 se estima la puerta crítica y el número de plazas que tiene que atender. A continuación se muestran los tiempos de parada para los distintos trenes para el caso de cercanías.

Tabla 11. Tiempos de parada para el tren de la serie 447 en cercanías

447	Número de paradas	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada en cada estación	Tiempo de parada total (s)
<i>Manresa</i>	1	49	0	114	114
<i>1/3 de las paradas</i>	8	2	1	7	56
<i>2/3 de las paradas</i>	15	4	2	12	184
<i>Martorell</i>	1	0	53	111	111
<i>Tiempo de paradas intermedias (s)</i>					240

Tabla 12. Tiempos de parada para el tren de la serie 450 en cercanías

450	Numero de paradas	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada en cada estación	Tiempo de parada total (s)
<i>Manresa</i>	1	103	0	139	139
<i>1/3 de las paradas</i>	8	5	2	8	68
<i>2/3 de las paradas</i>	15	9	3	15	222
<i>Martorell</i>	1	0	111	136	136
<i>Tiempo de paradas intermedias (s)</i>					289

Tabla 13. Tiempos de parada para el tren de la serie Civia en cercanías

Civia	Número de paradas	viajeros que suben	viajeros que bajan	Tiempo de parada en cada estación	Tiempo de parada total (s)
<i>Manresa</i>	1	60	0	125	125
<i>1/3 de las paradas</i>	8	3	1	8	61
<i>2/3 de las paradas</i>	15	5	2	13	202
<i>Martorell</i>	1	0	65	122	122
<i>Tiempo de paradas intermedias (s)</i>					263

3.4 Consumo de energía

Puede observarse que la diferencia de “tiempo de paradas” oscila entre 240 y 289 segundos.

Para el cálculo del consumo se realiza lo mismo que en el caso de alta velocidad. Una vez que se conocen los parámetros de la línea, los tiempos de viaje y los “tiempos de parada” se introducen en el simulador ALPI2810 (versión 9) y se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 14. Consumo y emisiones de los distintos trenes de cercanías para el recorrido considerado

	T. viaje	T. de paradas	T. viaje sin paradas	V. media	Consumo en relación a su v. media	Consumo en relación a la v media del 450	Diferencia en valor absoluto	Porcentaje
		(s)		(km/h)	(kWh/recorrido)	(kWh/recorrido)	(kWh/km)	(%)
447	1:47:00	240	1:43:00	29,71	179,49	181,75	-2,26	-1,26
450	1:47:00	289	1:42:11	29,95	645,45	645,45	0,00	0,00
Civia	1:47:00	263	1:42:37	29,82	212,77	213,80	-1,03	-0,48

Se observa, al igual que en el caso de alta velocidad, reduciendo la velocidad media (a causa de un menor “tiempo de paradas”) se puede obtener una reducción en el consumo de alrededor de un uno por ciento.

Todos los resultados han sido obtenidos mediante el simulador de consumos ALPI2810 en su versión 9, desarrollado por el “Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril” de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, siguiendo la Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias (2).

4. TIEMPOS DE PARADA PARA TRENES EXISTENTES

Seguidamente recogen en una tabla se por tipo de trenes las características relevantes para calcular el “tiempo de paradas” en los principales trenes españoles. Se ha supuesto una estación tipo con bastante movimiento en la que sube un número de viajeros igual al 50 por ciento de las plazas y baja un número de viajeros igual al 40 por ciento de las plazas.

Tabla 15. Características relevantes de los trenes para el calculo de “tiempo de paradas”

	Plazas puerta crítica	Altura piso H (mm)	Paso Libre de las puertas Wd (mm)	Tiempo de parada (suben 50%; bajan 40%)
Alta velocidad (andén de 760 mm)				
100	56	1.065	810	137
102	66	760	813	114
103	66	1.265	910	173
104	37	1.250	800	107
TGV Duplex	96	1.250	810	280
Cercanías (andén de 680 mm)				
447	81	1.150	1.300	145
450 (2 pisos)	171	1.010	1.800	200
Civia	100	1.150	1.300	180
Larga distancia (andén de 550 mm)				
448	56	1.380	700	239
120	80	1.300	1.000	230
130	56	760	810	124
Coche 9000	44	1.250	650	183
Media distancia (andén de 550 mm)				
470	40	1.028	1500	62
592	29	1.208	810	93
598	72	1.302	1300	161

Puede observarse, por ejemplo, como entre los trenes de alta velocidad de la serie 104, que están pensados para servicios regionales, tiene un dimensionamiento de las puertas que

permite que el “tiempo de parada” sea más bajo que el resto de los trenes pensados para servicios de largo recorrido.

En los trenes de cercanías puede comprobarse como el tren de dos pisos (que tiene una enorme capacidad) tiene peor accesibilidad pese a las generosas dimensiones de las puertas. Este “tiempo de parada” puede llegar a condicionar la capacidad de la línea, que con “tiempos de parada” de 200 segundos resulta imposible mantener una secuencia entre trenes inferior a los cuatro minutos (15 trenes a la hora), sea cual sea el sistema de señalización.

5. CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente puede extraerse lo siguiente:

1. Existen diferencias importantes en el “tiempo de paradas” entre los distintos trenes en una misma estación para el mismo servicio y para un mismo número de viajeros evolucionados. El “tiempo de parada” de un tren en cada estación depende de determinadas características del tren (distancia vertical entre tren y andén, número de plazas que son servidas y, con menor intensidad, el ancho útil de la puerta).
2. La reducción del “tiempo de paradas” puede suponer una reducción del “tiempo de viaje”, y por lo tanto un aumento del ingreso que se puede obtener, además de una reducción del coste operativo. Para una misma línea, entre los trenes más accesibles y menos accesibles la proporción de la diferencia de “tiempo de paradas” puede ser de 1 a 2 en larga distancia y de 1 a 1,2 en cercanías en los que el diseño de la accesibilidad está normalmente más cuidado.
3. Alternativamente, un menor “tiempo de paradas” manteniendo el “tiempo de viaje” supone la posibilidad de disponer de mayor “tiempo de recorrido”, y por ello reducir el consumo de energía ya que el tren puede ir a una menor velocidad media y/o realizar una conducción económica.
4. Para el recorrido de alta velocidad en el caso simulado los “tiempos de paradas” para los distintos trenes oscila entre 121 y 240 segundos, lo que permitiría una reducción teórica del consumo del 1,13 por ciento, del tren con menor tiempo de parada frente al tren con peor accesibilidad.
5. Para el caso simulado del servicio de cercanías los “tiempos de paradas” para los distintos trenes oscilan entre 240 y 289 segundos lo que supone un ahorro del consumo de energía para el caso del tren con mejor accesibilidad de un 1,26 por ciento frente al tren que tiene un mayor “tiempo de parada”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer su colaboración a M^a Pilar Martín Cañizares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARCÍA ALVAREZ, A., CILLERO HERNANDEZ, A., RAMOS MELERO, R., PUENTE DOMINGUEZ, F., MARTÍN CAÑIZARES, M.P. (2008) Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros, junio-2008.

FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES e IDAE (2010) Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, enero-febrero 2009.

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

El presente documento recoge, corregidos, ampliados y actualizados los contenidos del proyecto fin del Master Universitario en Sistemas Ferroviarios impartido en la Universidad Pontificia de Comillas en el año 2010.

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles, España

RESUMEN

En este apartado se cuantifica el consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías en función de los valores de los que depende. Se han simulado 12 los consumos en dos líneas con perfiles diferentes; utilizando cuatro tipos (productos) distintos de mercancías; cada uno de ellos con diferentes tamaños (cargas remolcadas); y con máquina eléctrica y con diésel.

Se pretende dar un orden de magnitud a la gran variabilidad que presenta el consumo de energía y las emisiones en los trenes de mercancías. Además, se determina que parámetros son los que mayor incidencia tienen en esta variabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector de transporte de mercancías por ferrocarril se produce un consumo de energía especialmente intensivo y sobretodo muy variable, es decir dependiendo de la carga que se transporta, el tipo de tracción utilizado, el número de trayectos que se realizan en vacío y el perfil de línea, se producen consumo y emisiones de CO₂ de diferente magnitud.

En otros medios de transporte, esta variabilidad es muy baja, los consumos y emisiones se mantienen en un rango pequeño, como es el caso del transporte por carretera, en el que el consumo no varía demasiado de unos tipos de camiones a otros y no les afecta excesivamente la carga que es transportada.

Debida a estas razones, se considera que es importante indicar qué factores provocan esta variación, cuales son los parámetros que tienen una mayor incidencia y el orden de magnitud de los mismos, para poder demostrar la existencia de una gran variabilidad.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS, MATERIAL Y DE LAS LÍNEAS

A continuación se muestran las características del material utilizado, las líneas que se consideran representativas y el tipo de vagones utilizados.

¹² Se ha utilizado el simulador ALPI-2810[®] de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en su versión 08, que se adapta en una versión simplificada, para su uso como calculador de consumos y emisiones de los trenes de mercancías.

2.1 Máquinas

Las máquinas utilizadas han sido la diésel de la serie 333 y la eléctrica de la serie 250 cuyas características principales se resumen a continuación. Tabla 1. Características de locomotora diésel 333

Diésel 333	
Tipo	Diésel
Masa (t)	120
Longitud (m)	20,7
Potencia (kW)	1.875
Ejes	6
Velocidad máxima (km/h)	140
Tensión (V)	No
Esfuerzo máximo (kN)	330



Tabla 2. Características de locomotora eléctrica 333

Eléctrica 250	
Tipo	Eléctrica
Masa (t)	124
Longitud (m)	20
Potencia (kW)	4.600
Ejes	6
Velocidad máxima (km/h)	120
Tensión (V)	3000
Esfuerzo máximo (kN)	349



2.2 Tipos de mercancía (productos) y vagones

Los tipos de mercancías (productos) a transportar para los que se ha hecho la simulación son: automóviles, graneles, siderúrgicos planos y petroquímicos. Para el transporte de cada uno de ellos se han empleado los vagones de uso más extendido para el mismo, cuyas características se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3. Características de vagones para el transporte de las distintas mercancías

Vagón MA5 2p transporte de automóviles		Vagón TT5 para transporte de graneles	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	22,0	Carga máxima (t)	54,5
Tara media (t)	27,7	Tara media (t)	25,5
Longitud entre topes (m)	27,00	Longitud entre topes (m)	14,24
Longitud interior caja (m)	52,20	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	100	Velocidad máxima (km/h)	100
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360

Vagón JJ92 para transporte de siderúrgicos		Vagón RR92 para transporte de Petroquímicos	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	64,7	Carga máxima (t)	55,4
Tara media (t)	25,3	Tara media (t)	26,4
Longitud entre topes (m)	12,04	Longitud entre topes (m)	15,24
Longitud interior caja (m)	10,80	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	120	Velocidad máxima (km/h)	100
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360

2.3 Líneas recorridas

La simulación de todas las composiciones se ha realizado para dos líneas: una con un perfil suave (Valladolid-León), y otra de perfil montañoso (León-Gijón).

La línea de Valladolid-León; que tiene una longitud de 171,2 kilómetros, está electrificada a 3 kilovoltios en continua, permite una velocidad máxima de servicio de 140 km/h y no tiene paradas intermedias. La velocidad media en la marcha, tanto para los trenes de mercancías eléctricos como para los diésel es de 75 km/h, similar a la que obtienen en la práctica los trenes de mercancías en España, siendo su rampa característica 12 milímetros por metro (mm/m).

La línea León-Gijón tiene una longitud 171,600 kilómetros, está electrificada a 3 kilovoltios en corriente continua (CC), con una velocidad máxima de servicio de 140 km/h y sin paradas intermedias. La velocidad media es de 73 km/h, siendo su rampa característica 22 mm/m.

3. CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO

En este apartado se cuantifica el consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías en función de los valores de los que depende. Se han simulado¹³ los consumos en dos líneas con perfiles diferentes; utilizando cuatro tipos (productos) distintos de mercancías; cada uno de ellos con diferentes tamaños (cargas remolcadas); y con máquina eléctrica y con diésel.

3.1 Definiciones

Para el cálculo tanto del consumo de energía como para las emisiones de CO₂, los indicadores utilizados son:

1. Energía en barras de la central de generación (eléctrica): es la energía eléctrica medida a la salida de la central generadora de energía eléctrica. Se calcula con la energía que entra en la subestación del ferrocarril multiplicada por el coeficiente de pérdidas en el transporte y la distribución de la electricidad¹⁴.
2. Energía suministrada al vehículo en el tren diésel: es la energía consumida por el vehículo. En este caso, toda la energía consumida es de origen fósil.
3. Emisiones de CO₂: se calculan a partir de la energía en barras de la central de generación (tracción eléctrica) o en pozo de petróleo (tracción diésel). Para el cálculo se multiplican los kWh consumidos por los gramos de CO₂ emitidos por kWh (en España, 2009, 233 gramos de CO₂ por kilovatio-hora); o los litros de gasóleo por el factor de emisiones (2.670 gramos de CO₂ por litro) y se añaden las emisiones en el proceso “well to tank” (14,58 g/MJfinal)

¹³ Se ha utilizado el simulador ALPI-2810[®] de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en su versión 08, que se adapta en una versión simplificada, para su uso como calculador de consumos y emisiones de los trenes de mercancías.

¹⁴ Pérdidas obtenidas del proyecto de investigación “Flujos de la electricidad para el transporte” realizado por Eduardo Pilo de la Fuente (2008).

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad

Las unidades utilizadas (tanto para la energía en barras de la central como en boca del depósito) son kWh/ (tonelada_neta-kilómetro); y las unidades utilizadas para las emisiones de dióxido de carbono son kilogramos de CO₂ por tonelada neta-kilómetro.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Consumo y emisiones con tracción eléctrica en línea con perfil suave

A continuación se muestran las tablas que reflejan los consumos y las emisiones de los trenes de mercancías de cada uno de los productos transportados, con diferentes tamaños de tren, remolcados por máquina eléctrica en línea de perfil suave.

Tabla 4. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de automóviles, remolcado por locomotora eléctrica 250

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/t _{net} -km)	(kWh/t _{net} -km)	(kgCO ₂ /t _{net} -km)
t _{net} (1coche=1t)	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	194	179	0,355	0,622	0,173
105	478	373	0,115	0,192	0,054
210	833	623	0,098	0,162	0,045
300	1.187	872	0,094	0,155	0,043
420	1.541	1.121	0,090	0,147	0,041
510	1.853	1.343	0,089	0,146	0,040
600	2.164	1.564	0,088	0,144	0,040
705	2.519	1.814	0,087	0,132	0,040
765	2.717	1.952	0,087	0,141	0,039

Coefficiente de Densidad = 0,9

Coefficiente Aprovechamiento = 0,9

Coefficiente trenes vacíos = 0,8

Tabla 5. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de graneles, remolcado por locomotora eléctrica 250

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/t _{net} -km)	(kWh/t _{net} -km)	(kgCO ₂ /t _{net} -km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	163	148	0,273	0,538	0,149
105	301	196	0,055	0,102	0,028
210	478	268	0,038	0,068	0,019
300	631	316	0,032	0,056	0,016
420	808	388	0,029	0,049	0,014
510	946	436	0,027	0,046	0,013
600	1.084	484	0,026	0,043	0,012
705	1.261	556	0,025	0,042	0,012
765	1.345	580	0,024	0,040	0,011

Coefficiente de densidad = 0,8

Coefficiente Aprovechamiento = 0,9

Coefficiente de vacíos = 1

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad

Tabla 6. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de Siderúrgicos planos, remolcado por locomotora eléctrica 250

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tnetá-km)	(kWh/tnetá-km)	(kgCO ₂ /tneta-km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	164	149	0,273	0,538	0,149
105	280	175	0,051	0,093	0,026
210	435	225	0,034	0,060	0,017
300	591	276	0,028	0,047	0,013
420	721	301	0,025	0,041	0,011
510	862	352	0,024	0,039	0,011
600	977	377	0,022	0,036	0,010
705	1.133	428	0,022	0,034	0,010
765	1.218	453	0,021	0,034	0,009

Coefficiente de Densidad =1

Coefficiente Aprovechamiento = 0,95

Coefficiente de vacíos = 1

Tabla 7. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de petroquímico, remolcado por locomotora eléctrica 250

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tnetá-km)	(kWh/tnetá-km)	(kgCO ₂ /tneta-km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	164	149	0,276	0,543	0,151
105	278	173	0,052	0,095	0,026
210	432	222	0,035	0,061	0,017
300	562	247	0,029	0,049	0,014
420	716	296	0,026	0,042	0,012
510	830	320	0,024	0,038	0,011
600	969	369	0,023	0,037	0,010
705	1099	394	0,022	0,034	0,010
765	1183	418	0,021	0,034	0,009

Coefficiente de Densidad =1

Coefficiente Aprovechamiento = 0,95

Coefficiente de vacíos = 1

4.2 Consumo y emisiones con tracción diésel en línea de perfil suave

A continuación se muestran las tablas con los consumos y las emisiones de los trenes de mercancías de diversos productos y tamaños obtenidos remolcados por máquina diésel en línea de perfil suave.

Tabla 8. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de automóviles, remolcado por locomotora diésel 333

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tnetá-km)	(kWh/tnetá-km)	(kgCO ₂ /tneta-km)
tnetas (1coche=1t)	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	189	175	0,779	1,500	0,387
105	464	369	0,280	0,515	0,133
210	780	591	0,237	0,430	0,111
300	1.096	813	0,218	0,392	0,101
420	1.412	1.034	0,215	0,387	0,100
510	1.687	1.228	0,212	0,381	0,098
600	1.934	1.394	0,206	0,370	0,095
705	2.278	1.644	0,207	0,372	0,096
765	2.443	1.754	0,205	0,367	0,095

Coefficiente de Densidad = 0,9

Coefficiente Aprovechamiento = 0,9

Coefficiente trenes vacíos = 0,8

Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad

Tabla 9. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de graneles, remolcado por locomotora diesel 333

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tneto-km)	(kWh/tneto-km)	(kgCO ₂ /tneto-km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	159	144	0,562	1,101	0,284
105	297	192	0,123	0,223	0,058
210	474	264	0,090	0,158	0,041
300	627	312	0,078	0,134	0,035
420	804	384	0,071	0,120	0,031
510	942	432	0,067	0,112	0,029
600	1.080	480	0,064	0,107	0,028
705	1.257	552	0,063	0,105	0,027
765	1.341	576	0,062	0,101	0,026

Coefficiente de Densidad = 0,9

Coefficiente Aprovechamiento = 0,9

Coefficiente trenes vacíos = 1

Tabla 10. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de siderúrgicos planos, remolcado por locomotora diesel 333

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tneto-km)	(kWh/tneto-km)	(kgCO ₂ /tneto-km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	160	145	0,562	1,101	0,284
105	276	171	0,112	0,201	0,052
210	431	221	0,079	0,135	0,035
300	587	272	0,067	0,110	0,028
420	717	297	0,060	0,097	0,025
510	858	348	0,058	0,093	0,024
600	973	373	0,055	0,087	0,022
705	1.129	424	0,054	0,085	0,022
765	1.214	449	0,053	0,083	0,021

Coefficiente de Densidad = 0,9

Coefficiente Aprovechamiento = 0,95

Coefficiente trenes vacíos = 1

Tabla 11. Características, consumos y emisiones de CO₂ de un tren de transporte de petroquímico, remolcado por locomotora diesel 333

Características del tren			Consumo	Consumo	Emisiones (GEI)
Tren cargado		Tren vacío	(kWh/tneto-km)	(kWh/tneto-km)	(kgCO ₂ /tneto-km)
toneladas netas	toneladas brutas	toneladas brutas	Tren cargado	Consumo y emisiones del tren cargado más el tren vacío	
15	160	145	0,569	1,115	0,288
105	274	169	0,114	0,205	0,053
210	428	218	0,082	0,140	0,036
300	558	243	0,069	0,114	0,029
420	712	292	0,062	0,101	0,026
510	826	316	0,058	0,092	0,024
600	965	365	0,057	0,091	0,023
705	1.095	390	0,054	0,085	0,022
765	1.179	414	0,053	0,083	0,022

Coefficiente de Densidad = 1

Coefficiente Aprovechamiento = 0,95

Coefficiente trenes vacíos = 1

Las gráficas que se muestran a continuación, resumen todos los valores obtenidos en las tablas anteriores.

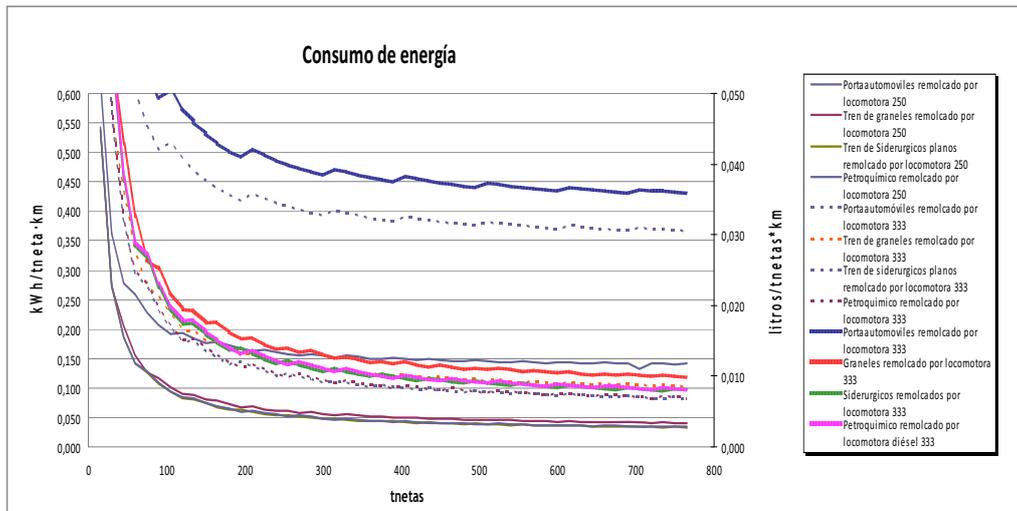


Fig. 1. Consumo de energía con tracción diésel y tracción eléctrica en línea de perfil suave para transporte de diversos productos

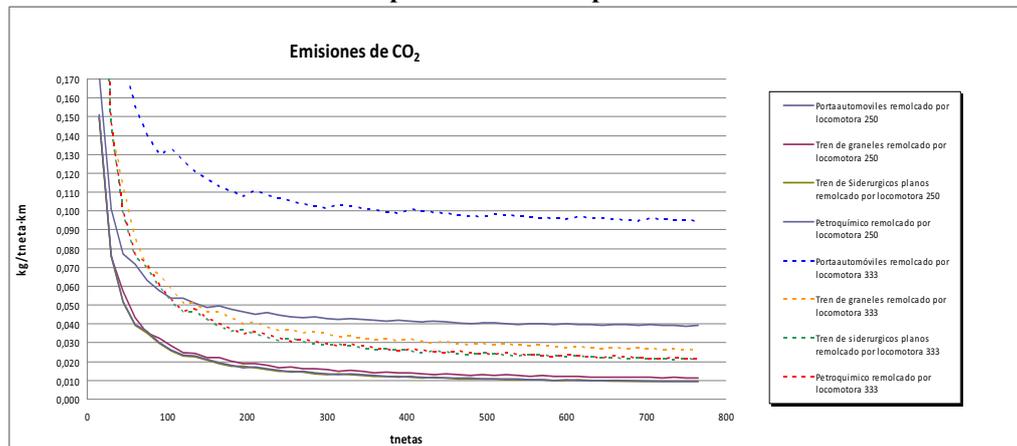


Fig. 2. Emisiones de CO₂ (GEI) con tracción diésel y tracción eléctrica en línea de perfil suave para transporte de diversos productos

4.3 Diferencias entre tráfico diésel y eléctrico

En las gráficas y tablas se observa lo siguiente:

Los trenes remolcados por máquina diésel tienen un consumo de energía y unas emisiones de dióxido de carbono aproximadamente entre 2,2 y 2,4 veces mayor que las composiciones eléctricas, a igualdad de tamaño del tren (y por ello, de toneladas netas de carga). En la siguiente tabla se observa la relación existente entre las composiciones diésel y las eléctricas, en cuanto a su consumo y emisiones, para una misma carga (420 toneladas netas).

Tabla 12. Comparativa entre tracción diesel y tracción eléctrica para transporte de los diversos productos

	Consumo kWh Diesel/ kWh Eléctrico	Emisiones CO ₂ Diesel/ CO ₂ Eléctrico
Portaautomóviles	2,628	2,628
Graneles	2,428	2,428
Siderurgicos	2,377	2,377
Petroquimicos	2,387	2,387

Esta diferencia entre la tracción diésel y eléctrica está en la línea de lo apuntado en García Álvarez (2008). [2]

4.4 Efecto del tamaño del tren

Para el mismo producto y el mismo tipo de tracción, las emisiones y el consumo se reducen a medida que se aumenta la carga del tren (por ejemplo, para cargas de 100 toneladas netas en el transporte de graneles el consumo de energía es de 10,2 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros; mientras que para trenes de 420 toneladas netas, el consumo baja a 4,9 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros). A partir de las 400 toneladas netas los consumos y emisiones se estabilizan y se mantienen prácticamente independientes del tamaño del tren.

La alta sensibilidad del consumo y energía y emisiones al tamaño del tren es característica de los servicios de mercancías, pues éstos son siempre remolcados por locomotora, y por ello, la energía necesaria para mover la propia locomotora “se diluye” entre la carga a medida que aumenta tamaño del tren.

4.5 Diferencias por productos

En los resultados presentados en las tablas se aprecia que el caso de transporte de automóviles es distinto a los demás. La limitación del número de automóviles por vagón no es debida al peso, sino al volumen de la carga (en este caso, longitud de los coches), lo que da lugar a que la relación entre la tara del vagón y la carga neta transportada es muy alta. Por ejemplo, una plataforma portaautomóviles MA5 de dos pisos, suponiendo que la longitud media de un automóvil es de 4 metros, puede cargar 11,75 vehículos que equivalen aproximadamente a 11,75 toneladas. Por tanto, por cada tonelada neta se transportan 2,36 toneladas de tara del vagón. Mientras que en petroquímicos, por ejemplo, por cada tonelada neta se transporta 0,37 toneladas de tara del vagón.

En la siguiente tabla se indica cómo para las mismas toneladas netas transportadas e igual tamaño del tren, los consumos de los trenes son prácticamente iguales entre sí, exceptuando el caso de lo portaautomoviles que es aproximadamente 4 veces mayor.

Por lo tanto, para los sucesivos cálculos se utilizará un tren de referencia que será una composición para el transporte de petroquímicos, ya que como se ha mostrado sus consumos son prácticamente iguales a los de graneles y siderúrgicos.

4.6 Vacíos

Existe un parámetro que afectan indirectamente al consumo, que es coeficiente de vacíos. Cada tren cargado genera un determinado número de trenes vacíos. Un tren que vuelve vacío también consume energía y a este consumo se le debe imputar a las toneladas netas transportadas en el sentido contrario. Por ejemplo, en el caso de transporte de graneles el

coeficiente es uno (1 tren cargado genera a 1 tren vacío) pero para el caso de portaautomoviles es de 0.8 (cada tren cargado necesita a 0.8 trenes vacíos).

4.7 Comparativa de consumo según líneas

Para observar la influencia que tiene el perfil de la línea en el consumo y en las emisiones de dióxido de carbono, se realiza una comparativa de dos productos distintos en dos líneas distintas. Una línea de perfil suave (Valladolid- León) y otra línea de perfil montañoso (León-Gijón).

En este cálculo se utiliza dos composiciones distintas (eléctrico y diésel) y dos productos; el producto de referencia (Petroquímicos) considerado el representativo de los “densos” y el de transporte de automóviles, considerado “ligero”.

Tras el estudio realizado anteriormente, se observa que para los distintos trenes “densos” el consumo de energía y las emisiones son parecidas. Debido a esto el transporte de petroquímicos (que ofrece unos resultados intermedios) se puede utilizar como producto de referencia.

Se considera que transportan 300 toneladas netas las cuatro composiciones que se han escogido.

Además para el caso de la línea montañoso, para el cálculo de consumos y emisiones se tiene en cuenta ambos sentidos de la marcha, ya que hay diferencias entre un sentido y otro. En las siguientes gráficas se puede observar los consumos y las emisiones generadas.

Tabla 13. Comparación de consumos y emisiones generadas en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para diversos tipos de productos

Toneladas netas = 300 t	Eléctrico		Diésel	
	Consumo entrada subestac. (kWh/t _{neto} ·km)	CO ₂ entrada subestac. (kg/t _{neto} ·km)	Consumo boca depósito(kWh/t _{neto} ·km)	CO ₂ boca depósito (kg/t _{neto} ·km)
Petroquímico perfil suave	0,049	0,014	0,114	0,029
Petroquímico perfil montañoso	0,091	0,025	0,226	0,059
Relacion Montaña/ perfil suave	1,870	1,870	1,983	1,983
Portaautomoviles perfil suave	0,155	0,043	0,392	0,101
Portaautomoviles perfil montañoso	0,248	0,069	0,582	0,153
Relacion Montaña/ perfil suave	1,605	1,605	1,482	1,482

Puede observarse que la diferencia entre los dos tipos extremos de línea son muy significativas entre 1,87 y 2,023 para los mismos trenes “densos” y entre 1,482 y 1,602 para los trenes “ligeros”.

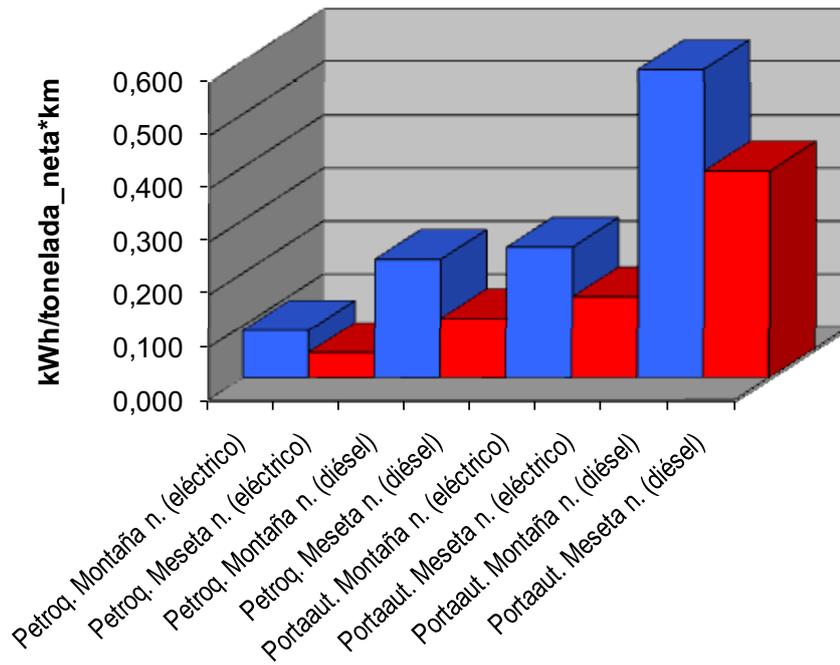


Fig. 3. Comparativa gráfica entre los consumos generados en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañosa para transporte de diversos tipos de productos

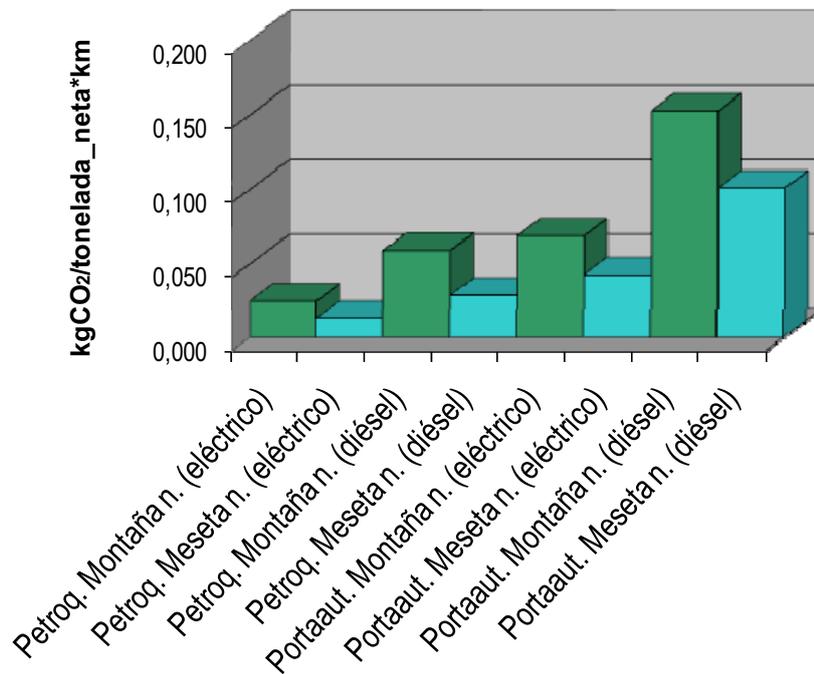


Fig. 4. Comparativa gráfica entre las emisiones de dióxido de carbono en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañosa para transporte de diversos tipos de productos

5. PANORÁMICA DE LA VARIABILIDAD DEL CONSUMO

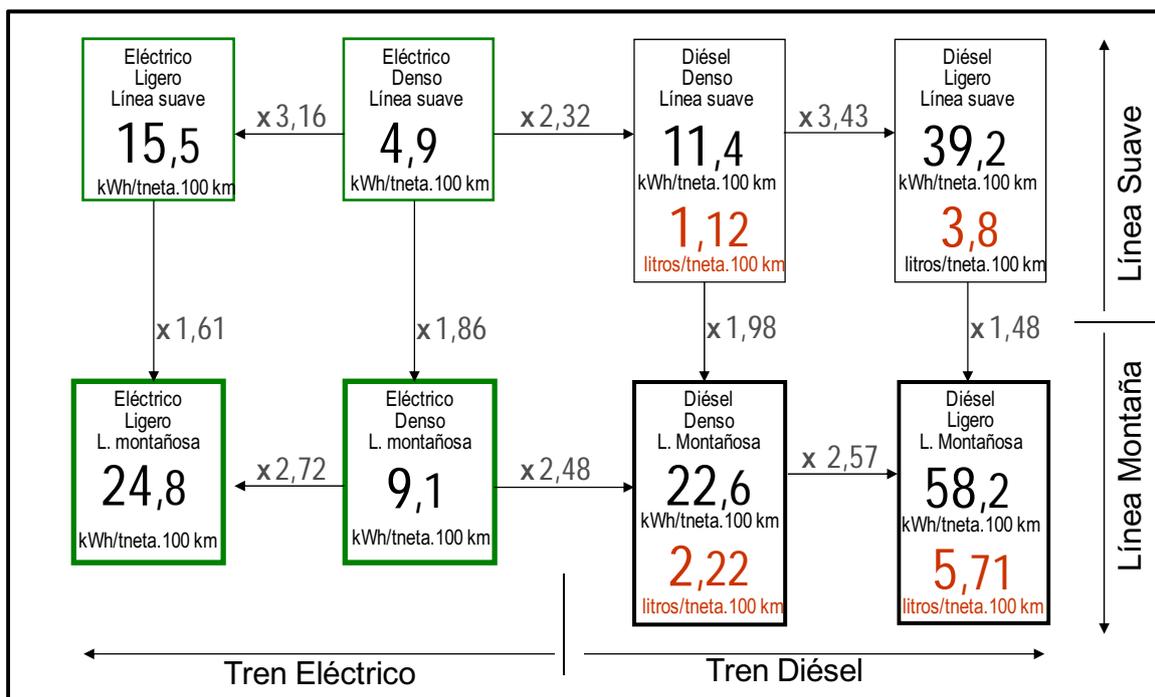
A partir del consumo de energía y las emisiones generado por un producto de referencia (petroquímicos “densos”), para un transporte de 300 toneladas, tracción diesel y en una línea de perfil suave, (es el de 0.049 kWh/(tonelada_neta kilómetro) y 0.014 kg CO₂/(tonelada_neta kilómetro)) es posible estimar el orden de magnitud de los consumos de las diferentes composiciones multiplicando la de referencia por los siguientes valores:

Para determinar el consumo de una composición con tracción diesel se multiplica el consumo del producto referencia por un valor que oscila entre 2,3 y 2,5.

Para determinar el consumo de un tren portaautomóviles de tracción eléctrica que transporta 300 toneladas netas (ligero), se multiplica el consumo del producto de referencia (denso) por un valor que oscila entre 3,5 y 3,8.

Para determinar el consumo de energía en una línea de montañosa, para el tren de referencia, se multiplica el consumo del tren definido anteriormente por un valor entre 1,4 y 1,8 para el tren “ligero” y entre 1,8 y 2 por el tren “denso”. En el caso de transporte de automóviles para determinar el consumo de este en un perfil de montaña multiplicaríamos el tren “ligero” en un perfil de meseta por un valor de 1,5, tanto para diesel como para eléctrico.

Para determinar el consumo de trenes de mayor longitud, hay que acudir a las tablas anteriores. A partir de 300 toneladas netas (al aumentar la carga transportada, aumenta la longitud de los trenes) transportadas en todas las composiciones, su consumo y emisiones tienen una tendencia asintótica, es decir que se mantienen prácticamente constantes.



Tren ligero Portaautomóviles de 300 toneladas netas y 1.090 toneladas brutas
 Tren denso. Petroquímico, de 300 toneladas netas y de 562 toneladas brutas
 Consumo de energía tracción eléctrica medido a la salida de la central generadora
 Consumo de energía en diésel medido en la boca del depósito de la máquina
 En todos los casos, se incluye la parte proporcional de los consumos de los trenes vacíos

Fig. 5. Consumo de energía (por tonelada neta cada 100 kilómetros) en un tren ligero y en un tren denso de 300 toneladas netas en dos tipos de línea con tracción eléctrica y diésel

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PEREZ ARRIAGA, I., PILO, E., LOPEZ DEL HIERRO, I.: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”. Monografías EnerTrans 1. Ed.: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Infras (1998): “Intermodal comparisons of atmospheric pollutant emissions“, dentro de MEET project

COST (1996): Working Group A3 on heavy duty vehicle emissions: notes on a meeting in Cologne on 7 May 1996. Management Committee of the COST Action 319. European Commission, DG VII, EUCO-COST/319/6/96, Brussels. [COST]

INFRAS (1995): Workbook / Handbook on emission factors for road transport, version 1.1. INFRAS, Bern, Umweltbundesamt, Berlin, and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Análisis comparativo del consumo de energía y emisiones de trenes eléctricos, diesel y duales

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

*Este documento corresponde a la ponencia presentada el día 13 de abril del 2010 en el I Congreso Internacional de Tecnología ferroviaria, celebrado en Zaragoza.
Para esta edición se ha ampliado y actualizado*

Análisis comparativo del consumo de energía y emisiones de trenes eléctricos, diesel y duales

M^a Pilar Martín Cañizares

Investigadora del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ignacio González Franco

Investigador del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

El objetivo de este estudio es comparar el consumo de energía y emisiones en un recorrido determinado de un tren con tracción eléctrica, diésel y dual¹⁵ (entendiendo por tales los que son a la vez eléctricos y diésel-eléctricos). En este último caso, el cálculo se realiza en función del porcentaje del recorrido que se realice con un tipo u otro de tracción. Adicionalmente se estudia la eficiencia del empleo de tracción por turbina de gas por las razones que se exponen más adelante. Todos los cálculos se hacen para un tren de viajeros y otro de mercancías.

1. INTRODUCCIÓN

La coexistencia en la red ferroviaria española de tramos electrificados y sin electrificar ha llevado a los operadores ferroviarios a plantearse la necesidad de disponer de vehículos duales. En el caso de transporte de viajeros, esta circunstancia adquiere mayor relieve por la progresiva extensión de la red de alta velocidad, electrificada en corriente alterna a 25 kV. Muchos trenes de viajeros realizan parte de su recorrido por líneas de alta velocidad para continuar por líneas convencionales electrificadas en corriente continua a 3.000 voltios, o por líneas sin electrificar (p.ej. Madrid-Coruña, Madrid-Murcia y Madrid-Algeciras.)

Cuando se operan servicios que circulan sucesivamente por tramos electrificados y no electrificados lo normal es cambiar la locomotora, pero ello aumenta el tiempo de viaje y además implica disponer de un mayor parque de vehículos motores. La alternativa es no cambiar de máquina y emplear la diesel en todo el recorrido lo que cada vez es más frecuente en España, hasta el punto que de la carga de los trenes de mercancías remolcados con tracción diésel en la red española, más de la mitad (el 52%) circulan en línea electrificada; y de la carga total de los trenes –de viajeros y mercancías–, remolcada con

¹⁵ Existe una cierta confusión terminológica entre el “dual” e “híbridos”, ya que en el campo del automóvil se llama “híbrido” a los vehículos que tienen motor de gasolina y eléctrico con o sin almacenamiento de energía y posibilidad de enchufar a la red. Desde este punto de vista una máquina diésel-eléctrica es un vehículo híbrido. Los vehículos que aquí se analizan son a la vez diésel-eléctricos y eléctricos, es decir, los que en automoción se denominarían “híbridos enchufables”, con la diferencia de que están continuamente conectados mediante la catenaria.

Los fabricantes han adoptado distintos términos para denominar a este tipo de vehículos, así CAF emplea la denominación “duales” y Bombardier y Talgo la denominación “híbridos”. En Francia los automotores de la serie 82500 se llaman BiBi (Bi-modal, Bi-tensión).

tracción diésel el 41% circula bajo catenaria [1]. Como es obvio, esta opción es ineficiente energéticamente.



Fig. 1. Electrificación de la red ferroviaria básica en 2010. El porcentaje de líneas electrificadas es del 60,21%

La oportunidad de los vehículos duales nace del hecho de que en la actualidad la tracción diésel es generalmente diésel-eléctrica: en este tipo de locomotora, uno o dos grupos motor diésel-generator producen energía eléctrica que, tras los oportunos procesos de conversión, alimenta a los motores eléctricos de tracción. Ello permite que una parte del equipo de tracción sea común en una máquina diésel-eléctrica y es otra eléctrica.



Fig. 2. Locomotora dual Bitrac (CAF) y tren autopropulsado 130 (Talgo) del que se deriva el 730 dual

En el caso de trenes autopropulsados duales, en comparación con un tren eléctrico, para una misma longitud, la masa es mayor debido a que a los equipos de tracción eléctrica se añaden los grupos motores diésel. Por otra parte, en el caso de trenes de gran potencia (como los de alta velocidad) los equipos de tracción diésel son voluminosos y no pueden ubicarse bajo el bastidor, por lo que se reduce la capacidad de transporte de viajeros.

2. METODOLOGÍA

Se trata de comparar la energía y emisiones para un mismo recorrido con tracción diesel, eléctrica y dual. En los dos primeros casos la energía y las emisiones son independientes del porcentaje de línea electrificada, ya que se emplea en todo el recorrido el mismo tipo de tracción, mientras que en dual los resultados dependen del porcentaje de recorrido que se haga con tracción eléctrica y del que se haga con diésel-eléctrica. Obviamente, el caso de la tracción eléctrica con diferentes porcentajes de línea no electrificada físicamente posible, sino que es un supuesto de comparación

El mayor peso y tamaño del tren dual pueden hacer que con todo el recorrido diésel el consumo de energía no coincida con el tren diésel, y que con todo el recorrido con tracción eléctrica, el consumo no coincida con el del tren eléctrico.

Se complementa con la consideración, en el caso de trenes de viajeros, de trenes duales con turbina de gas. Frente a los motores diésel, la turbina de gas ocupa menos espacio y tiene una masa inferior; sin embargo, su consumo (mientras funciona) es mayor. Se valora el efecto que tienen estas características frente a trenes duales.

2.1 Indicadores empleados

La comparación de consumos de vehículos con distintos sistemas de propulsión no es objetiva si los consumos se miden en energía final, puesto que no se tendrían en cuenta las pérdidas que se producen antes de que la energía llegue al vehículo y el efecto de una estructura de pérdidas diferente en tracción diésel y eléctrica. La tracción diésel se caracteriza por tener menores pérdidas en las fases de extracción, refinado y transporte hasta el vehículo, y sin embargo mayores pérdidas en el vehículo como consecuencia del menor rendimiento de los motores de combustión. En contraposición, en la tracción eléctrica la mayor parte de las pérdidas tienen lugar en el proceso de generación y transporte y sin embargo (dado que los motores tienen rendimientos mayores que los diésel) las pérdidas en el vehículo son menores.

El indicador que se utiliza para comparar los distintos tipos de tracción son las emisiones de CO₂ por km, pues refleja el empleo de combustibles fósiles además de la contribución al cambio climático como consecuencia del efecto invernadero.

Todos los resultados han sido obtenidos mediante el simulador de consumos ALPI2810 en su versión 9, desarrollado por el “Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril” de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, siguiendo la Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias.

3. TREN DE MERCANCÍAS

3.1 Características del material

Para la simulación del tráfico de mercancías se emplea la locomotora dual Bitrac de CAF (fabricada para el operador Fesur) remolcando un tren de productos petroquímicos de 285 toneladas netas y se comparará con la misma composición remolcada por la locomotora eléctrica serie 250 y la diésel serie 333.300 de potencia similar. La locomotora serie 250 se ha simulado con y sin freno regenerativo para poder cuantificar el efecto de esta tecnología en las emisiones de CO₂.

Fig. 4. Línea convencional de Madrid a Coruña por Ávila

3.3 Resultados de la simulación

Como hipótesis de simulación se han considerado que todos los trenes circulan a una velocidad máxima de 100 km/h.

A continuación se muestran los resultados de la simulación.

Tabla 2. Energía y emisiones tráfico de mercancías

	Tracción eléctrica (sin freno reg)	Tracción eléctrica (con freno reg)	Tracción dual (Régimen eléctrico con freno reg)	Tracción diésel	Tracción dual (Régimen diése)
	Loc250	Loc250 con freno reg	Loc Bitrac	Loc333.3	Loc Bitrac
Energía importada en pantógrafo o entrada depósito gasóleo (kWh/km)	11,99	13,90	11,89	35,32	32,38
Consumo neto en pantógrafo o entrada depósito gasóleo (kWh/km)	11,99	12,40	9,96	35,32	32,38
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /km)	3,74	3,87	3,11	9,26	8,49

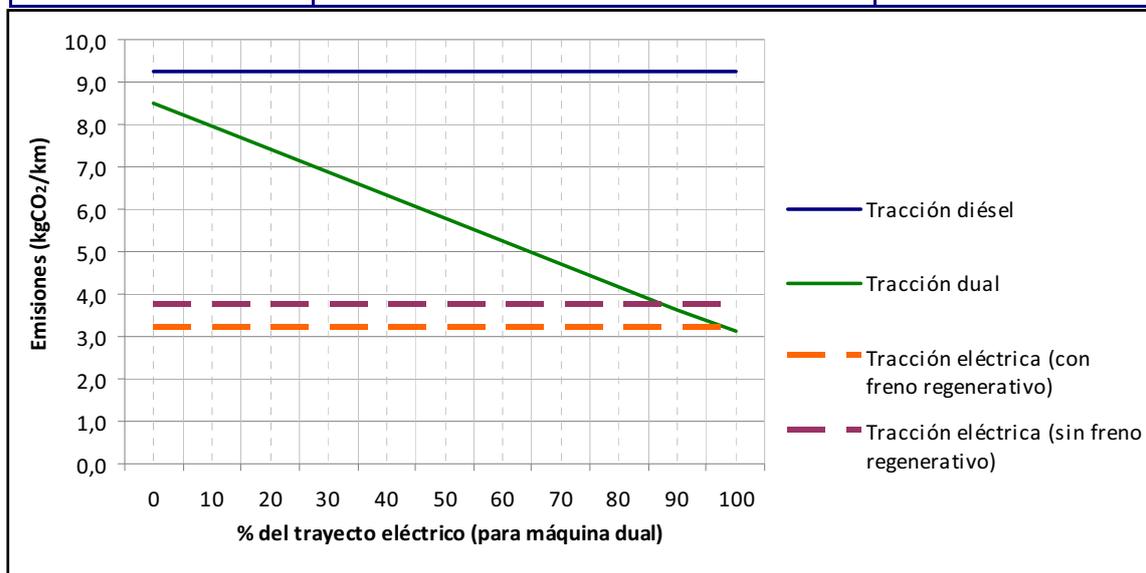


Fig. 5. Emisiones de CO₂ en el transporte de mercancías en función de la longitud del tramo electrificado

De los resultados anteriores puede observarse lo siguiente:

1. Las emisiones de la tracción diésel son aproximadamente tres veces mayores que en tracción eléctrica, en línea con lo indicado en García Álvarez (2009).
2. La tracción dual, para cualquier porcentaje de electrificación de la línea, tiene menores emisiones que la diésel. Aunque las masas de ambas composiciones son similares, el menor consumo y emisiones se explican por los mejores rendimientos de la máquina de tracción dual (diésel con transmisión eléctrica en corriente alterna).
3. En consecuencia, el uso de la máquina dual (sea cual sea el porcentaje de línea electrificada) es favorable con respecto al uso de la máquina diésel en todo el recorrido.
4. La reducción de las emisiones de la tracción dual es prácticamente lineal, de forma que a medida que se aumenta el porcentaje de recorrido electrificado crece la ventaja del uso de la dual frente a la diésel.

5. Para el total del recorrido electrificado, las emisiones de la máquina dual son prácticamente iguales a las de la eléctrica si ésta tiene freno regenerativo.
6. Si la máquina eléctrica no tiene freno regenerativo, la dual (que sí lo tiene) produce menos emisiones incluso con un 10% de recorrido en tracción diésel.

4. TREN DE VIAJEROS EN ALTA VELOCIDAD

4.1 Características del material

En el caso de servicios de viajeros de alta velocidad se emplea para la simulación el tren dual de ancho variable de Talgo serie 730 (130H) que se compara con el eléctrico de la serie 130 y con una rama de Talgo serie VII remolcada por una locomotora diésel 334.

Para hacer la comparación homogénea se ha supuesto en cada caso un número de coches que iguala la capacidad de los trenes (alrededor de 265 plazas). Por ello se comparan los consumos y emisiones por kilómetro tren, entendiendo que los consumos y emisiones por plaza kilómetro guardan la misma proporción.

Los trenes autopropulsados de la serie 730 se componen de dos motrices, dos coches extremos y nueve coches intermedios, pero sólo estos últimos están destinados a los viajeros, pues en los coches extremos se ubican los grupos electrógenos. El tren ofrece en total de 265 plazas.

Tren dual de viajeros serie 730, funcionamiento con tracción eléctrica

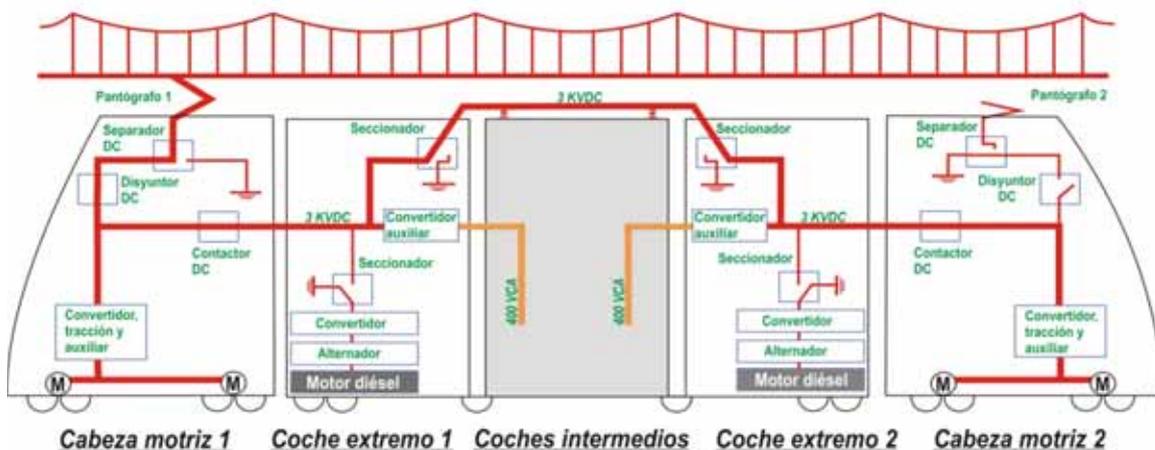


Fig. 6. Funcionamiento del tren dual Talgo serie 730 de viajeros en régimen eléctrico

Tren dual de viajeros serie 730, funcionamiento con tracción diésel

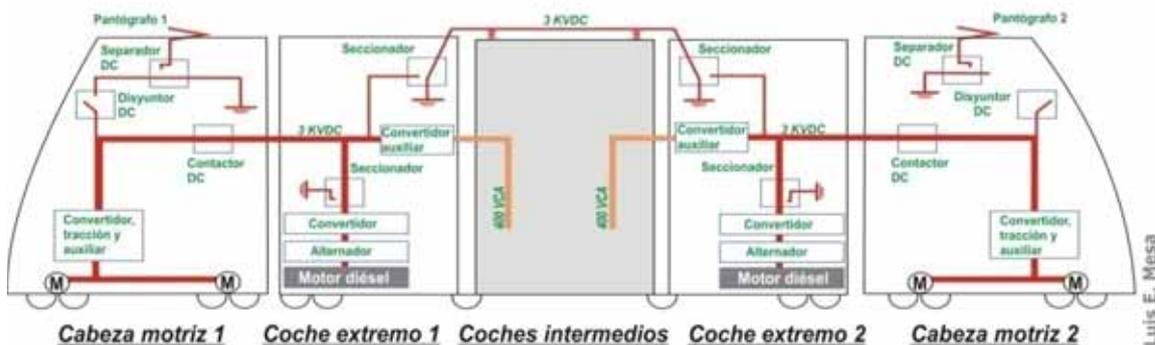


Fig. 7. Funcionamiento del tren dual Talgo serie 730 de viajeros en régimen diésel

Luis E. Mesa

La composición normal del autopropulsado eléctrico de la serie 130 es de dos motrices y once coches (298 plazas). Sin embargo, para equiparar el número de plazas con el dual de la serie 730 en la simulación se ha empleado una composición de dos motrices, dos coches extremos y ocho intermedios.

En el caso de la composición remolcada por locomotora, se ha optado por la máquina diésel 334 por ser la última incorporada al parque para traccionar trenes de viajeros y por ser diésel-eléctrica. Se utiliza para la simulación una composición de diez coches para emplear el mismo número de plazas que el tren serie 730.

También se han comparado los trenes anteriores con un tren dual con turbina de gas. Para ello se ha supuesto un tren imaginario basado en el 730, con 17 toneladas menos debido al menor peso del grupo motor generador, y con un rendimiento del 28%. La composición está formada por dos cabezas motrices y once coches, de los cuales diez y medio se destinan a viajeros y de este modo se iguala la capacidad con el resto de trenes estudiados.

Tabla 3. Características básica de los trenes empleados para la simulación de los trenes de viajeros

		Trenes de viajeros			
		730 Dual	s130 eléctrico	130T	334 Diésel
Fabricante		Talgo	Talgo		Vossloh+Talgo
Composición		M+11R+M	M+10R+M	M+10,5+M	Lc+10R
Tara	<i>t</i>	346	304,3	328,55	245,3
Longitud	<i>m</i>	186,500	171,015	178,487	157,587
Potencia eléctrica	<i>kW</i>	2.400 (c.a) / 2.000 (c.c)	4.800 (c.a)	2.400 (c.a) / 2.000 (c.c)	0
Potencia diésel	<i>kW</i>	3.600	0	3.600	2.390
Velocidad máxima	<i>km/h</i>	250	250	250	200
Plazas		265	262	265	262

4.2 Características de la línea

El tren de viajeros se simula en el trayecto de Madrid a Coruña, primero por línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid hasta Olmedo, a continuación por el ramal de alta velocidad Olmedo-Medina, donde cambia de ancho para pasar a circular por la línea convencional hasta Coruña.

Se ha elegido este trayecto por considerarse representativo de las características de las líneas convencionales no electrificadas que en el futuro se irán sustituyendo progresivamente por líneas de alta velocidad.

La línea de alta velocidad Madrid-Medina del Campo tiene una longitud 155,85 km, está electrificada a 25 kV en corriente alterna, siendo la rampa característica 22 mm/m y su velocidad máxima de servicio de 300 km/h (aunque se simula a 250 km/h, que es la velocidad máxima del tren)

La línea convencional entre Medina del Campo y Coruña tiene una longitud 528,7 km, no está electrificada, siendo la rampa característica 17 mm/m, su velocidad máxima de servicio de 160 km/h y para la simulación se ha considerado que el tren realiza seis paradas comerciales.



Fig. 8. Línea de Madrid a Coruña empleada para la simulación de los trenes de viajeros

4.3 Resultados de la simulación

Como hipótesis de simulación se ha considerado que el tren eléctrico y el tren dual en régimen eléctrico circulan a velocidad máxima de 250 km/h y el tren diésel y el dual en régimen diésel lo hacen a 160 km/h.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las simulaciones.

Tabla 4. Energía y emisiones de los trenes de viajeros

	Tracción eléctrica	Tracción dual (R. eléctrico)	Tracción dual (R. eléctrico)	Tracción diésel	Tracción dual (R. diésel)	Tracción dual (R. diésel)
	s130 (10 coches)	130T	730	Loc334+10R	130T	730
Energía importada en pantógrafo o entrada depósito gasóleo (kWh/km)	17,57	18,41	19,15	26,63	33,48	30,32
Consumo neto en pantógrafo o entrada depósito gasóleo (kWh/km)	15,43	16,26	17,00	26,63	33,48	30,32
Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /km)	4,44	4,68	4,89	6,98	9,31	7,95

A continuación se muestran las emisiones de CO₂ por kilómetro para los tres trenes analizados con respecto al tanto por ciento de línea electrificada para el tren dual.

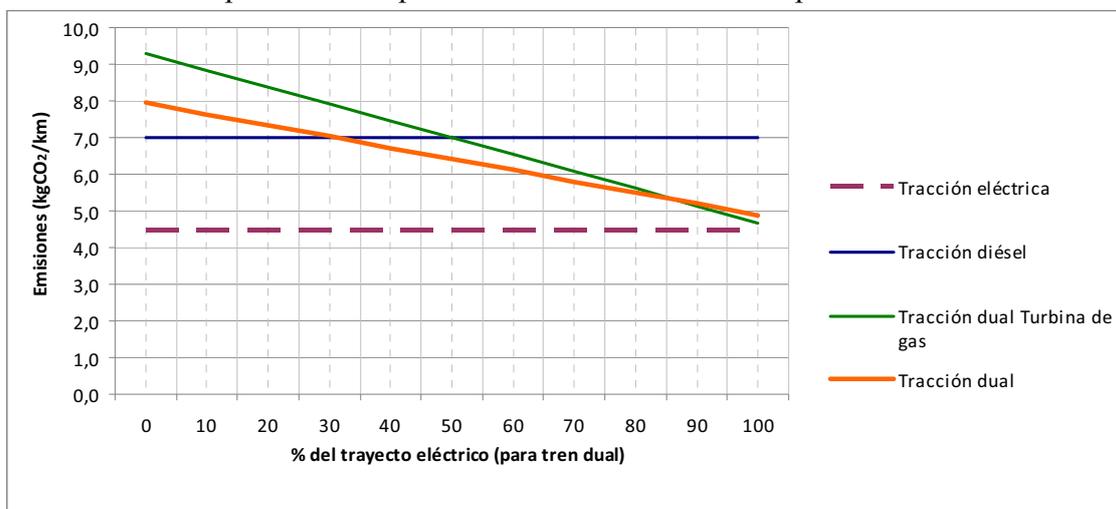


Fig. 9. Emisiones de CO₂ en el transporte de viajeros en función de la longitud del tramo electrificado

En los resultados anteriores puede observarse lo siguiente:

1. Las emisiones de CO₂ para la tracción diésel (6,98 kgCO₂/km) son aproximadamente 1,5 veces superiores a las de tracción eléctrica (4,44 kgCO₂/km). Esta diferencia es menor que la obtenida para el tráfico de mercancías pues mientras que en éstos las simulaciones se hicieron para todos los casos a la misma velocidad, en viajeros se consideró un tren eléctrico de alta velocidad frente a un diésel en velocidad convencional.
2. Para todo el recorrido sin electrificar las emisiones tren del dual son superiores que las del tren diésel puesto que el tren dual para la misma capacidad pesa más y además la transmisión de la locomotora diésel es eléctrica en corriente continua lo implica un rendimiento menor de la cadena de tracción
3. En el caso del 100% de electrificación las emisiones del tren dual son algo mayores que las del tren eléctrico por su mayor masa, aunque la diferencia no es tan importante porque la masa en alta velocidad no tiene gran repercusión en el consumo.
4. Cuando el porcentaje de línea electrifica es inferior al 30% no resulta eficiente emplear el tren dual, porque aunque en el tramo electrificado sus emisiones son inferiores a las del tren diésel, en el conjunto de la línea resultan superiores debido a su mayor masa por plaza.
5. A medida que aumenta el porcentaje de electrificación, las emisiones del tren dual decrecen proporcionalmente y resulta eficiente su utilización.
6. En cuanto al tren dual con turbina de gas, a partir del 50% de electrificación es más eficiente que el tren diésel y no es hasta el 85% del recorrido cuando tiene menores emisiones que el tren dual. En todos los casos sus emisiones son siempre superiores a las de la tracción eléctrica debido a su mayor masa.
7. En el caso de los viajeros, la ventaja no es sólo la reducción de las emisiones de CO₂ sino también la disminución del tiempo de viaje, al evitarse las operaciones de cambio de locomotora para el cambio de ancho y la entrada en tramos no electrificados. Se estima, por ejemplo, que el tiempo de viaje podría pasar de 8 horas y cuarto, con una composición remolcada, a 7 horas y 45 minutos con un tren autopulsado.

5. CONCLUSIONES

De lo expuesto pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. En el caso de mercancías, las emisiones del tren diésel son tres veces superiores a las de la tracción eléctrica. Sin embargo, en viajeros esta relación es la mitad debido a que el tren eléctrico se ha simulado a mayor velocidad.
2. Las emisiones de los trenes duales decrecen linealmente al aumentar el porcentaje del recorrido electrificado.
3. En el caso de trenes de viajeros de AV hay una notable diferencia de peso (para la misma capacidad) con el tren dual, por lo que las emisiones de éste sólo son menores a partir del 30% del recorrido electrificado e incluso para el 100% del recorrido electrificado son superiores a la tracción eléctrica
4. En tráfico de mercancías las emisiones del tren dual son siempre inferiores a las del diésel.

5. Aunque el tren dual de turbina de gas tiene una masa inferior a la del tren dual, su menor rendimiento hace que sólo a partir del 87% del recorrido con tracción eléctrica su uso sea más eficiente que el dual en régimen diésel.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer su colaboración a Luis E. Mesa por la elaboración del material gráfico, a José Luis López Gómez por sus aportaciones, y a Alberto García por su asesoramiento técnico y apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARCÍA ÁLVAREZ, A., MARTÍN CAÑIZARES, M.P. (2009). La electrificación ferroviaria cada vez más necesaria y eficiente. *Revista Anales de mecánica y electricidad*, mayo-junio 2009.

FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES e IDAE (2010). *Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril. *Revista Anales de mecánica y electricidad*, enero-febrero 2009.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Talgo prepara su prototipo. Habrá trenes de ancho variable a 300 km/h. *Vía Libre*, junio 2009.

Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones del transporte

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Este artículo, inédito, recoge las características principales del modelo de estimación de los consumos y emisiones de los diversos modos de transporte subyacente en el proyecto de investigación Enertrans, que tenía como objeto la estimación homogeneizada de los consumos y emisiones de los diferentes modos de transporte y la necesidad de medir la sensibilidad a diferentes variables.

Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones del transporte

Alberto García Álvarez

Director del Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

RESUMEN

En este artículo se presenta un modelo para estimar y comparar de forma homogénea el consumo de energía (y las emisiones asociadas) en diferentes modos y vehículos de transporte. El procedimiento de cálculo está orientado a medir la sensibilidad del consumo y de las emisiones a diversas variables que pueden ser objeto de una decisión técnica o regulatoria orientada a reducir el impacto medioambiental del transporte. También es apropiado para identificar las razones de las diferencias de consumo o de emisiones entre los vehículos o modos de transporte. Incluye una fórmula única de cálculo de consumo ajustada a los fenómenos físicos que no solo tiene en cuenta la masa del vehículo, sino también su tamaño; y se introduce el concepto de “parada equivalente por reducción de velocidad” que en muchos modos de transporte es fundamental pues explica una parte importante del consumo. Para permitir la homogeneización y comparación entre distintos tipos de vehículos y modos de transporte se define un conjunto de parámetros que se pueden aplicar con independencia unos de los otros, como la relación entre tamaño del vehículo y las plazas, y entre trayectoria y desplazamiento.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte en Europa y en el mundo es un consumidor intensivo de energía; emplea de forma mayoritaria energía procedente de fuentes fósiles en trance de agotamiento; produce una parte importante de las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero; y además es responsable de muy dañinas emisiones de diversos contaminantes tóxicos y que afectan a la calidad del aire, y por ello, a la salud de las personas.

El modelo de transporte actual ha sido calificado de no sostenible [1] y además sólo disfruta de él una pequeña parte de la población mundial, por lo que existe el riesgo cierto de que el problema, que hasta ahora no ha podido ser controlado, se extienda geográficamente y crezca en dimensión y gravedad.

No es preciso insistir en estos hechos, que son suficientemente conocidos, así como en que las perspectivas de agotamiento de las fuentes de energía que han sustentado el transporte en el último siglo han hecho que en todo el mundo se planteen acciones para reducir este consumo y emplear fuentes de energía alternativas.

Por ello, son muy numerosos los estudios de todo tipo que en cada uno de los modos de transporte (carretera, ferrocarril, aviación...) se realizan para analizar y corregir este problema. En estos análisis suelen compararse vehículos que corresponden a un mismo modo de transporte que tienen tecnologías, tamaños o prestaciones diversos. Son menos numerosos los estudios con un enfoque intermodal, porque la transferencia de tráfico de unos modos a otros o la diferenciación entre modos, suele sobrepasar el ámbito de decisión

técnico y situarse en el regulatorio o en el político. Ello hace que el enfoque de los modelos multimodales existentes esté más orientado al reparto de consumos globales (con propósitos macroeconómicos) y a la predicción (apoyada en valores medios obtenidos de la experiencia).

Sin embargo, hay ciertas decisiones que requieren disponer de modelos de cálculo de costes que, como se verá en la revisión del estado del arte, no siempre están al alcance de los decisores.

En muchos casos, las autoridades públicas necesitan saber, para la toma de decisiones macroeconómicas o para la selección de inversiones, cuáles serán los efectos de todo tipo (entre ellos, los energéticos y ambientales) de cada una de las alternativas posibles. Estas decisiones suponen optar entre los diversos modos de transporte (por ejemplo, al elegir entre construir carreteras o líneas de ferrocarril); e incluso -y a veces ello es más importante- la necesidad de escoger entre diversas tecnologías, vehículos o tipos de infraestructuras dentro del mismo modo de transporte (por ejemplo, al decidir entre construir una línea ferroviaria de alta velocidad o mejorar la existente).

En cualquiera de los casos, las decisiones de inversión en infraestructura deben estar apoyadas en estudios de costes sociales que precisan disponer de un procedimiento de cálculo de estos costes, incluyendo los de la energía y emisiones.

En otras ocasiones, la decisión es de carácter regulatorio. Por ejemplo cuando se estudia establecer limitaciones de velocidad, prohibir cierto tipo de motores, cambiar la fiscalidad de determinados vehículos, establecer mecanismos de cargo por derechos de emisión...

Finalmente, muchas veces se precisa poder anticipar y conocer los efectos macroeconómicos que pueden tener diversas decisiones técnicas.

A la vista de esta problemática, se ha considerado oportuno establecer un modelo de cálculo del consumo de energía y de emisiones de los diversos vehículos y modos de transporte que sea ajustable al propósito que se persiga en cada caso, y que permita adaptarlo a las circunstancias concretas del entorno en el que se plantea el problema. Así, por ejemplo, la metodología de INFRAES dentro del proyecto MEET (que se considera el modelo de referencia), ofrece resultados de emisiones por modos, pero ni los factores de emisiones de CO₂ en la generación de electricidad son los del caso español (que se diferencia bastante de la media europea); ni el “aprovechamiento” de los distintos modos de transporte en los diferentes tipos de servicio son los del sistema de transporte español.

Por ello, en el presente artículo; i) se analiza el estado del arte sobre la comparación intermodal de consumo de energía y emisiones de GEI; ii) ya dentro del modelo propuesto, en primer lugar se definen, a la vista de las carencias detectadas, las propiedades buscadas y criterios generales aplicados en el desarrollo del modelo propuesto; iii) en segundo lugar se define la función de consumo homogénea con sus inductores; y iv) en tercer lugar se proponen los criterios de homogeneización que se estiman necesarios como parte del modelo propuesto.

El modelo se centra en el transporte de pasajeros y mercancías con medios mecánicos, excluyéndose, por ello, los desplazamientos a pie, en bicicleta o, en general, en cualquier vehículo movido con motor de sangre. Sin embargo, en el presente artículo, por simplicidad expositiva, se hará referencia solo al transporte de viajeros.

2. ESTADO DEL ARTE

Son relativamente numerosos los estudios que en el ámbito europeo se han realizado para analizar de forma comparada el consumo de energía en unos casos y las emisiones en otros, de los diversos modos de transporte.

Merecen ser destacados el informe INFRAS-IWW (2000 y su actualización de 2004); el estudio MEET project (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport) resultado de la acción Cost 319 (Estimation of pollutant emissions from transport – Estimación de las emisiones contaminantes procedentes del transporte-), este estudio tiene su continuación con la acción Cost 346 (para vehículos pesados) y los estudios “Artemis” y “Particulates”[2].

Más recientemente (2008) ha sido publicado el “Handbook on estimation of external costs in the transport sector” [3] dentro de la acción IMPACT que persigue el estudio de las medias y políticas de internalización de todos los costes del transporte.

En el entorno español, los más importantes desarrollos se han realizado en el ámbito del transporte urbano, y entre ellos se puede destacar el estudio llevado a cabo dentro del Plan Director de Movilidad de la Región Metropolitana de Barcelona en la que se calculan consumos y costes externos. El Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid publicó (2003) la “Cuenta Económica y Socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros en la Comunidad de Madrid en 1996” incluyendo metodologías de cálculo para los costes sociales y ambientales.

Los cálculos de consumos energéticos y emisiones son utilizados en ocasiones para establecer políticas de ahorros energéticos y de imposición tarifaria de los distintos modos de transporte. Esto hace que algunos estudios analicen exclusivamente los costes concretos asociados a cada modo. En esta vertiente “monetarizada” de los consumos energéticos y de emisiones existen algunos estudios a nivel europeo, tales como el PETS (1999) que contiene un análisis de los costes marginales (evitables) del transporte; el proyecto europeo UNITE (Unification of accounts and marginal costs for Transport efficiency 1999-2002) analiza las externalidades de los distintos modos de transporte en especial el ferrocarril, el High level group on transport infrastructure costs, etc.

En el análisis de los diversos estudios que, con una u otra finalidad tratan los consumos de energía y emisiones cabe distinguir dos categorías claramente diferenciadas: aquellos que aplican las metodologías existentes para obtener unos datos, y aquellos otros que desarrollan las propias metodologías.

Los resultados que se recogen en los distintos estudios pueden agruparse en dos grandes categorías: resultados intermedios o resultados finales (cálculos de consumos y emisiones para un caso concreto). Entre los resultados intermedios se obtienen, por ejemplo los factores de emisión, la clasificación de los vehículos o el cálculo total de flotas (para un país, por ejemplo, España), etc. Entre los resultados finales se incluye la aplicación de la metodología a casos concretos.

El análisis de los consumos de energía y emisiones y su aplicación al análisis de política de transportes tiene un gran desarrollo debido a las políticas que se están aplicando para intentar frenar el cambio climático. En este sentido, se ha producido un cambio de tendencia ya que antes el principal objetivo era el cálculo de costes económicos.

Por último, en lo que se refiere a los modelos existentes para el cálculo de consumos y emisiones en el transporte, su complejidad es un factor negativo para su difusión y uso. Los usuarios finales de dichos modelos para la toma de decisiones políticas, se ven avocados a utilizar simplificaciones de los mismos o aplicaciones que en algunos casos no son exactas. Tan sólo se ha desarrollado de forma continuada el programa “Copert” (actualmente en su versión IV), para el modo ferroviario ahora está disponible el “Econtransit” (que también

incluye el análisis de algún otro modo de transporte tal y como es el modo marítimo fluvial) y el “Ecopassenger”.

A nivel europeo existen en la actualidad fuertes incentivos para desarrollar el cálculo de los consumos y emisiones en los distintos modos de transporte, aunque no existe una metodología estándar y así, algunos de los modelos (como el MEET) son considerados en muchos casos como un estándar.

El modo de transporte que comenzó a analizar los consumos y las emisiones es el modo “carretera” (por razones principalmente económicas en el caso de los operadores y por ser el modo, en principio, con una contaminación directamente percibida por los ciudadanos), el resto de los modos han sido desarrollados a partir de lo realizado para la carretera.

En lo que respecta al enfoque de los modelos, existen dos grandes grupos: a) el de los modelos “agregados”; y b) el de los modelos “desagregados”. Los primeros son normalmente utilizados para la ayuda a la toma de decisiones, principalmente de carácter político. Se encuentran importantes dificultades para realizar agregaciones sobre los modelos desagregados; y al revés, resulta difícil desagregar los resultados de los modelos agregados.

Los estudios realizados presentan importantes limitaciones como son las siguientes:

a) Los estudios analizados están dirigidos a la obtención de datos intermedios o resultados globales, pero no son aplicables (al menos directamente) a la medida de la sensibilidad de los resultados a los cambios de variables técnicas o regulatorias porque no contienen en su formulación las variables que reflejan los posibles cambios ya que olvidan los fundamentos de los fenómenos físicos subyacentes y por ello no proporciona una relación de causalidad adecuada.

b) En casi ninguno de ellos se encuentran referencia explícita (y en ninguno se proven coeficientes a aplicar por defecto) a la necesidad de corrección de las diferencias de consumos debidas a los distintos recorridos de los modos o vehículos de transporte entre los mismos puntos.

c) Los resultados se presentan normalmente por viajero.kilómetro, pero también en algunas casos por plaza.kilómetro o por vehículo.kilómetro, pero no resulta fácil pasar de un resultado a otro, pues las equivalencias están normalmente implícitas en el modelo.

c) Los modelos están orientados a un único propósito, o la obtención de un resultado concreto, ya sea final o intermedio. Por ello, resultan de difícil aplicación para otros propósitos diferentes de aquel para el que fue diseñado. Sin embargo, una parte importante de los resultados intermedios serían de aplicación para otros propósitos.

En particular, los modelos desarrollados en el proyecto MEET que se consideran la referencia por su profundidad y alcance, presentan (por su propia naturaleza y objetivos) algunos de estos problemas que hacen que no se idóneo para otro tipo de propósitos.

En concreto, y por lo que se refiere a la forma de cálculo de los consumos, aplica uno diferente para cada modo de transporte, lo que ya es una primera dificultad. No considera las diferencias de recorrido entre modos. Tomando como ejemplo el cálculo del consumo específico de los trenes (que es el caso más complejo), ajusta una función con datos de la realidad en función de la velocidad media (v_m) y de la distancia entre paradas (D_{pc}).

$$\frac{kJ}{t.km} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{kJ}{t.km} (v_m; D_{pc}) \right]_i$$

El ajuste de esta función ofrece diversos resultados según países. Así, por ejemplo, para los trenes alemanes de alta velocidad resulta:

$$\frac{kJ}{t.km} = 0,07 \times \frac{v_m^2}{\ln(D_{pc})} + 74$$

Y para los trenes franceses, también de alta velocidad, el valor obtenido es

$$\frac{kJ}{t.km} = 0,097 \times \frac{v_m^2}{\ln(D_{pc})} + 70$$

Obsérvese que al relacionar el consumo con la masa, en el caso concreto de los trenes de alta velocidad se está introduciendo un sesgo importante por dos razones: más del 85% del consumo de energía en estos trenes se debe a la resistencia aerodinámica al avance, que no está relacionada con la masa del tren, sino con su forma y tamaño; y -lo que es aún más importante- el consumo no crece linealmente con la masa -ni siquiera con el tamaño u forma- puesto que la resistencia de presión en cabeza y cola del tren (que explica alrededor de un 25% del consumo de energía) es independiente de la masa y del tamaño.

3. PROPIEDADES Y CRITERIOS GENERALES DEL MODELO PROPUESTO

A la vista del objetivo perseguido y del análisis del estado del arte, en el modelo propuesto se han buscado unas determinadas propiedades que han dado lugar a los criterios de desarrollo.

3.1 Propiedades del modelo

Para alcanzar los objetivos perseguidos y superar las limitaciones expuestas, el modelo desarrollado tiene las siguientes propiedades:

1. Es multipropósito; es decir, una vez construido el modelo y alcanzados los resultados intermedios, puede ser empleado para el apoyo a diversos tipos de decisiones, sin que sea preciso desarrollar otro modelo cuando se trate de utilizar los resultados para un nuevo propósito.
2. Permite la comparación de diversos modos de transporte, pero también de diferentes vehículos o de varios tipos de infraestructura o de servicio de un mismo modo de transporte.
3. Puede ofrecer resultados homogéneos, que tienen en cuenta todas las diferencias externas a cada modo de transporte que no son tenidas en cuenta en los modelos que persiguen la comparación intramodal.
4. Está desarrollado de forma acumulativa. Ello permite, para cada comparación, remontarse hasta el último punto común del ciclo de la energía para efectuar la comparación homogénea; y al revés, permite no tener que remontarse hasta muy lejos del transporte en dicha cadena, cuando se trata de comparar modos, vehículos o infraestructuras con muchas características comunes.
5. Puede adaptarse a las diferencias de los distintos entornos geográficos en los que puede desarrollarse la comparación. Se puede adecuar también a cambios a lo largo del tiempo en algunos de los factores externos o internos empleados.

6. Identifica los inductores comunes de los que depende el consumo de energía y las emisiones.
7. Permite el análisis por simulación de la sensibilidad de los resultados a cambios en cualquiera de las variables o de los parámetros empleados.

3.2 Criterios del modelo

El modelo se ha planteado con un enfoque *down-top*; es decir, se parte de los procesos físicos asociados al movimiento de los vehículos para deducir ellos los consumos y emisiones.

Se ha preferido esta metodología a la alternativa *top-down* que parte de los consumos producidos en la realidad y los “reparte” entre las unidades de transporte realizadas. Se entiende que este enfoque *down top* es más adecuado para la ayuda a la toma de decisiones, y que es necesario para que el modelo tenga las propiedades 1, 3, 6, 7 y 8 de las antes enunciadas. En efecto, aunque precisa de un ajuste para reflejar la realidad, permite comprender las razones últimas del consumo, y por ello, identificar mejor los inductores y priorizar las acciones para la reducción del consumo y emisiones.

Por el contrario, los enfoques de reparto (*top-down*) son más adecuados para el análisis estadístico y para las predicciones de futuro y de ámbito macroeconómico, en ausencia de cambios tecnológicos o de acciones de mejora. El enfoque propuesto se encuadra en los que Hidalgo (2005) llama “modelos ingenieriles”, sobre los que señala que “permiten una mayor desagregación por regiones y por fuentes de energía de la que es posible con otros tipos”[7].

El modelo emplea una función de consumo única para todos los modos de transporte y vehículos, que comparte las mismas variables. Solo así se pueden cumplir las propiedades 1, 2, 6 y 7 de las enunciadas. Así, se separa el trabajo de la línea generalizada de construir modelos por agregación de funciones de consumo diferentes para cada modo o submodo.

El modelo incluye todos los datos y variables necesarios, pero es parametrizable, de forma que puede cambiar su valor para adaptarse a un entorno geográfico o tecnológico distinto; para contemplar un cambio regulatorio u organizativo, o simplemente para simular un cambio en cualquiera de las variables relevantes.

El modelo permite que se pueda escoger la comparación de acuerdo con diversos resultados parciales o intermedios; o considerando (o despreciando), a elección del decisor, diversos consumos indirectos (esto es necesario para cumplir las propiedades 1, 2 y 3).

El modelo ofrece, como resultados para la comparación, las unidades consumidas o emitidas (por ejemplo, en kilos de CO₂, o kWh de energía primaria procedente del petróleo, o kWh de energía primaria fósil) por cada unidad de transporte realizado (entendiendo por unidad de transporte un viajero.kilómetro transportado).

3.3 Identificación de las diferencias de consumo entre dos modos o vehículo

Para un adecuado análisis de los resultados, el modelo está estructurado de forma que permita identificar las diferencias entre los resultados (consumos específicos) de dos modos o de dos vehículos o de dos infraestructuras. Cada una de estas diferencias para su análisis, se incluirá en alguno de los siguientes grupos:

1. Diferencias debidas al distinto consumo de energía final atribuibles a la tecnología de un modo de transporte o de un vehículo. (Diferente consumo en llanta rueda o ala, por kilómetro, de los vehículos que se comparan).
2. Diferencias que se deben a distintos rendimientos de los motores o desiguales pérdidas en la cadena de la energía desde el yacimiento o fuente primaria hasta su uso final.
3. Diferencias debidas a la eficiencia energética del tamaño, la forma o la masa del vehiculo; es decir, a las diferencias de metros cuadrados útiles o toneladas de capacidad en un vehículo de la misma masa, forma y tamaño.
4. Diferencias atribuibles a los diversos factores de homogenización: distinta densidad de plazas por metro cuadrado, diferente aprovechamiento, o índice de vacíos, o diferencias de recorrido entre los mismos puntos.

3.4 Función de consumo homogénea

El consumo absoluto C_{ABi} (kWh) de energía para el transporte de personas o de mercancías entre dos puntos A y B separados, en el modo de transporte i una distancia de L_{ABi} kilómetros incluye hasta tres sumandos básicos:

1. Aquellos consumos que se producen por el movimiento realizado, que pueden expresarse en función de la distancia recorrida i (L_{ABi}) como:

$$C_{MAB} = K_{mi} \times L_{ABi}$$

2. Aquellos otros consumos que se producen por el tiempo en que el vehículo está en orden de marcha (T_{ABi}), y que incluye tanto el tiempo de recorrido como el tiempo de las paradas inicial, final e intermedia:

$$C_{TAB} = K_{ti} \times T_{ABi}$$

3. Las pérdidas de energía en los procesos de transporte y transformación desde las fuentes primarias hasta su uso final. Estas pérdidas incluyen las de la extracción, transporte y refinado de derivados del petróleo; las de generación y transporte de electricidad, así como las pérdidas en el propio vehículo (rendimientos del motor, transmisión, reductores, etc.)

$$P_{TABi} = (K_{PWTT} - 1) \times [(K_{PTTWM} - 1) \times C_{MAB} + (K_{PTTW} - 1) \times C_{TAB}]$$

El consumo absoluto de energía primaria resultante de la suma de los tres sumandos expuestos se expresa por unidad de oferta homogénea (metros cuadrados útiles en el caso de los viajeros o toneladas de capacidad en el caso de las mercancías).

$$C_{ABi / km.S_{bu}} = \frac{C_{MABi} + C_{TABi} + P_{TABi}}{S_{bu}} \left(\frac{kHh}{S_{ub} \cdot km} \right)$$

3.5 Modelado del cálculo de la energía para el movimiento

Los vehículos de transporte necesitan para su movimiento una energía para vencer las que se denominan “resistencias al avance” y las inercias. Unas y otras tienen expresiones diversas en cada uno de los modos de transporte, pero en el caso más general la energía necesaria para el movimiento puede modelarse de forma común.

El modelo que se propone se aparta de la tendencia habitual de calcular el consumo de energía por integración de las fuerzas longitudinales que, instantáneamente, actúan sobre el vehículo. Por el contrario, se establece un modelo basado en el balance de energías que supone que la energía que entra al vehículo es igual a la que sale de él (más la que se pierde en el propio vehículo). La energía que sale del vehículo puede modelarse (en ausencia de diferencias de energía cinética y potencial en el conjunto del recorrido) como la suma del trabajo de las resistencias al avance y la energía disipada en los frenos. Este modelo tiene el inconveniente de que precisa ser ajustado y que requiere hacer algunas simplificaciones, pero ofrece la ventaja (especialmente útil para alcanzar los propósitos perseguidos) de que permite analizar efectos de cada una de las variables en el consumo final mejor que en los modelos de integración.

Por ello, el consumo se modela como la suma de:

a) Energía necesaria para vencer las resistencias mecánicas (que no existen en el modo marítimo y en el aéreo sólo en la fase de rodadura), que se pueden considerar proporcionales a la masa que se mueve. La constante de proporcionalidad es diferente para cada modo. En el caso del ferrocarril, esta resistencia incluye además, la resistencia específica en las curvas, que puede modelarse como un aumento del coeficiente específico de las resistencias mecánicas este coeficiente de aumento por curvas depende de la línea a recorrer (de la proporción de curva y de su radio) y de algunas características del vehículo.

b) Energía necesaria para vencer las resistencias aerodinámicas, que incluyen: i) la resistencia a la entrada de aire (que es proporcional a la velocidad media del vehículo mientras se mueve, a la densidad del aire y al volumen de aire que entra en el vehículo); ii) la resistencia aerodinámica de presión (proporcional al cuadrado de la velocidad, a la densidad del aire y al área de la sección transversal del vehículo); y iii) la resistencia de fricción, proporcional también al cuadrado de la velocidad instantánea, a la densidad del aire y al área de la piel del vehículo. En el caso de los gasoductos, son proporcionales al cuadrado de la velocidad y a la sección interior del conductor. Las resistencias aerodinámicas son especialmente altas en la aviación, gasoducto y tren de alta velocidad, y son reducidas en el caso de transporte urbano y los barcos.

c) Energía necesaria para vencer, en su caso, la resistencia hidrodinámica al avance, que es proporcional al cuadrado de la velocidad del barco o del fluido (en los oleoductos), y a la superficie de la obra viva de la nave y que solo es relevante en caso del transporte marítimo y en los oleoductos.

d) Además, es preciso añadir la energía disipada en el freno. Esta energía es proporcional a los incrementos de energía potencial (nulos en el caso del barco y muy relevantes en el caso de los aviones) y de energía cinética, especialmente importante en el caso de los servicios de transporte con paradas frecuentes. Las variaciones de energía cinética se deben en su mayor parte a las paradas (lo que es recogido adecuadamente por los modelos vigentes, como el del proyecto MEET) pero también a las reducciones de velocidad por limitaciones, señales que ordenan parada, etc. Este sumando no está recogido en los modelos habituales, y en el modelo propuesto se recoge a través del concepto de “Parada equivalente por reducción de velocidad” siendo el número de paradas equivalentes de una reducción de

Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones del transporte

velocidad de la velocidad inicial (que se supone la velocidad máxima V_{max} a la velocidad final V_f) la siguiente:

$$D_{pe} = \frac{L_{ABi}}{P_c + \sum_{r=a}^z \frac{V_{max}^2 - V_f^2}{V_{max}^2}}$$

en lugar de la distancia entre paradas comerciales

$$D_{pc} = \frac{L_{ABi}}{P_c}$$

que subyace en el modelo MEET

e) En ciertos casos (como los ferrocarriles eléctricos con freno regenerativo y en los coches híbridos), una parte de la energía disipada en el freno puede convertirse en energía eléctrica y aprovecharse (e incluso devolverse al red) por lo que, en estos casos, debe ser considerado un cuarto sumando (de signo negativo) para el cálculo de la energía necesaria para el movimiento. Este hecho no es tenido en cuenta en el modelo MEET ni en ningún otro de los analizados.

El modelo tiene (siendo Sub la superficie útil bruta del tren empleable para los viajeros) la siguiente forma matemática:

$$\frac{kWh}{S_{ub}.km} = k_1 \times \frac{M}{S_{ub}} + k_2 \times \left[\frac{M + Mr}{S_{ub}} \times \frac{1}{D_{pe}} \times V^2 \right] \times (1 - K_r) + \frac{S_{tren}}{S_{ub}} \times V^2 + k_3$$

Donde M/Sub y $Stren/Sub$ expresan, respectivamente, la masa del tren por unidad de superficie útil para los viajeros y las mercancías y la superficie equivalente exterior del tren (piel) también por unidad de superficie útil. Es importante esta distinción, porque (a diferencia de lo que subyace en el modelo de MEET) el consumo de energía depende mucho del tamaño del tren, no solo de su masa. Al emplear únicamente el indicador de la masa por plaza se está introduciendo una desviación importante por ejemplo en los trenes de dos pisos en los que la masa es poco mayor que los trenes de un piso, pero las plazas son casi el doble.

En cuanto a la energía consumida por los servicios auxiliares (que se calcula por tiempo de utilización), se puede suponer que en la mayor parte es la necesaria (en su caso) para la climatización y aire acondicionado, debiendo añadirse una pequeña cantidad para la iluminación y otros servicios auxiliares. La energía necesaria para la climatización se considera proporcional al coeficiente de disipación térmica del vehículo, a la superficie del área que rodea la zona climatizada y a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior.

El esquema general de los consumos en cada modo de transporte es el recogido en la tabla.

		Carretera	Ferrocarril	Ferrocarril diesel	Avión	Barco	Gasoducto	Oleoducto
Energía primaria	Energía a la entrada de central o refinería							
	Energía a las alturas de central o refinería							
	Energía suministrada al vehículo							
	Energía para el movimiento							
	Energía para vencer resistencia mecánica al avance (M)							
	Energía para vencer resistencia aerodinámica al avance (V ²)							
	Energía para vencer resistencia entrada de aire (V)							
	Energía para vencer resistencia hidrodinámica al avance (V ²)							
	Energía perdida en freno para bajar pendientes (M)							
	Possibilidad de aprovechamiento parcial de la energía freno bajada							
	Energía perdida en el freno para decelerar (M+Mr)							
	Possibilidad aprovechamiento parcial energía freno deceleración							
	Energía consumo servicios auxiliares (horas)							
	Pérdidas en el vehículo							
	Pérdidas hasta el vehículo							
Pérdidas en generación electricidad o refino								
Pérdidas antes de la central de generación o refinería								

Homogenización de los resultados

El consumo de un vehículo en un kilómetro de recorrido por unidad de superficie disponible ($kWh/S_{ub}.km_i$) no es directamente comparable con otros vehículos u otros modos de transporte por diversas razones:

1. Porque los vehículos pueden tener muy diferentes capacidades y coeficientes estructurales de uso (aprovechamiento). Por lo tanto, para un mismo consumo por kilómetro, pueden ser diferentes el consumo por plaza.kilómetro o por viajero.kilómetro. Además, se observan “economías de tamaño” en el consumo de energía de todos los modos. Se homogeneiza, por ello, el consumo para expresarlo por unidad transportada, lo que resulta necesario pues en ocasiones las diferencias de consumo por unidad transportada obedecen a distintas configuraciones de los vehículos que distorsionan los fenómenos físicos o a diferentes factores de aprovechamiento. El modelo ofrece la posibilidad de obtener resultados en cascada: Consumo kilométrico por unidad de superficie disponible; por unidad de capacidad estándar (P_{est}); por unidad de capacidad real (p_{reales}); o por unidad transportada (*viajeros*, v). De esta forma se puede emplear el indicador pertinente para cada análisis, pero con un alto grado de homogeneidad entre los diversos modos de transporte.

$$\frac{kWh}{v.km_i} = \frac{kWh}{S_{ub} \times km_i} \times \frac{S_{ub}}{P_{equiv}} \times \frac{P_{equiv}}{P_{reales}} \times \frac{1}{A_{prov} \left(\frac{v.km_i}{P_{reales}.km_i} \right)}$$

2. Porque los recorridos para realizar el mismo desplazamiento entre dos puntos son diferentes entre los diversos modos de transporte (los modos se designan con el subíndice i) y vehículos de transporte. El enfoque global adoptado permite analizar el consumo desde el punto de vista de la movilidad, lo que es especialmente relevante si se tiene en cuenta que, para un mismo desplazamiento, en cada modo de transporte se siguen trayectorias de longitud muy diferente (longitud diversa del propio camino, planteamientos logísticos, diferente necesidad de recorridos en vacío, etc.). Por ello, el conocimiento y uso homogeneizador de los cocientes entre desplazamiento y trayectoria (llamados “coeficientes de trayectoria”, CT_i) es una novedad relevante del trabajo que no se encuentra en muchos otros estudios, que comparan exclusivamente los consumos de cada modo con la longitud de su propia trayectoria. El modelo permite pasar de la distancia propia de cada modo (km_i) a la distancia ortodrómica entre origen y destino (km_o) que es común para todos los modos de transporte.

$$\frac{kWh}{v.km_o} = \frac{kWh}{v.km_i} \times CT \left(\frac{km_i}{km_o} \right)$$

3. Porque los recorridos para realizar el servicio comercial (con recorridos km_c) precisas recorridos en vacío diferentes según los modos de transporte (las diferencias no son muy relevantes en el transporte de viajeros, aunque existen; pero sí lo son en el de mercancías, donde los recorridos en vacío puede llegar hasta el 50% de los recorridos totales (km_i)).

$$\frac{kWh}{vkm_{ot}} = \frac{kWh}{v.km_{oc}} \times \frac{km_c}{km_i}$$

4. Finalmente, porque al ser diferente el tipo de energía empleada, el combustible, las pérdidas y emisiones que se producen antes de la llegada al vehículo son muy diferentes. Ello exige una corrección si se quiere tener en cuenta la globalidad del proceso. Los resultados del modelo (que pueden ser, a elección del decisor, por ejemplo, emisiones de CO_2 , consumo de energía primaria de origen fósil, o de energía procedente del petróleo, etc.) incluyen estas diferencias, pudiendo adaptarse los coeficientes específicos a las

circunstancias concretas de cada país y momento temporal, lo que es especialmente relevante en la tracción eléctrica.

Por ejemplo, para las emisiones de CO₂:

$$\frac{kgCO_2}{v.kmot} = \frac{kWh}{v.km_{ot}} \times FE_{cpa} \left(\frac{kgCO_2}{Kwh} \right)$$

Donde FE_{cpa} es el factor de emisiones que depende del combustible o vector energético empleado y en el caso de la electricidad, además, del país y del año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PEREZ ARRIAGA, I., PILO, E., LOPEZ DEL HIERRO, I.: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”. Monografías EnerTrans 1. Ed.: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Infras (1998): “Intermodal comparisons of atmospheric pollutant emissions“, dentro de MEET project

COST (1996): Working Group A3 on heavy duty vehicle emissions: notes on a meeting in Cologne on 7 May 1996. Management Committee of the COST Action 319. European Commission, DG VII, EUCO-COST/319/6/96, Brussels. [COST]

INFRAS (1995): Workbook / Handbook on emission factors for road transport, version 1.1. INFRAS, Bern, Umweltbundesamt, Berlin, and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

SAMARAS Z., N. KYRIAKIS, R. JOURMANRD, M. ANDRÉ, E. SÉRIÉ, D. HASSEL, F.J. WEBER, A.J.HICKMAN, R. RIJEBOERr, P. STURM, S. SORENSON, C.A. LEWIS, E. BECKMAN, C. TROZZI, R.VACACCARO & M. KALIVODA (1998a): Methodologies for estimating air pollution from transport - Emission factors and traffic characteristics data set. LAT report, n°9802, Thessaloniki, Greece, 193 p. [MEET]

ZACHARIADID T. (1995): Comparison of microscale and macroscale traffic Emission estimation tools: DGV, COPERT and KEMIS. Laboratory of Applied Thermodynamics, report 9508, Thessaloniki, Greece, 40p. [COST]

HIDALGO. I. (2005): “Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: descripción y aplicaciones del modelo”. Revista de economía mundial 13, 2005, 33-75

JORGENSEN M.W. , S.C. SORENSON (1997): “Estimating emission from railway traffic”. DTU report, n°ET-EO-97-03, Dept of Energy Eng., Lyngby, Denmark, 135 p. Sorenson's email : spencer.sorenson@et.dtu.dk

**PARTE III.
MEMORIA DE
PUBLICACIONES,
CONGRESOS
CONFERENCIAS, Y
ACTIVIDADES DE DOCENCIA**

Curso 2009-2010

Reseña de publicaciones: libros, capítulo de libros y papers en revistas de impacto

2009 - 2010

A lo largo del curso académico 2009-2010 se han publicado diversos libros, capítulos de libros o papers en revistas de impacto que se reseñan a continuación:

Libros:

- *García Álvarez, A., Barrón de Angoiti, I., Puente Domínguez, F., Martín Cañizares, M^a del P.: **La alta velocidad en España, Líneas y trenes**, editado por Vía Libre, Fundación de los Ferrocarriles Españoles.*
- *García Álvarez, A., (2009): **Cambio automático de ancho de vía de los trenes en España**, editado por Vía Libre, Fundación de los Ferrocarriles Españoles.*
- *Comisión de Estudio del Tren de Alta Velocidad de Japón (2009): **Shinkansen, El tren de alta velocidad en Japón. Tecnología y efecto social**, editado por Vía Libre, Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Revisión y adaptación de la traducción, así como la edición por el Grupo de estudios e investigación de economía y explotación del transporte.*
- *Colaboración de Rallo, V., en el Capítulo 7: **El futuro transporte de mercancías en acción y coordinación de García Álvarez, A., del capítulo 9: La marcha acelerada hacia las nuevas estructuras del transporte**. Real Academia de Ingeniería, coordinadores Pérez Arriaga, I., Moreno Romero, A., Capítulos del libro **La contribución de las TIC a la sostenibilidad del transporte en España**.*
- *Colaboración de Pilo de la Fuente, E., Fernández Cardador, A., Cucala García, P., en el Capítulo de **Transporte y desarrollo sostenible. Planteamientos energéticos del transporte en acción y coordinación de García Álvarez, A.** ICAI. Capítulo del libro **El ingeniero del ICAI y el Desarrollo Sostenible**.*
- *Martín Cañizares, M^a del P. **Eficiencia energética y emisiones en el transporte**. Capítulo del libro **Transporte sostenible**, editado por la Fundación CONAMA con motivo del Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 10.*

Papers en revistas de impacto:

- *García Álvarez, A., (2010): **The energy consumption and emission of high speed train**. Transportation research board of The National Academies (nº2159).*
- *García Álvarez, A., Martín Cañizares, M. P. (2009): **La electrificación ferroviaria cada vez más necesaria y eficiente**. *Anales de mecánica y electricidad* (mayo-junio 2009)*
- *López, I., Rodríguez, J., Burón, J.M., García, A. (2010) **A methodology for evaluating environmental impacts of railway freight transportation policies**. *Energy Policy* (Ref JEPO3672)*

Conferencias pronunciadas en el curso académico 2009 - 2010

Durante el curso académico se han impartido conferencias en centros de enseñanza reglada que se relacionan a continuación:

- *García Álvarez, A., Paradojas y curiosidades de la alta velocidad ferroviaria (Miranda de Ebro, 31 de mayo de 2010)*
- *García Álvarez, A., Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias. Objetivos y beneficios esperados del proyecto (Madrid, 3 de febrero de 2010)*
- *García Álvarez, A., Cambiadores de ancho de vía: la innovación para hacer más competitivo al ferrocarril (Vilanova i la Geltrú, 16 de noviembre de 2009)*
- *García Álvarez, A., Paradojas de la alta velocidad (Burgos, 10 de noviembre de 2009)*
- *García Álvarez, A., Introducción a los sistemas automáticos de cambio de ancho de vía (Barcelona, 28 de octubre de 2009)*
- *García Álvarez, A., Energy for high speed (Patras-Ancona, 27 de octubre de 2009)*

Ponencias presentadas en congresos

2009 - 2010

Durante el curso académico se han pronunciado las ponencias que se relacionan a continuación:

- *García Álvarez, A., Tendencias en la arquitectura de los trenes de alta velocidad (Córdoba, 18 de junio de 2010)*
- *García Álvarez, A., Requerimientos desde el punto de vista de la explotación, del tráfico mixto de trenes de alta velocidad y de mercancías convencionales (Córdoba, 16 de junio 2010)*
- *García Álvarez, A., Efectos de la arquitectura de los trenes en el consumo de energía y emisiones (Vilanova i la Geltrú, 14 de junio 2010)*
- *Martín Cañizares, M de P; González Franco, I, Análisis comparativo del consumo de energía y emisiones de trenes eléctricos, diesel y duales (Zaragoza, 12 de abril de 2010)*
- *García Álvarez, A., Incidencia del tamaño y arquitectura de los trenes de viajeros en su consumo de energía y costes de explotación (V Congreso de Innovación Ferroviaria, Gijón, Febrero de 2009)*
- *Arranz Peña, L. y García Álvarez, A., Evolución de la funcionalidad, desde el punto de vista de la explotación, de los cambiadores automáticos de ancho de vía para trenes de viajeros. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 9 de julio de 2010)*
- *Cillero Hernández, A. García Álvarez, A., Ramos Melero, R., Desarrollo de un modelo de regulación optimizado para la apertura del mercados de servicios interurbanos de transporte de viajeros por ferrocarril en España. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 9 de julio de 2010)*
- *García Álvarez, A., González Franco, I. y Martín Cañizares, M.P., Influencia de la arquitectura y el tamaño de los trenes en sus costes operativos y su consumo de energía. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 8 de julio de 2010)*
- *González Franco, I., García Álvarez, A., Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y en el confort de los viajeros. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 8 de julio de 2010)*
- *González Franco, I. y Martín Cañizares, M.P., Trenes duales diesel y eléctricos para la eficiencia energética: Comparativa y análisis de eficiencia. Sistemas y Nuevas Tecnologías en Ferrocarril para el Ahorro Energético. (Madrid, 19 de octubre de 2010)*
- *Luceño Ramos, B. y García Álvarez, A., Relación entre el precio básico medio del billete de tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 8 de julio de 2010)*
- *Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A., Análisis del consumo de energía de los trenes de mercancías. III Jornadas, Estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario. (Vilanova i la Geltrú, 14 de junio de 2010)*
- *Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A., Caracterización de los perfiles operaciones del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos". IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 8 de julio de 2010)*
- *Ramos Melero, R., García Álvarez, A., Cillero Hernández, A., Principales aspectos a considerar para el desarrollo del marco regulador para la apertura a la competencia del transporte interurbano de viajeros por ferrocarril en España. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. (Madrid, 9 de julio de 2010)*

Clases impartidas en centros de enseñanza reglada en el curso académico 2009 - 2010

Durante el curso académico 2009 - 2010 se han impartido clases en centros de enseñanza reglada que se relacionan a continuación:

- *García Álvarez, A., **Conceptos generales ferroviarios**. Curso de seguridad de Renfe y actuaciones en situaciones de emergencia (23 de octubre de 2010). Duración: 3 horas.*
- *García Álvarez, A., **Energy consumption and emissions of high speed trains**. Curso de alta velocidad UIC (París, 3 de Julio de 2010). Duración: 1hora.*
- *García Álvarez, A., **Gestión de la energía en el ferrocarril**. Máster Universitario en sistemas ferroviarios (Madrid, mayo-junio de 2010). Duración: 30 horas.*
- *García Álvarez, A., **La explotación comercial de la alta velocidad en España**. Curso de Especialização em alta velocidade ferroviária del FUNDEC Instituto Superior Técnico (Lisboa, 28 de mayo de 2010). Duración: 2 horas.*
- *García Álvarez, A., **Economía de la explotación de los servicios de viajeros**. Curso de Economía de los servicios de viajeros por ISDEFE (Madrid, 27 de abril de 2010) Duración: 3 horas.*
- *García Álvarez, A., **Geografía ferroviaria de España**. Curso de Economía de los servicios de viajeros por ISDEFE (Madrid, 26 de abril de 2010). Duración 3 horas.*
- *García Álvarez, A., **Economía y regulación del transporte por ferrocarril**. Máster Transporte y Gestión Logística de la Universidad de Oviedo (Oviedo, marzo de 2010). Duración 8 horas*
- *García Álvarez, A., **Optimización energética del ferrocarril disminuir el consumo; Aprovechamiento de la energía residual; Conexión de redes y redes inteligentes**. Seminario específico de Eficiencia energética en el transporte ferroviario de IIR España (Madrid, 24 y 25 de febrero de 2010). Duración: 4 horas.*
- *García Álvarez, A., **El ferrocarril y la sostenibilidad, Afcción medioambiental y rendimiento energético**. Escola Europea de Short Sea Shipping (Gijón- Santander, 21 de febrero de 2010). Duración: 2 horas.*
- *García Álvarez, A., **Gestión de la energía en el ferrocarril**. Máster en Ferrocarriles y Transporte Ferroviario de la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, 31 de octubre de 2009). Duración: 5 horas*
- *García Álvarez, A., **Diseño de líneas y estaciones ferroviarias de larga y media distancia**. Curso de Experto Universitario en Ingeniería Ferroviaria de la UNED (Madrid, 15 de febrero de 2010).*
- *García Álvarez, A., **Transporte y desarrollo sostenible. Especial referencia al ferrocarril eléctrico como modelo y presencia de energías renovables en el transporte**. Máster en Enerxías Renovables e Sustentabilidade Enerxética de la Universidad de Santiago de Compostela (Santiago de Compostela, 27 de noviembre de 2009). Duración: 4 horas.*
- *García Álvarez, A., **Energía y trazado ferroviario**. Curso sobre Diseño de Ferrocarriles (Madrid, 19 de noviembre de 2009). Duración: 4 horas.*

- *García Álvarez, A., **Electrificación y diseño de líneas.** Curso sobre Diseño de Ferrocarriles (Madrid, 18 de noviembre de 2009). Duración 4 horas.*
- *García Álvarez, A., **El ferrocarril como sistema a través de problemas concretos.** Universidad Politécnica de Catalunya (Barcelona, 14 de abril de 2009). Duración: 3 horas.*