
Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros ⁽¹⁾

A methodology to standardize energy consumption and emissions from trains

Alberto García Álvarez (Director)
M^a de Pilar Martín Cañizares
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Resumen

En este artículo se presenta una metodología para la evaluación y estandarización de los consumos de energía y emisiones de los trenes de viajeros, que forma parte de un estudio más amplio en el que los autores, junto con otros investigadores, desarrollan para cuantificar, objetivar y comparar distintas características del material móvil ferroviario tales como la habitabilidad, el consumo o la accesibilidad². Como resultado de este trabajo, se obtendrán procedimientos que permitan establecer, para un determinado tren y servicio, sus consumos energéticos y emisiones, así como un "etiquetado" de eficiencia energética.

Este sistema, similar al ya existente para los automóviles o electrodomésticos, permitirá a los operadores de transporte ferroviario o a las autoridades públicas que licitan concursos de servicios, seleccionar los trenes energéticamente más eficientes de acuerdo con unos índices objetivos, o al menos fijar unos consumos máximos. Por lo tanto, fabricantes y diseñadores de material móvil ferroviario tendrán un estímulo para reducir el consumo y así lograr una posición competitiva en el mercado, además de la mejora de la imagen que supondría el lograr una buena calificación energética.

This paper presents a methodology to standardize energy consumption and emissions from trains, and it's a part of a more extensive research that the author and other researchers are developing to quantify, objectify and compare several features of rail vehicles like habitability, energy consumption or accessibility.

Methods to establish energy consumption and emissions for a specific train and use would be obtain as a result of this research as well as a label to indicate the energy efficiency level of each train for different uses.

This system, similar to existing one for cars, will allow to railway operators to select the most efficient train according to an objective rate. Therefore, this tool will incentive manufacturers and designers of rail vehicles to reduce energy consumption and thus achieve a competitive position in the market.

Palabras clave Ferrocarriles, explotación del transporte, eficiencia energética, estandarización.

¹ Este artículo está basado en la comunicación presentada por Alberto García Álvarez en el III Congreso de Innovación Ferroviaria, celebrado en Tenerife, en mayo de 2007. El texto de la comunicación publicada en el libro de actas está limitado por la extensión máxima permitida y cerrado en la fecha de admisión de las comunicaciones del Congreso (10 de abril de 2007). Como se trata de una investigación en curso, este artículo presenta una versión más completa y actualizada.

² El proyecto de investigación en curso se titula "Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros", siendo los autores Alberto García Álvarez (Director), Alberto Cillero Hernández, Rodolfo Ramos Melero, Fernando Puente Domínguez y M^a del Pilar Martín Cañizares.

1. Introducción

Introduction

Las cuestiones relacionadas con el uso de energía están entre las más relevantes desde el punto de vista económico y social en las sociedades modernas. En el sector del transporte se produce un consumo de energía especialmente intensivo, creciente y singularmente perjudicial para el medio ambiente.

La situación se agrava por el hecho de que este modelo de transporte (supuestamente "desarrollado", pero intensivo en uso de energía y agresivo con el medio ambiente) sólo es accesible a una pequeña parte de la población mundial.

Ello lleva a calificar el modelo energético de transporte como "insostenible" y a plantearse la necesidad de su modificación. El necesario cambio requiere el conocimiento profundo de la relación entre los procesos de transporte y consumo de energía.

A esto se une que el ferrocarril no ha mejorado sensiblemente en los últimos años su eficiencia energética, o al menos no lo ha hecho en la misma medida que otros modos de transporte. En efecto, probablemente el menor peso que la factura energética tiene en su cuenta de resultados (del orden del 10% de los costes frente a los valores habituales del 30 al 40% en otros modos de transporte), así como la seguridad que da el ser percibido como el modo de transporte más eficiente, han hecho que en el ferrocarril los esfuerzos (y los resultados) hayan sido menos brillantes que en otros modos de transporte. El mantenimiento de la masa por plaza en valores del orden de 1.000 kg en trenes para servicios interurbanos, el aumento de los consumos de los servicios auxiliares o la disminución del número de pasajeros por tren en servicios interurbanos (que aleja al tren de su punto de funcionamiento óptimo que es con alta densidad) han compensado las mejoras alcanzadas en materia de rendimientos.

1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es definir un método homogéneo y comúnmente aceptable para atribuir a cada tren, en uno o en varios tipos de servicio, sus consumos de energía y las emisiones de CO₂ asociadas.

Este método permitirá a los operadores de transporte ferroviario y a las autoridades públicas, seleccionar los trenes energéti-

camente más eficientes de acuerdo con unos índices objetivos, así como especificar en los pliegos de condiciones para la adquisición de nuevos trenes o licitación de servicios, el consumo o emisiones máximas que aceptan.

Con esta herramienta, diseñadores y fabricantes de material móvil ferroviario tendrán un estímulo para reducir el consumo y así lograr una posición competitiva en el mercado. Asimismo, podrán mejorar la imagen de sus productos ante la sociedad y los compradores, al poder comunicar de forma fiable y creíble las mejoras conseguidas en este campo.

1.2 Antecedentes

En los últimos años se han intensificado las medidas de ahorro y eficiencia energética, dando lugar a planes de acción y normativas en diversos sectores tales como la fabricación de bienes de equipo, el transporte, la edificación, los servicios públicos o la agricultura y pesca. Entre dichas medidas cabe destacar las destinadas a informar a los consumidores sobre el consumo de energía y emisiones de CO₂ a través de etiquetado, carteles, etc.

En el sector de los transportes solamente existe una metodología para homologación de consumos y clasificación energética, que es la aplicable a los vehículos turismos. Esta metodología se expondrá a continuación de manera resumida, dada la similitud con el objeto de este estudio.

En el sector ferroviario no existe un indicador de consumo y emisiones, pero los fabricantes pueden suministrar datos (curva de resistencia al avance, masa, masas rotativas y rendimientos) que permiten calcularlos indirectamente. El problema surge de la diversidad de métodos empleados para dichos cálculos: en unos casos son realizados a partir de datos teóricos y en otros a partir de datos contrastados; en ocasiones se realizan ensayos reales y otras veces simplemente cálculos teóricos; asimismo, el consumo se puede referir a un recorrido concreto completo o a la media de varios recorridos realizados por el tren. Esta variabilidad de metodologías no permite establecer comparaciones homogéneas.

1.3 Consumo homologado y clases de eficiencia energética en el automóvil

El 13 de diciembre de 1999 se publicó la Directiva 1999/94/CE que tiene por objeto informar sobre el consumo de carburante y

las emisiones de CO₂ de los turismos nuevos, para que los futuros compradores consideren la adquisición de los coches más eficientes energéticamente. Esta Directiva establece que la información sobre el consumo oficial de carburante y las emisiones de CO₂ se suministre a través de etiquetas, una guía y carteles e impresos de promoción.

Posteriormente, el 2 de agosto de 2002 promulgó el Real Decreto 837/2002 que incorpora la Directiva sobre etiquetado energético al ordenamiento jurídico español y tiene por objeto garantizar que se proporcione a los consumidores información relativa al consumo de combustible y a las emisiones de CO₂ de los turismos nuevos que se pongan a la venta en el territorio español.

Consumo homologado

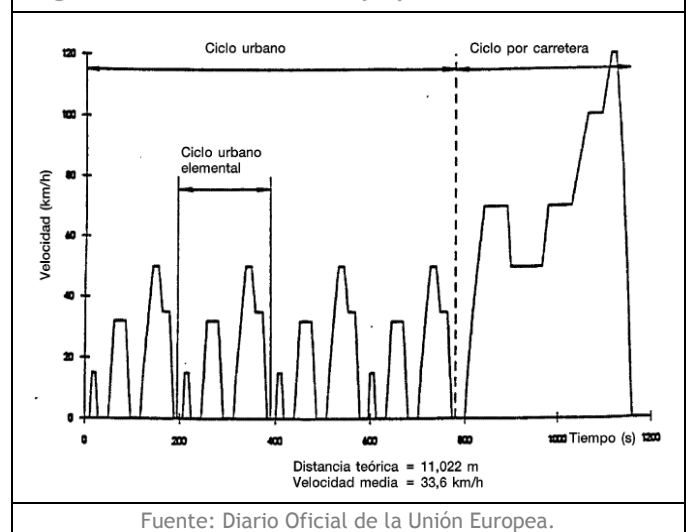
Las disposiciones legales antes mencionadas se cumplen con la realización de una medición objetiva de las emisiones y el consumo de carburante, regulada por el reglamento 101 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE/ONU), que establece unas prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos particulares de pasajeros equipados con un motor de combustión interna en lo que concierne a la medida de la emisión de dióxido de carbono y del consumo de carburante de los vehículos de las categorías M1 y N1 equipados con un grupo motorpropulsor eléctrico en lo que concierne a la medida del consumo de energía eléctrica y de la autonomía.

En las pruebas de homologación, todos los vehículos deben ser evaluados bajo las mismas condiciones y supuestos, por lo que las mediciones se hacen en un banco de ensayos en un local cerrado en el que se simulan las condiciones de marcha real del vehículo.

La prueba se compone de dos ciclos principales: un ciclo urbano, compuesto a su vez por cuatro ciclos elementales de 195 segundos y un ciclo por carretera. El consumo en ciclo mixto se calcula como: (0,368 x consumo urbano) + (0,632 x consumo en carretera)

Mediante este procedimiento se obtiene el consumo y emisiones de cada vehículo (en litros por 100 kilómetros).

Figura 1. Secuencia de ensayo para vehículos turismo



Clases de eficiencia energética

A partir de este consumo de distintos vehículos se calcula el consumo medio de los turismos de tamaño similar (el tamaño se mide por la superficie en planta) para motores de gasolina y gasóleo, resultando las siguientes ecuaciones para la curva de ajuste:

- Media de consumo para vehículos de gasolina = $a \times e^{(b \cdot S)}$
- Media de consumo para vehículos de gasóleo = $a' \times e^{(b' \cdot S)}$

Siendo S la superficie en metros cuadrados del vehículo $e=2,7183$, $a=2,366$, $b=0,1751$, $a'=1,786$, $b'=0,1669$.

En función de las desviaciones respecto al consumo medio se establecen las *clases de eficiencia energética* que han de figurar en la *etiqueta energética* según se muestra en la siguiente tabla:

2. Aspectos generales sobre la evaluación y homologación del consumo energético y emisiones en los trenes

General aspects about evaluation and homologation of energy consumption and emissions in trains

Se trata en este proyecto de definir unos indicadores absolutos y específicos de consumo y emisiones, así como una clasificación de eficiencia energética de cada tren.

2.1 Tipos de indicadores

Los indicadores que se construirán deberán tener las propiedades que se indican seguidamente.

Indicadores absolutos

Los *indicadores absolutos* serán de tipo numérico y expresarán el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por cada kilómetro recorrido por el tren.

Las *unidades de consumo absoluto* que se emplearán son litros de gasoil suministrados al vehículo en el caso de tracción diesel; y los kWh de energía primaria suministrada al sistema de generación de electricidad en el caso de la tracción eléctrica.

Las emisiones de CO₂ absolutas se medirán en gramos de CO₂ emitidos (en el vehículo o en la generación de electricidad) por cada kilómetro recorrido por el tren.

Los indicadores se podrán utilizar para comparar trenes eléctricos con trenes diesel e incluso con automóviles. La equivalencia a emplear, en su caso, entre los litros de gasóleo y los kWh es: 1 litro de gasóleo = 10,6 kWh

Indicadores específicos

El *indicador absoluto* no da una medida de la eficiencia real del vehículo, puesto que, así como en los automóviles la capacidad es similar en unos y otros modelos, en los trenes existe mucha dispersión. Por ello, es conveniente definir, además de los indicadores absolutos, unos *indicadores específicos*, que son el resultado de dividir el valor de los indicadores absolutos de consumo y de emisiones por la capacidad del tren.

Como unidad de capacidad no se utilizará (salvo que en algún caso concreto sea preferible hacerlo así) el número de plazas reales del tren, puesto que podría alterarse el resultado si varía, en un mismo tren, la calidad de las plazas ofertadas (por ejemplo, cambiando el espacio entre asientos).

Por ello, se empleará normalmente una *capacidad estándar* (medida en *plazas estándar*), que se calcula multiplicando la *superficie útil bruta del tren* (definida como la superficie total menos la correspondiente a equipos técnicos, cabinas de conducción, cabezas tractoras...) por un *Índice de densidad de plazas y servicios* (D_{ps}) que depende del tipo de servicio.

De esta forma, se podrían llegar a establecer tres indicadores "en cadena" con la

ventaja de que se separan los efectos de las decisiones que subyacen en cada uno de los factores, y que son responsabilidad de actores diferentes:

- El *consumo por plaza estándar*, es consecuencia directa de la arquitectura del tren, de su rendimiento y de su concepción; por lo que la mayor responsabilidad en este indicador se sitúa en los diseñadores técnicos del tren (típicamente, el fabricante o tecnólogo del tren).

- El *consumo por plaza real* se obtiene al multiplicar el *consumo por plaza estándar* por el *cociente entre las plazas estándar y las plazas reales*. Este cociente (*plazas estándar / plazas reales*) es responsabilidad de quien decide sobre el diseño comercial del tren (normalmente es el operador del servicio), ya que se ve afectado por decisiones como en número de clases, la distancia entre asientos, si hay o no cafetería, número y dimensión de los aseos, si es preciso espacio para galleys, etc.

- El *consumo por viajero kilómetro* se obtiene al multiplicar el consumo por plaza real por el *aprovechamiento* (medido éste como los *viajeros.km / plaza.km*). El aprovechamiento es consecuencia de decisiones de programación operativa del servicio: la decisión adoptada entre frecuencia y aprovechamiento, la decisión de reforzar o no reforzar los servicios en día punta, de programar más o menos paradas...; y por ello tiene poco que ver con el diseño del tren.

En el presente trabajo se emplea el primero de los tres indicadores (consumo/plaza estándar) ya que es el más relacionado con la tecnología y tipo de tren, y el que es más rígido a largo plazo. Con los indicadores de *plazas estándar / plazas reales* y *aprovechamiento*, que son muy sencillos de calcular, se pueden obtener, para un caso concreto, si así se desea, los consumos por plaza real y por viajero.km.

De esta forma, al emplear indicadores desagregados, se puede conocer con mayor detalle la causa de un consumo alto o bajo, ya que puede responder a una combinación de tres tipos de decisiones que tienen su origen, normalmente, en actores diferentes. El empleo del indicador global (*consumo / viajero.km*) diluye las responsabilidades, y por ello resulta menos útil a los efectos que se pretenden lograr.

Clase energética

Para facilitar la transmisión de la imagen de eficiencia energética, los *indicadores* se completarán con una *clasificación energética*, similar a la que ya se emplea en el etiquetado de los automóviles y los electrodomésticos, que pretende mostrar al consumidor la diferencia entre los consumos de dos vehículos similares.

Hay que tener en cuenta que en la generación de energía eléctrica, los coeficientes de pérdidas y de emisiones y son diferentes en los distintos países y además en cada cambian según los años, dependiendo del *mix* de generación que se emplee en cada caso. Por ello (junto con los indicadores) se facilitarán los coeficientes de pérdidas y emisiones en la generación que han sido empleados para el cálculo. Ello hará posible la corrección para todos los trenes en caso de disponer de unos datos diferentes.

2.3 Incidencia de los tipos de servicio y los trenes

El consumo de energía y las emisiones no dependen exclusivamente del vehículo, sino también dependen del servicio que presta: el mismo vehículo puede tener consumos muy diferentes en distintos servicios. El servicio está caracterizado por una infraestructura concreta (velocidad máxima, perfil, túneles,...) y por una forma de operación determinada (número de paradas, márgenes de tiempo).

Un vehículo puede tener varios indicadores absolutos y específicos de consumo y de emisiones (así como diferentes clases energéticas), para cada uno de los servicios que pueda realizar; igual que ocurre en el caso de los automóviles, en los que se definen los indicadores para recorridos urbanos, interurbanos o mixtos. Así, por ejemplo,

un mismo tren podrá tener unos indicadores y *clases* para servicio de cercanías y otros diferentes para servicios de media distancia.

Definición de los ciclos representativos de los servicios

Por razones prácticas y de homogeneidad, las variables del servicio (de la infraestructura y de las características operativas) se estandarizarán en "ciclos".

Para que las pruebas de medición de consumo y emisiones sean fiables, han de ser realizadas en igualdad de condiciones para todos los trenes analizados. Dada la imposibilidad de hacerlas en un banco de pruebas, por sus elevados costes, se emplea el siguiente procedimiento:

Se definirán ciclos representativos de cada uno de los tipos de servicios existentes en el ferrocarril, siendo estos los siguientes: Tranvía; Metro; Cercanías suburbanas; Cercanías metropolitanas; Media distancia; Largo recorrido; Velocidad Alta (ancho va-

Clase de eficiencia (categoría de la etiqueta)	Variación respecto a la medida del consumo de los turismos de su mismo tamaño (superficie)
A	Inferior al 25%
B	Entre un 25% y un 15% menos
C	Entre un 15% y un 5% menos
D	Media: entre un 5% menos y un 5% más
E	Entre un 5% y un 15% más
F	Entre un 15% y un 25% más
G	Superior al 25%

Fuente: IDAE, Guía de Vehículos Turismo de venta en España con indicaciones de consumo y emisiones de CO₂

La *clase energética* de cada tren para cada servicio se expresará con una letra de la A a la E; siendo el más eficiente el que obtenga la A. La clase se asignada en función de las desviaciones porcentuales del consumo específico de cada vehículo respecto al consumo medio de los de su capacidad.

2.2 Tipo de energía para el cálculo de los indicadores

Los indicadores de consumo energético expresarán éste en términos de energía suministrada al vehículo en el caso de tracción diésel o energía primaria suministrada a la central generadora en el caso de tracción eléctrica; es decir, incluirán la energía recibida por el tren para el movimiento, servicios auxiliares y la que se pierde en los procesos de transformación que se producen dentro del vehículo. También se cuentan las pérdidas de energía en los procesos de generación, transporte y transformación de electricidad.

Se deduce del consumo así calculado la energía devuelta a la red (medida en pantógrafo), si es de tracción eléctrica y cuenta con freno regenerativo.

riable); Media Distancia en alta velocidad y
Larga Distancia en alta velocidad.

Se elegirán aquellas líneas o tramos cuyas características reales se consideren representativas del servicio lo que permitirá llevar a cabo ensayos reales.

Cada uno de estos tipos están caracterizados por un conjunto de valores concretos de los parámetros recogidos en la tabla 2.

Parámetro	Unidad	Designación
Velocidad máxima del servicio	km/h	V_{max}^s
Velocidad media del servicio	km/h	V_{media}^s
Velocidad máxima en deriva	km/h	V_{dmax}^s
Velocidad mínima del freno eléctrico	km/h	V_{minF}
Proporción de túnel	km/km	T_l^s
Factor de túnel (Tf)		T_f^s
Coefficiente de curvas (resistencia equivalente de las curvas)	daN/t	C_c^s
Distancia entre paradas comerciales	km	D_{pc}^s
Distancia entre paradas técnicas programadas	km	D_{pt}^s
Distancia entre paradas técnicas no programadas	km	D_{ppt}^s
Distancia entre paradas equivalentes	km	D_{pe}^s
Exceso específico pendientes	(mm)/ km	E_p^s
% aprovechamiento freno regenerativo	%	B_r^s
% aprovechamiento s/ plazas estándar	%	A_p^s
Densidad de plazas y servicios	Plazas/m ²	

Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros requieren, en algunos casos, alguna explicación o aclaración sobre el concepto y la forma de calcular el parámetro:

Se calcula la distancia entre *paradas equivalente por reducción de velocidad* de la siguiente forma: cada reducción de velocidad (debida al perfil de velocidades estáticas de la línea) que no sea para realizar una parada comercial o técnica, equivale a una "fracción de parada", que se calcula como la parte de la energía cinética disipada en la reducción de velocidad con respecto a la energía cinética disipada en una parada partiendo de la velocidad máxima de la línea. Este indicador puede obtenerse del perfil de velocidades máximas de la línea y permite evaluar la energía generada o disipada en el freno por variaciones de velocidad debidas a causas diferentes de las paradas comerciales o técnicas. Así pues, para cada reducción de velocidad (de V_i a V_f) supone una "fracción de parada equivalente" que se calcula como

$$f_p = \frac{V_i^2 - V_f^2}{V_{max}^s - 0^2} \cdot \text{Por ejemplo, si se}$$

tiene un tren cuya velocidad máxima está limitada por la infraestructura a 200 km/h y realiza una reducción de velocidad de 160 km/h a 100 km/h, el número de paradas equivalentes de esta reducción es

$$f_p = \frac{160^2 - 100^2}{200^2 - 0^2} = 0,39$$

La *resistencia equivalente de las curvas* es un coeficiente que, multiplicado por la masa del tren, ofrece una fuerza equivalente continua en todo el recorrido que se opondría al movimiento, y cuyo valor sería igual a la suma de las fuerzas de resistencia en curva aplicadas exclusivamente a lo largo de la curva para cada una de ellas. Obsérvese que este coeficiente es equivalente a la resistencia mecánica específica al avance en línea recta (a en daN/t) a la que debe sumarse.

Si denominamos la *pendiente de equilibrio* p_e aquella en la que, para la velocidad máxima V_{max} se igualan los valores absolutos de la resistencia al avance y de la proyección de la fuerza de gravedad, tendremos:

$$M \times p_e = A + B \times V_{max} + C \times T_f \times V_{max}^2$$

de donde, despejando p_e , y sustituyendo los coeficientes absolutos por específicos, se tiene:

$$p_e = a + b \times V_{max} + c \times T_f \times V_{max}^2$$

El *exceso específico de pendientes* se define entonces como el sumatorio de las diferencias [en (mm/m)/km] entre la pendiente real y la *pendiente de equilibrio* en los tramos en que la pendiente de equilibrio es mayor que la real, multiplicada por la longitud en que existe esa diferencia y dividida por la longitud total del tramo. Tiene la utilidad de que se relaciona directamente con la parte de energía potencial que es disipada en el frenado en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima. Para simplificar el cálculo, se puede partir de la suposición de que los coeficientes específicos son semejantes para los trenes de material convencional y para los de alta velocidad. Para el material convencional adoptamos $a=1,15$ daN/t, $b=0,01$ daN/(km/h)² y $c=2,25 \times 10^{-4}$ daN/(kmh)² y para el de alta

velocidad $a=0,75 \text{ daN/t}$, $b=0,0065 \text{ daN/(km/h)}^2$ y $c=1,2 \times 10^{-4} \text{ daN/(kmh)}^2$;

El porcentaje de aprovechamiento es necesario si se quiere calcular el consumo específico por viajero real y km; y además para calcular la masa del tren cargado. Se calcula así:

$$\text{Aprovechamiento(PlazaEst)} = \frac{\text{viajeroskm}}{\text{plazarealeskm}} \times \frac{\text{plazasrealeskm}}{\text{plazasEstkm}}$$

$$= \frac{\text{viajeroskm}}{\text{plazasEstkm}}$$

El efecto de la conducción económica

El parámetro "Velocidad máxima en deriva" tiene por objeto recoger en el consumo real el efecto de la conducción económica, si bien en la presente comunicación, que presenta un modelo simplificado, no se considerarán sus efectos.

Definición de las características del tren

Los parámetros del tren que son necesarios para realizar el cálculo de los indicadores (absolutos y relativos) de consumo y emisiones de CO₂ son los que vienen indicados en la tabla 3.

Parámetro	Unidades	Denominación
Velocidad máxima del tren	km/h	V_{\max}^t
Masa del tren vacío	t	M^t
Masas rotativas equivalentes	t	M_{rot}^t
Coficiente A (resistencia mecánica)	daN	A^t
Coficiente B (resistencia entrada de aire)	daN/(km/h)	B^t
Coficiente C (resistencia aerodinámica)	daN/(km/h) ²	C^t
Rendimiento en tracción		ρ_t^t
Rendimiento de auxiliares		ρ_a^t
Rendimiento del freno regenerativo		ρ_b^t
Tiene freno regenerativo? (sí/no)		
Superficie útil bruta del tren	m ²	S_{ub}^t
K coeficiente consumo de auxiliares	kWh/plaza eq · h	K

Fuente: Elaboración propia

Tipos de evaluaciones

Se podrán realizar cuatro tipos de evaluaciones, dependiendo de si el material ha sido construido o no o de si se pueden hacer medias reales en línea:

- **Evaluación teórica antes de la construcción del material:** se podrá realizar una simulación para estimar el consumo y emisiones con los datos que el fabricante aporte en las especificaciones del tren.
- **Evaluación teórica del material ya construido:** se podrá realizar una simulación para estimar el consumo y emisiones con los datos reales medidos en el tren ya fabricado.

- **Evaluación empírica:** se podrá someter al material construido a un ensayo en los ciclos definidos. En este caso una vez obtenidos los resultados se deberán realizar las correcciones que procedan para adaptarlos a las condiciones estándar.

Viento exterior	Nulo
Temperatura	15°
Presión	101.325 N/m ²
Densidad del aire	1,225 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

En el caso del Metro se definirán otras condiciones estándar de presión y temperatura, ya que éstas son diferentes por el hecho de circular soterrado.

Las comparaciones entre trenes diferentes se harán siempre de acuerdo con el mismo tipo de medición; es decir, no se deberán comparar resultados de mediciones teóricas con empíricas.

Los rendimientos se estimarán "a priori" de forma homogénea para todos los trenes función del tipo y tamaño del motor y de la tecnología (así, en tracción eléctrica dependerá del si son motores de continua, síncronos, asíncronos; de tipo de equipo de control, etc., en diésel del tipo de transmisión, etc). Estos rendimientos se pueden sustituir por la comprobación real de un rendimiento en un caso concreto.

3. Cálculo teórico del consumo

Theoretical calculation of consumption

Combinando los parámetros del tren con los de la línea tipo en estudio, se pueden obtener los consumos teóricos según se expone a continuación.

a. Cálculo de la energía absoluta para el movimiento

El cálculo de energía para el movimiento se hará por un kilómetro medio, y es la suma de diversos sumandos:

1. Energía empleada para vencer la resistencia al avance en recta (en un kilómetro medio):

$$\frac{E_{ar}}{L} = \frac{R_a \times L}{L} = A^t + B^t \times V^s_{media} + \left(C^t \times (V^s_{media})^2 + C^t \times \sigma^2(v) \right) \times \left[\frac{(T^s_f - 1) \times T^s_l}{T^s_l} + 1 \right]$$

2. Energía requerida para vencer la resistencia adicional al avance en las curvas (en un kilómetro medio):

$$\frac{E_{ac}}{L} = \frac{\sum R_{ac} \times l}{L} = \left[\sum l_c \times \frac{800}{R_c} \times M \right] \times \frac{1}{L} = C_c \times M$$

Donde C_c es el coeficiente equivalente de curvas. En líneas de ancho de vía de 1.435 mm, el valor de 800 se sustituye por el de 600.

3. Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad, considerando el efecto de la *conducción económica* (en un kilómetro medio):

$$E_b = \frac{1}{2} \times (M + M_{rot}) \times \left(\frac{1}{D_{pc}} + \frac{1}{D_{pe}} + \frac{1}{D_{pt}} \right) \times (V_{max}^s)^2$$

De dicha energía habrá se deduce la que se emplea para vencer la resistencia al avance durante el proceso de deceleración.

4. Energía potencial disipada en el freno en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima (en un kilómetro medio):

$$E_p = M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L}$$

Con esto se obtiene que la energía en llantas (en un kilómetro medio) es:

$$E_L = R_{ar} + R_{ac} + E_b + E_p$$

Y teniendo en cuenta el rendimiento de tracción, se obtiene la energía en el pantógrafo:

$$E_P = \frac{R_{ar} + R_{ac} + E_b + E_p}{\rho^t_b}$$

Considerado además (en el caso de la tracción eléctrica) las pérdidas en los procesos de transporte y transformación de la energía eléctrica y de la generación de ésta (ese último puede ajustarse a la realidad nacional del año concreto de que se trate) se obtiene el indicador absoluto referido a los kWh en la entrada de la central.

Multiplicando por el factor que liga el consumo de energía y las emisiones (que es diferente para cada país y para cada periodo de tiempo considerando, pero es el mismo para todos los trenes objeto de una

misma comparación) se tiene el indicador de emisiones de CO₂.

b. Cálculo de la energía consumida por los auxiliares

La energía consumida por los auxiliares (en un kilómetro medio) se estima, provisionalmente, como

$$E_{aux} = \frac{P^t_e \times k}{V_{media}}$$

c. Cálculo y efecto de la energía devuelta a la red por el freno regenerativo

En el caso de que el tren cuente con freno regenerativo habrá que restar (a la energía recibida), la energía devuelta a la red, ambas medidas en el pantógrafo.

Si se trata de una línea electrificada en corriente alterna (como es el caso de las líneas de alta velocidad), la energía enviada a la catenaria se intenta aprovechar para otro tren que la pueda necesitar en ese momento. Si no hay ningún tren que la necesite, es devuelta a través de la subestación a la red pública.

Si la línea está electrificada en corriente continua (es el caso de las líneas convencionales y de Metro en España) la energía devuelta a la catenaria no puede ser enviada a la red pública (que funciona en corriente alterna), por lo que el sistema analiza si la energía es demandada por otro tren que se encuentre en el mismo ámbito eléctrico, si es así la devuelve a la catenaria para que otro tren la utilice; si no la disipa en el freno reostático.

No toda la energía disipada en el freno puede recuperarse, ya que la energía disipada en el freno neumático, no es recuperable. Para estimar la parte que es recuperable, se supone que los trenes con freno eléctrico emplean éste hasta una velocidad mínima (V_{minF}) a partir de la cual emplean el neumático.

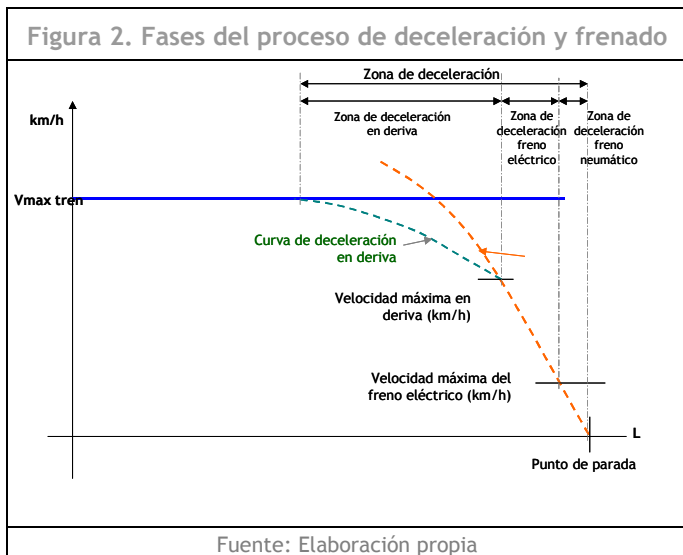
Para tener en cuenta la recuperación de energía en el modelo, es preciso considerar además el porcentaje de energía devuelta a la red por el freno regenerativo, para lo que se incorpora el término B^s_r , definido como una característica del "ciclo de tipo de servicio" que expresa el porcentaje de aprovechamiento por freno regenerativo de la energía total disipada en el freno (será 1

en el caso de electrificaciones en corriente alterna; en corriente continua tendrá un valor alto en servicios de cercanías y Metro con mucha densidad de tráfico y un valor bajo en servicios interurbanos).

$$E_{fr} = \left[\frac{\left(\frac{1}{D_{pc}} + \frac{1}{D_{pe}} + \frac{1}{D_{pn}} \right) \times (M + M_{ro}) \times (V_{d_{max}}^2 - V_{minF}^2)}{\rho_b} + M \times g \times \left(\sum l_p \times (p_i - p_e) \right) \times \frac{1}{L} \right] \times B_r$$

Siendo V_{minF} el límite inferior de velocidad que se usa en el freno eléctrico.

Es preciso recordar que no toda la energía cinética perdida en el proceso de deceleración se disipa en el freno o es susceptible de ser regenerada, ya que la parte de deceleración que se consigue con el tren en deriva se aprovecha para vencer la resistencia al avance. En la figura 2 se observan las diferentes fases del proceso de deceleración del tren.



2. Caso ejemplo: aplicación a trenes y líneas de alta velocidad

Practical case: application to a high-speed trains and lines

Seguidamente, y como ejemplo para comprobar la forma de calcular teóricamente y de expresar los índices y la clasificación energética, se realizará de forma aproximada el cálculo para trenes y líneas españolas de alta velocidad.

La razón de escoger estos trenes y servicios para el caso ejemplo radica en que al haber pocos servicios, resulta fácil hacer un ciclo medio que se corresponde con un mix de las líneas de alta velocidad existentes. Por otro lado, el número tipos de trenes exis-

tentes no es muy elevado, lo que permite realizar los cálculos para todos ellos y proceder a su comparación.

Para los servicios se escogen trenes representativos de tres servicios: alta velocidad larga distancia, servicios de alta velocidad y media distancia; y servicios de larga distancia y ancho variable. Estos son los servicios que en 2007 se prestan en las líneas españolas de alta velocidad.

Para la determinación de los recorridos y características representativas del servicio, se aplican los siguientes criterios:

- **Servicios de alta velocidad y larga distancia:** Se emplea el recorrido de Camp de Tarragona a Sevilla, pasando por el By Pass de Lleida y por la estación de Zaragoza. Se considera que estos trenes hacen parada cada 250 km (incluida la final del recorrido), y la velocidad máxima de los trenes se considera la de 300 km/h.
- **Servicios de alta velocidad y media distancia.** Se considera el recorrido combinado de Madrid a Toledo, de Madrid a Puertollano y de Córdoba a Sevilla y la velocidad máxima de 250 km/h. Tienen una parada comercial, incluida la final del recorrido, cada 103 km.

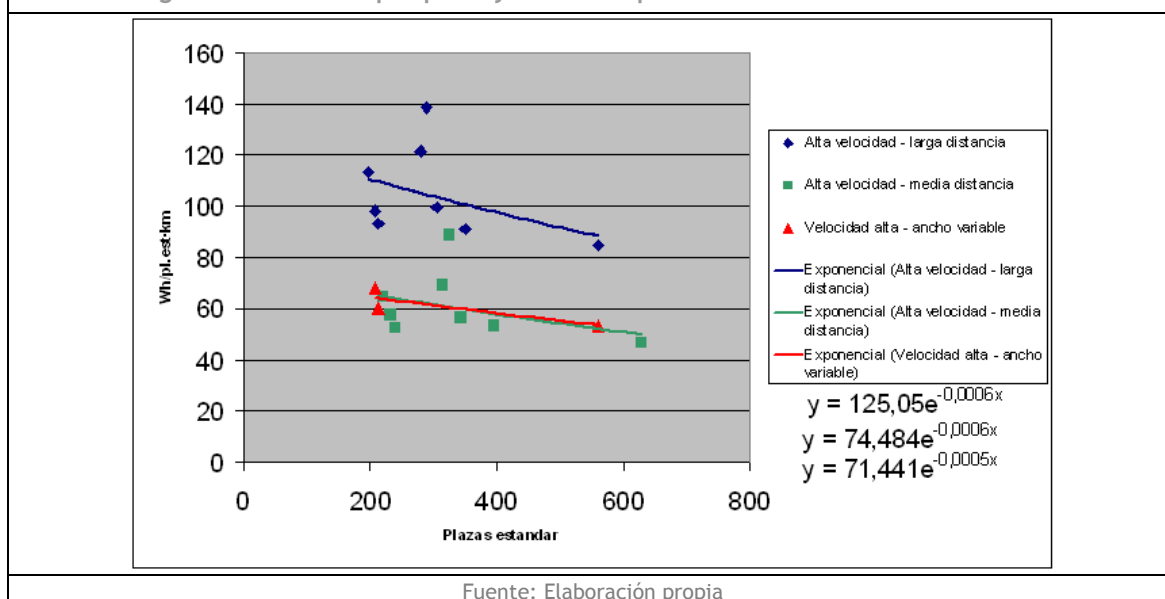
Tabla 5. Parámetros de los ciclos de servicio característicos

Línea	Ciclo de servicio		
	AVLD	AVMD	AVAV
Velocidad máxima del servicio	300	250	195
Velocidad media del servicio	234	167	157
Velocidad máxima en deriva	210	200	150
Velocidad mínima del freno eléctrico	20	20	20
Proporción de túnel	0,046	0,003	0,052
Factor de túnel (TF)	1,224	1,237	1,274
Coefficiente de curvas	0,107	0,122	0,125
Distancia entre paradas comerciales	249,60	103	188
Distancia entre paradas técnicas programadas	0	0	565
Distancia entre paradas técnicas no programadas	2,496	1,823	491
Distancia entre paradas equivalentes	622	1,823	231
Exceso específico pendientes	886	364	2963
%aprovechamiento freno regenerativo	1,00	1,00	0,93
%aprovechamiento sblazas estándar	0,65	0,60	0,68
Densidad de plazas y servicios	0,80	0,90	0,80
PARÁMETROS DE LA TRACCIÓN ELÉCTRICA			
Energía barras central / energía pantógrafo	1,088	1,088	1,100
Energía entrada central / energía barras central	2,128	2,128	2,128
g CO ₂ emitidos / kWh barras central	340,00	340,00	340,00
DATOS PRIMARIOS DE LA LÍNEA PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS			
Longitud	998,40	411,30	1130,1
Longitud de túneles	45,96	0,38	20,6
Paradas comerciales	4,00	4,00	6,0
Paradas técnicas programadas	0,00	0,00	2,0
Paradas técnicas no programadas	0,40	0,45	2,3
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	1,61	0,23	4,9

Fuente: Elaboración propia

- **Servicios de velocidad alta y ancho variable.** Se considera el recorrido de Madrid a Málaga y de Madrid a Barcelona, con una parada cada 188 km. La velocidad

Figura 3. Consumos por plaza y kilómetro para los distintos ciclos de servicio



máxima es de 200 km/h en la línea de ancho estándar y de 160 km/h en la línea convencional.

Con ello, los parámetros que se emplean para el caso ejemplo, en cada uno de los tres escenarios de servicio, son los recogidos en la tabla 5, en la que se han calculado los parámetros reales de las líneas y servicios indicados.

Por lo que se refiere a los trenes, se analizan cada uno de los siguientes:

- Para los servicios de *alta velocidad y larga distancia* los tres tipos de trenes de los que se dispone para ese servicio: Trenes AVE de las series 100, 102 y 103 y también el 104 aunque no se emplea regularmente en este servicio.

- Para los servicios de *alta velocidad y media distancia*, los trenes que realizan estos servicios habitualmente que son los de la serie 104, además de otros trenes que aún cuando no se hace habitualmente como los de las series 100 (que se emplearon hasta 2004 en la línea de Madrid a Puertollano), los de las series 102, 103 y los de la series 120 y 130.

- Para servicios de *velocidad alta y ancho variable* se analizan con trenes autopulsados series 120 y 130, así como los trenes Talgo remolcados máquina 252 (en ambos anchos de vía) y con coches Talgo de las series 6 y 7 en dos formatos, representativos de un tren pequeño y de un tren grande: 9 coches serie 6, y 22 coches serie 7, respectivamente.

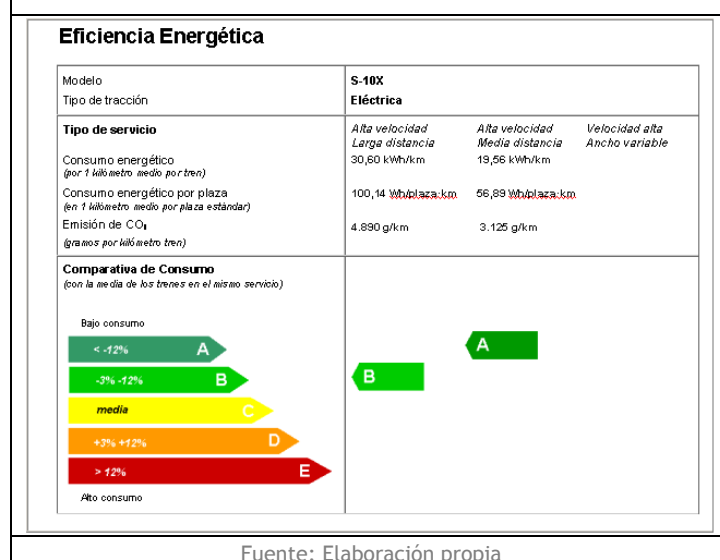
Los resultados obtenidos en el cálculo teórico no se publican en esta comunicación

con el nombre concreto de los trenes, ya que los datos empleados presentan algunas lagunas y están siendo sujetos a revisión en el marco del proyecto de investigación, por lo que el cálculo en este caso ejemplo no tiene por objeto calificar a los trenes concretos, sino servir de ejemplo de los resultados que se espera alcanzar.

Con estas salvedades, los resultados obtenidos para cada tren y tipo de servicio (en Wh en la entrada de la central generadora / plaza.km) en función de las plazas estándar son los que se reflejan en la figura.

De estos resultados pueden obtenerse los indicadores y clase energética de cada tren para cada uno de los servicios. Como muestra se reflejan la "etiqueta energética" de uno de los trenes analizados.

Figura 4. Etiqueta de eficiencia energética para el tren S-10X



AUTORES

Alberto García Álvarez
albertogarcia@ffe.es
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Ingeniero Industrial del ICAI, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales, Licenciado en Derecho.

M^a del Pilar Martín Cañizares
Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Ingeniera en Informática del ICAI.

FICHA BIBLIOGRÁFICA

Artículo basado en la comunicación presentada en el III Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Tenerife, mayo de 2007.

Actualizado por los autores en mayo de 2007

REFERENCIAS

Reglamento n° 101 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE/ONU)

Real decreto 837/2002, de 2 de agosto

Sitio web del IDAE (www.idae.es)