



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

colección

MONOGRAFÍAS  
del FERROCARRIL

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

# METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL MATERIAL MÓVIL FERROVIARIO

Alberto García Álvarez y M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares  
(Coordinadores)



4<sup>a</sup> edición, 2016

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

---

# Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario

---

Alberto García Álvarez  
M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares  
(Coordinadores)

Fundación de los Ferrocarriles Españoles



Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía



4<sup>a</sup> edición, septiembre de 2016

Edición revisada y adaptada a la TecRec "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" de UIC/UNIFE

Este documento es el resultado de la reflexión de un grupo de trabajo constituido en el seno de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE) para el desarrollo del convenio firmado entre la propia Fundación de los Ferrocarriles Españoles y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Ha sido dirigido por Alberto García Álvarez con la colaboración de M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares y han participado en él Estefanía Sánchez Gómez, de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles; José Antonio Jiménez Redondo, Ignacio Ribera Sánchez, Alfonso Serrano Duque y Francisco Esteban Casas, de Renfe-Alta Velocidad y Larga Distancia; Ramón Morales Arquero, de Renfe-Cercanías y Media Distancia; Jorge Blanquer Jaraiz, de Metro de Madrid; Rafael Fernández Pérez, de Cetren; Josep Lluís Arqués y José Carlos Terés, de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya; Ramón Vall Canosa, de Trambaix; y Ángel Cediel Galán, del IDAE.

*Ilustraciones de portada: Oaris (Gonzalo Rubio), AVRIL (Talgo), Metro de Palma de Mallorca (Alberto García) y 331 de FGC (Aleix Cortés)*

### **Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario**

Edición 1. Enero de 2010

Edición 2. Agosto de 2010

Edición 3. Mayo de 2011

Edición 4. Septiembre de 2016

ISBN: 978-84-943462-5-5

Depósito legal: M-6739-2016

© Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Este documento es propiedad de sus autores



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, TURISMO  
Y COMERCIO



# ÍNDICE

---

1	INTRODUCCIÓN .....	3
1.1.	Antecedentes.....	3
1.2.	Convenio IDAE-FFE .....	4
1.3.	Resultados del trabajo.....	4
1.4.	Ámbito .....	5
1.5.	Objetivo.....	5
1.6.	Organización del estudio y metodología .....	6
2	ASPECTOS GENERALES SOBRE LA EVALUACIÓN Y HOMOLOGACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES EN LOS TRENES.....	9
2.1.	Reflexiones sobre el indicador de consumo .....	9
2.2.	Tipos de indicadores .....	10
2.3.	Incidencia en el consumo de los tipos de servicio y la infraestructura .....	15
3	CÁLCULO TEÓRICO DEL CONSUMO DE UN TREN EN UN SERVICIO TIPO.....	22
3.1.	El modelo .....	22
3.2.	Parámetros de diseño del tren que inciden en el consumo de energía .....	23
3.3.	Cálculo de la energía consumida para el movimiento del tren.....	28
3.4.	Pérdidas en la cadena de tracción.....	29
3.5.	Cálculo de la energía consumida por los servicios auxiliares .....	32
3.6.	Cálculo y efecto de la energía eléctrica regenerada por el freno regenerativo.....	38
3.7.	Cálculo de la energía primaria y las emisiones .....	40
4	VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CONSUMO.....	43
4.1.	Las condiciones de los pliegos.....	43
4.2.	Necesidad de conocer el valor económico de la energía consumida en el ciclo de vida.....	44
4.3.	Forma de cálculo del coste de la energía consumida .....	45
	ANEJO .....	49
	BIBLIOGRAFÍA .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Parámetros característicos del servicio .....	17
Tabla 2. Fracciones de parada equivalente por reducción de velocidad según velocidad y de la limitación .....	18
Tabla 3. Valores del coeficiente por equipos para la ayuda a la conducción económica .....	21
Tabla 4. Parámetros del tren empleados en el modelo .....	24
Tabla 5. Parámetros del tren calculados .....	26
Tabla 6. Variables parametrizables consideradas independientes del tren .....	26
Tabla 7. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua .....	30
Tabla 8. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente alterna .....	31
Tabla 9. Rendimientos en el vehículo de tracción diésel .....	31
Tabla 10. Precio de la energía eléctrica entre los años 2012 y 2036.....	46
Tabla 11. Coste de la energía en cada año entre los años 2012 y 2036.....	47
Tabla 12. Valor actual de la energía consumida cada año.....	47
Tabla 13. Características de los servicios tipo Larga distancia.....	49
Tabla 15. Características de los servicios tipo de Cercanías, FGC y Tranviario y metro .....	51

# 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene por objeto presentar los resultados del trabajo coordinado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles y su Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte, para la definición de una "Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario".

## 1.1. Antecedentes

En el ámbito ferroviario son pocos los estudios sobre la normalización del consumo<sup>1</sup> de energía y emisiones del material rodante. En el entorno español puede destacarse el trabajo "Metodología para la evaluación y normalización de los consumos energéticos de los trenes de viajeros"<sup>2</sup> [1].

Este estudio, en realidad, era un avance del proyecto de investigación "Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros" [2].

En el ámbito internacional puede citarse el trabajo Work Package 2.2. del Proyecto RailEnergy "Standard Service Profiles - Calculation of rolling stock's energy efficiency performance".

Durante la fase de revisión del presente documento, una vez concluido el estudio, la UIC publicó junto con UNIFE la Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" [3], que fue elaborada a partir de los resultados obtenidos en el proyecto RailEnergy.

La Recomendación Técnica es aplicable a la especificación y verificación del consumo de energía del material móvil ferroviario. El consumo de energía, tal y como se establece en el presente documento, es la energía neta total consumida -bien en el pantógrafo, bien en el depósito de combustible- en un perfil determinado de servicio, que puede ser el servicio futuro que realizará el tren o puede ser acorde con un perfil característico estándar, válido para la categoría de servicio específica del tren. Esto asegurará resultados directamente comparables o representativos de la operación real del tren.

El objetivo general de esta Recomendación Técnica es proporcionar un marco que permita generar valores comparables de consumo de energía de trenes y locomotoras sobre una base común y así poder realizar análisis comparativos y mejorar la eficiencia energética de los vehículos ferroviarios.

El propósito de la Recomendación Técnica no es permitir la comparación entre modos de transporte, ni tampoco la comparación entre tracción diésel y eléctrica, puesto que sólo aborda el consumo de energía en el vehículo (p. 6).

---

<sup>1</sup> El término "consumo" no es rigurosamente exacto, ya que la energía al ser empleada en el transporte por ferrocarril se degrada, pero no desaparece. Sin embargo, al ser un término de uso muy extendido y ser el más comprensible para los lectores se empleará en este documento en el sentido de que se consume la utilidad de la energía.

<sup>2</sup> Comunicación presentada en el III Congreso de Innovación Ferroviaria, Tenerife, mayo de 2007.

El documento de UIC/UNIFE no establece una metodología de cálculo del consumo de energía, sino solamente criterios de homogeneización. Sin embargo, la "Metodología de evaluación del material móvil ferroviario" ofrece, además, un método de cálculo del consumo y de las emisiones.

En esta tercera versión corregida y ampliada, la metodología se ha adaptado a la Recomendación Técnica de la UIC, con la que resulta completamente compatible, si bien desarrolla aspectos no detallados en la Recomendación UIC/UNIFE.

## **1.2. Convenio IDAE-FFE**

El 9 de octubre de 2008 se firmó un convenio de colaboración entre el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) y la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE), que tenía como objeto "la definición de las tareas que las partes deberían llevar a cabo para desarrollar un sistema y una metodología (similar a la ya existente para los automóviles o electrodomésticos) que permitan a los operadores de transporte ferroviario o a las autoridades públicas que licitan concursos de servicios públicos 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".

Como se señalaba también en el convenio, la Fundación de los Ferrocarriles Españoles e IDAE promovieron conjuntamente la constitución de un grupo de trabajo sobre etiquetado energético en el transporte ferroviario. A dicho grupo de trabajo se invitó a expertos involucrados en los proyectos de investigación "Enertrans" y "Elecraill", además de Renfe-Operadora, Metro de Madrid, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya y DeTren (Trambaix y Trambesós de Barcelona).

IDAE participó en el desarrollo de los trabajos y llevó conjuntamente con la FFE el seguimiento técnico de los mismos. La FFE asumió la dirección y la secretaría técnica del grupo de trabajo, incluyendo entre estas tareas la coordinación, convocatorias y realización de actas, informes y documentos de trabajo, así como el desarrollo del simulador asociado.

El presente documento tiene por objeto recoger los trabajos realizados y los resultados obtenidos en el marco de este convenio para alcanzar los objetivos perseguidos.

## **1.3. Resultados del trabajo**

Los resultados o productos que se pretendía obtener con el trabajo derivado del Convenio FFE-IDAE eran básicamente dos:

1. Cuantificación previa del consumo de un tren, expresado en cantidad de energía por unidad de oferta para una combinación de servicio e infraestructura. Debe ser útil para que un operador pueda especificar un consumo máximo para un tipo de servicio.
2. Establecimiento de un valor de intercambio entre el consumo de energía y el coste económico asociado, con el objeto de que el operador pueda valorar diferentes mejoras en el material que podrían suponer un aumento de la inversión inicial, pero que reducen el consumo de energía en la fase de explotación. También este valor puede ser útil para una eventual penalización

en caso de incumplimiento de los parámetros objetivos que se aplicaron para la estimación del consumo.

También se tratan en el proyecto temas procedimentales: cómo se regula el proceso de cálculo; quién calculará el consumo de cada tren; o cómo se actualiza la normativa.

## **1.4. Ámbito**

Para lograr un resultado útil, se ha estimado conveniente limitar el ámbito del análisis a lo verdaderamente relevante para el objetivo pretendido. Se entiende que una mayor generalidad podría tener utilidad en el ámbito académico o científico, pero haría la metodología menos práctica, lo que la alejaría del objetivo perseguido.

Por ello, en ese sentido, el estudio debe ser válido para:

1. trenes de viajeros de toda clase de servicios (alta velocidad, cercanías, metro, tranvías...);
2. únicamente trenes autopropulsados;
3. tanto de tracción diésel como de tracción eléctrica;
4. para su uso fundamentalmente en el entorno ferroviario español;
5. Para ferrocarriles de adherencia;
6. Para trenes de nueva construcción.

Muchos de los elementos del estudio podrían ser aprovechables si en otro momento se desea hacer un estudio análogo para trenes de mercancías; o para trenes remolcados por locomotora; o, en fin, propulsados, por ejemplo, por turbina de gas. Sin embargo, en tales casos será preciso estudiar los elementos diferenciales.

## **1.5. 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 e infraestructura, sus consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

Este método permitirá a los operadores de transporte ferroviario y a las autoridades públicas, seleccionar los trenes energéticamente más eficientes de acuerdo con unos índices objetivos; así como especificar, en los Pliegos de Condiciones para la adquisición de nuevos trenes o para la licitación de servicios, el consumo máximo 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 las mejoras conseguidas en este campo.

### **➤ Consumo teórico precalculado**

Es muy importante destacar que el objetivo principal que se pretende alcanzar con el trabajo es estimular el diseño y desarrollo de trenes energéticamente eficientes. Y ello, porque ofrece a los operadores la posibilidad de especificar un determinado



consumo, y a los fabricantes la oportunidad de adoptar medidas en la fase de diseño del tren para alcanzar ese consumo.

Por tanto, se prefiere poder conocer el consumo que va a tener el tren antes de que sea construido (que denominaremos *consumo teórico precalculado*), y así poder adoptar las medidas correctoras en la fase de diseño, antes que conocer con gran exactitud el "consumo real medido" con el tren ya construido.

Ello implica que, para el objeto perseguido, no se pueden hacer tests (en vía o en banco) de medidas reales del consumo, sino que éste debe poder precalcularse con el uso de ciertos parámetros de diseño del tren.

Desde luego, en la medida de lo posible, el *consumo teórico precalculado* se deberá aproximar al consumo real (que, por cierto, será diferente para un mismo tren según la línea, tipo de servicio, formas de conducción, etc.).

Por ello, podrá recurrirse al análisis de medidas reales (ya sean de registros regulares o de pruebas específicas) con el objeto de ajustar la fórmula de cálculo del *consumo teórico precalculado*, tanto en el momento de su definición inicial, como en corrección y evolución posterior.

---

## 1.6. Organización del estudio y metodología

### ➤ Organización del estudio

Tras la introducción y descripción de los antecedentes, objetivos y metodología (capítulo 1), el presente documento contiene tres capítulos fundamentales:

1. Un capítulo se refiere (capítulo 2 del documento) a las consideraciones generales que deben tenerse en cuenta para la evaluación objeto del estudio.
2. Otro describe (capítulo 3 del documento) el procedimiento concreto de estimación del *consumo teórico precalculado* para un servicio tipo.
3. Se completa con otro capítulo (número 4 del documento) destinado a orientar sobre la forma en que podría calcularse el impacto económico del consumo del tren con el doble objetivo de evaluar, a los efectos que procedan, las diferencias de consumo sobre lo previsto; y analizar la viabilidad de la adopción de determinadas medidas con un mayor coste, pero que produzcan una reducción en el consumo.

El final del documento contiene referencias a la bibliografía empleada.

### ➤ Metodología

Para la elaboración de los diferentes trabajos se partió del estudio [1], comunicación presentada en el III Congreso de Innovación Ferroviaria, Tenerife, mayo de 2007; así como del proyecto [2]; y de otros trabajos citados en bibliografía, singularmente [4], [5] y [6], relativos a los rendimientos de las diversas cadenas de tracción<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Cuando se introduzcan diferencias con lo expuesto en estos trabajos o con otros documentos citados como referencias bibliográficas, se hará notar en cada caso con una nota a pie de página.

También se empleó la metodología y estructura del simulador de consumos de trenes ALPI 2810 versión 6, que se adapta, en una versión simplificada, para su uso como calculador asociado al presente proyecto.

Sobre la base de estos trabajos y con esta herramienta, se celebraron diez reuniones de trabajo entre septiembre de 2008 y abril de 2009. En ellas se discutieron los datos de estas y otras publicaciones, contrastado con datos de diversos informes internos y experimentos parciales realizados, y puestos todos ellos en relación con los objetivos del presente proyecto.

Posteriormente, en agosto de 2010, se procedió a la adaptación del estudio conforme a la Recomendación Técnica de la UIC "Specification and verification of energy consumption for railways rolling stock".



## 2 ASPECTOS GENERALES SOBRE LA EVALUACIÓN Y HOMOLOGACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES EN LOS TRENES

Se trata en este proyecto, como se ha expuesto, de definir unos indicadores teóricos precalculables de consumo de energía y/o emisiones, así como una clasificación de eficiencia energética de cada tren, orientados ambos a la especificación de los trenes en los procesos de compra.

En el presente capítulo se presentan algunas reflexiones sobre los indicadores a emplear y la forma genérica de calcularlos, a fin de que sean útiles para el objetivo perseguido.

### 2.1. Reflexiones sobre el indicador de consumo

El indicador de consumo de un tren debe poder ser estimado a priori, es decir, antes de su construcción, al objeto de que puedan adoptarse en la fase de diseño medidas que mejoren el resultado.

Por ello, el indicador de consumo debe ser de *consumo teórico precalculado*: *teórico*, en el sentido de que no se trata de un consumo real (que, por lo demás, será diferente para el mismo tren en cada servicio y tipo de operación); y *precalculado*, en el sentido de que debe poder conocerse antes de construir el tren.

El objetivo no es tanto ayudar a elaborar un presupuesto de gastos de energía, sino que sea posible la comparación de trenes y de sus prestaciones para poder tener en cuenta el consumo de energía, junto con otros factores, en la selección del tren más adecuado.

Por ello, el consumo debe calcularse por simulación, empleando un modelo público, conocido por todos los agentes implicados.

Las propiedades del modelo serán las siguientes:

1. Las variables de cada tren para su uso en el modelo de cálculo deben ser magnitudes propias del tren, objetivas y comprobables, tales como dimensiones, pesos, tipos de materiales o tecnologías empleadas, etc.
2. La estructura del modelo no debe desincentivar la innovación. Por ello, en ciertas variables se admitirá prueba en contra de la presunción que, sobre el valor de la variable, subyace en el propio modelo.
3. Para un mismo tren puede haber varios resultados de consumo, ya que el indicador de consumo depende de la línea y del servicio que preste. Por tanto, al especificar un consumo deseado para un tren debe indicarse a qué tipo de línea y de servicio está asociado ese consumo. En el marco del proyecto se presentará una biblioteca con diversos ciclos-tipo de infraestructura y servicio. Por ejemplo, uno de alta velocidad, otro de

tranvía, otro de cercanías... El operador puede cambiarlos para adaptarlos a su caso particular, aunque lógicamente deberá publicar los valores que desea usar. También cabe la posibilidad de definir, para un caso concreto, un servicio como una combinación ponderada de varios.

4. El modelo no debe tener en cuenta factores diferenciales que no sean intrínsecos del tren, tales como el tipo de conducción, el porcentaje de energía de frenado aprovechado por otros trenes, las pérdidas de energía en la generación de electricidad, etc. Aun cuando estas variables inciden en la cuantía del consumo real, no son diferentes de unos trenes a otros, y por ello serán modeladas de forma idéntica para todos los trenes en el mismo tipo de servicio e infraestructura<sup>4</sup>.

## 2.2. Tipos de indicadores

Los indicadores relevantes a tener en cuenta pueden ser el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el caso del consumo de energía, pueden ser diferentes los puntos de medida de la energía (energía primaria, energía final o neta, energía útil, etc.).

Para la medida de la eficiencia de los vehículos pueden, en el caso más general, emplearse dos tipos de indicadores: los absolutos y los específicos. Estos últimos son el resultado de dividir el consumo absoluto (medido en las unidades definidas) por una unidad de oferta o de transporte.

*La Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" sólo establece como resultado el consumo neto (p. 6).*

### Objeto de la evaluación y comparación

El objeto de la evaluación del indicador puede ser un tren diésel o un tren eléctrico; y si es eléctrico, funcionando a una determinada tensión predefinida. Esto es así porque cuando un operador va a comprar un tren ya sabe si será diésel o eléctrico. Y si es eléctrico ya sabe a qué tensión va a funcionar. La decisión sobre el tipo de tracción es "de más alto nivel" que la evaluación del consumo, y por ello se trata de evaluar trenes de un tipo de tracción concreta, y en su caso de comparar varios trenes del mismo tipo de tracción.

Sin embargo, la herramienta para ofrecer mayor versatilidad está preparada también para poder comparar trenes eléctricos a diferentes tensiones con trenes diésel, teniendo en cuenta que en tal caso habría que fijarse en los consumos de energía primaria para que la comparación fuese homogénea y contemplara los factores de pérdidas de energía y emisiones que se producen "aguas arriba" del propio vehículo. Estos factores son fijos y conocidos en algunos casos (por ejemplo, la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por cada litro de gasóleo consumido), pero en otros varían de un país a otro e incluso en el mismo país de un año a otro (como, por ejemplo, los factores de emisiones o de energía primaria por cada kilovatio.hora de electricidad producido). Finalmente, hay factores que varían según la tensión de electrificación, tales como

---

<sup>4</sup> En este criterio hay una diferencia con los documentos [1] y [2], ya que en ellos se consideraba la posibilidad de variar el parámetro de conducción económica y además se consideraba un factor de reaprovechamiento de la energía eléctrica regenerada en el frenado. Aquí no se tiene en cuenta, porque ni uno ni otro factor son característicos del tren, aunque sí se tiene en cuenta la existencia de dispositivos en el tren de ayuda a la conducción económica.

las pérdidas de energía en el transporte de la electricidad desde la salida de las centrales de generación del sistema eléctrico hasta el pantógrafo del tren.

No es objeto del modelo la comparación intermodal de los consumos, por ejemplo de un tren con un coche o con un avión, ni tan siquiera en el mismo tipo de servicio.

### ➤ **Indicadores absolutos adoptados**

En coherencia con el objeto del análisis y de la comparación, los *indicadores absolutos* serán de tipo numérico y expresarán el consumo de energía por cada kilómetro recorrido por el tren de que se trate.

Las *unidades de consumo absoluto* son:

1. en tracción diésel, los litros de gasoil suministrados al vehículo [l/km];
2. en tracción eléctrica sin freno regenerativo, los kilovatios.hora de energía eléctrica entregados en el pantógrafo del tren [ $\text{kWh}_{\text{pant}}/\text{km.tren}$ ];
3. en tracción eléctrica con freno regenerativo, los kilovatios.hora de energía entregados en el pantógrafo del tren menos los generados por el freno regenerativo después de alimentar los auxiliares [ $(\text{kWh}_{\text{pant}} - \text{kWh}_{\text{generados}})/\text{km.tren}$ ]<sup>5</sup>.

Las emisiones de gases de efecto invernadero no son, como se ha expuesto, un indicador directamente relevante a los efectos de este proyecto; pero, como referencia, estas emisiones absolutas se medirán en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos (en el vehículo o en la generación de electricidad) por cada kilómetro recorrido por el tren.

### **Consumos referidos al kilómetro recorrido**

Como se acaba de exponer, todos los consumos se refieren a los producidos en un kilómetro medio de recorrido del vehículo. Sin embargo, hay consumos que no se producen en función del recorrido, sino del tiempo de uso del vehículo. Es, por ejemplo, el caso de los consumos de los servicios auxiliares de confort de los trenes (calefacción, aire acondicionado, iluminación), que se producen por tiempo de uso, y por ello también consumen energía en el tiempo de las paradas comerciales e incluso en los talleres, o mientras los trenes son limpiados.

Por ello será necesario, para cada tipo de servicio, definir el tiempo que el tren está parado, pero consumiendo energía (por ejemplo, el tiempo de parada en cabeceras, en estaciones intermedias, en talleres, etc.)

Conociendo estos tiempos se calculará la energía consumida por los auxiliares en parado (diferenciando, en su caso, distintas situaciones) para su reparto posterior entre los kilómetros comerciales recorridos por el tren<sup>6</sup>.

### ➤ **Indicadores específicos**

El *indicador absoluto* (energía consumida/km.tren) no da una medida de la eficiencia real del vehículo, puesto que en los trenes existe mucha dispersión de capacidades,

---

<sup>5</sup> Como ya se ha indicado, en los documentos [1] y [2] sólo se restaba la energía eléctrica que efectivamente se aprovechaba por otros trenes o que se devolvía a la red pública. Esta energía se calculaba a través de un "coeficiente de aprovechamiento de la energía regenerada".

<sup>6</sup> Los consumos de los trenes en parado, fuera de sus paradas comerciales, no eran considerados en los documentos [1] y [2].

al contrario de lo que ocurre en los automóviles, en los que la capacidad es similar en unos y otros modelos.

*Así, hay trenes desde 56 plazas sentadas (como el automotor diésel de la serie 596 de Renfe) hasta más de 1.600 plazas (tren de alta velocidad Max E4 de los ferrocarriles japoneses JREast). Puede entenderse, por lo tanto, que el consumo por kilómetro no aporta mucha información: en el segundo de los trenes citados el consumo por kilómetro será muy superior al primero, pero ello no implica necesariamente una menor eficiencia energética.*

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. El indicador relevante en este proyecto será el específico (consumo de energía por cada unidad de oferta).

Las unidades de consumo específico en las que se expresarán los resultados del proyecto son:

- En tracción diésel, los litros de gasoil suministrados al vehículo por cada plaza estándar y kilómetro [litros/plaza\_est x km].
- En tracción eléctrica sin freno regenerativo, los kilovatios.hora de energía eléctrica entregados en el pantógrafo del tren por plaza estándar y kilómetro [ $\text{kWh}_{\text{pant}}/\text{plaza\_est} \times \text{km}$ ].
- En tracción eléctrica con freno regenerativo, los kilovatios.hora de energía entregados en el pantógrafo del tren menos los generados por el freno regenerativo después de alimentar los auxiliares por plaza estándar y kilómetro [ $(\text{kWh}_{\text{pant}} - \text{kWh}_{\text{generados}})/\text{plazasest} \times \text{km}$ ].

Una completa y detallada definición de los indicadores específicos y de las metodologías de homogenización de los consumos de energía (incluso de diversos modos de transporte) puede verse en [7].

Como unidad de capacidad o de oferta no se utilizará (salvo que en algún caso concreto sea preferible hacerlo así)<sup>7</sup> el número de plazas reales del tren, puesto que podría alterarse el resultado al variar, para un mismo tren, las dimensiones de las plazas ofertadas (por ejemplo, cambiando la distancia entre asientos).

Por ello, se empleará una *capacidad estándar* (medida en *plazas estándar*), que se calcula multiplicando la *superficie útil bruta del tren* (definida como la superficie total interior menos la correspondiente a equipos técnicos, cabinas de conducción,

---

<sup>7</sup> Cuando se emplea la capacidad medida en *plazas estándar*, se está indicando el consumo de energía subyacente del vehículo, es decir, el que puede tener con independencia de la configuración de plazas adoptada para el caso concreto (y que de hecho podría tener otro número de plazas estándar después de una remodelación). Con ello, se independiza el consumo del "modelo de tren" (que debe ser optimizado por el fabricante) de las decisiones concretas de distribución interior (que suelen ser adoptadas por el operador del servicio). También pueden emplearse las plazas reales (obteniendo una cifra más real), aunque en este caso hay que tener en cuenta que se está introduciendo un cierto sesgo en las características del modelo de tren.

cabezas tractoras...) por un *Índice de densidad de plazas y servicios* ( $\rho^s_{ps}$ ), que depende del tipo de servicio.

De esta forma, se podrían llegar a establecer tres indicadores específicos "en cadena", con la ventaja de que se pueden separar los efectos de las decisiones que subyacen en cada uno de los factores 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 política adoptada respecto al equilibrio entre frecuencia y aprovechamiento, o la decisión de reforzar o no los servicios en día punta o de programar más o menos paradas; por ello, tiene poco que ver con el diseño del tren.

En el presente trabajo se empleará, por tanto, el primero de los tres indicadores (consumo de energía / plaza estándar), ya que es el más relacionado con la tecnología y el tipo de tren, y 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.

Las *plazas estándar* de un vehículo se pueden definir de la siguiente forma:

$$P_{es} = S_{ub}^t \cdot \rho^s_{ps}$$

donde:  $P_{es}$  es el número de plazas estándar;  $S_{ub}^t$  es la superficie útil bruta del vehículo ( $m^2$ ); y  $\rho^s_{ps}$  es el *Índice de densidad de plazas y servicios* (plazas estándar/ $m^2$ ). Este índice es propio para cada tipo de servicio<sup>8</sup>.

Se incluye en el cálculo de la *superficie útil bruta* la superficie que se emplea para aseos, plataformas, cafeterías y demás zonas comunes.

Las plazas intervienen en el cálculo del consumo a través de la masa de los viajeros (y en los sumandos del consumo dependientes de ella); en el cálculo de la resistencia de entrada de aire en el vehículo (ya que el caudal de aire renovado para el confort

---

<sup>8</sup> En el documento [7] se emplea esta fórmula para los vehículos destinados a viajar de pie (servicios urbanos), mientras que en los destinados a servicios interurbanos se aplica una fórmula más compleja que se basa en el número de columnas de asientos que es posible albergar en el vehículo. Al no ser el presente estudio de aplicación a otros modos de transporte diferentes del ferrocarril, se aplica la fórmula más simple enunciada, que se basa en la superficie útil bruta y no en el número de columnas de asientos en cada coche.



de los viajeros podría variar dependiendo del número de viajeros) y en las pérdidas debidas al calor sensible y latente de las personas.

### **Cálculo de la superficie útil bruta**

Como se ha expuesto, para el cálculo de la *capacidad estándar* del tren (divisor del indicador específico) se parte de la *superficie útil bruta* ( $S_{ub}^t$ ), que es la superficie en planta del vehículo que puede ser empleada razonablemente por los viajeros y los servicios a éstos, tanto para que viajen sentados o de pie, como para cafeterías, restaurantes, *galleys*, plataformas, aseos, etc.

*Para ilustrar el cálculo de energía emplearemos en cada paso el ejemplo del tren AVE de la serie 103 de Renfe (Velaro de Siemens).*

Para cada tren, es el resultado de multiplicar la “anchura interior del tren” ( $W_{int\_t}$ ) por la “longitud útil” ( $l_{tren}$ , que es el sumatorio de las longitudes útiles de cada coche,  $l_{útil\_coche}$ ) y restar la parte de superficie no utilizable

$$(S_{noútil}) \cdot S_{ub}^t = W_{int\_t} \times \sum_{c=1}^{c=n} l_{útil\_coche} - S_{noútil} = W_{int\_t} \times l_{tren} - S_{noútil}$$

### **Anchura y longitud útiles**

Se entiende por “anchura interior de tren” o “anchura útil” ( $W_{int\_t}$ ) la menor anchura interior en los coches en la zona situada entre 0,5 y 1,5 metros sobre el piso del coche.

*En el caso del tren de la serie 103, la anchura interior útil es de 2,75 metros*

La “longitud útil” de cada coche ( $l_{útil\_coche}$ ) es la longitud entre las caras internas de los testeros del coche. Incluso en coches con paso continuo, se considera hasta la parte interior de los testeros virtuales (no considerando, por tanto, como útil la zona de paso entre coches<sup>9</sup>).

*En el caso del tren de la serie 103, las longitudes útiles de cada coche son las siguientes: coches extremos (1 y 8): 21,2 m; coches intermedios (2 a 7): 23,5 m. La longitud útil total del tren resultante es de 183,4 m.*

No se consideran como parte de la *superficie interior bruta útil*: cabinas de conducción, locomotoras, zonas de motores.

*Por ello, en el tren de la serie 103 no se ha contado en la longitud indicada la de las dos cabinas de conducción.*

### **Superficies a restar**

De la superficie calculada como producto de la anchura interior útil por la longitud interior útil es preciso restar determinadas superficies para conseguir la superficie interior bruta. En concreto, se restan las superficies no útiles ( $S_{noútil}$ ) destinadas a armarios técnicos y la de las zonas en las que la altura libre es menor de 1,9 metros, excepto la zona de equipajes. Si un armario cuya superficie deba ser excluida no ocupa todo el ancho del vehículo, se excluye además la parte proporcional del pasillo.

---

<sup>9</sup> En el documento [7] sí se considera como parte de la superficie útil la situada entre coches en los trenes de pasillo continuo.

En el caso del tren de la serie 103 se descuentan las siguientes superficies, incluyendo la parte proporcional de pasillo: armarios situados en coche 1: 4,1 m<sup>2</sup>; en coche 2: 4,8 m<sup>2</sup>; en coche 3: 4,1 m<sup>2</sup>; en coche 4: 4,1 m<sup>2</sup>; en coche 5: 4,1 m<sup>2</sup>; en coche 6: 4,8 m<sup>2</sup>; en coche 7: 4,8 m<sup>2</sup>; en coche 8: 5,5 m<sup>2</sup>; resultando  $S_{no\acute{u}til} = 36,4 \text{ m}^2$ .

Por tanto la superficie total útil de la serie 103 resultante es:

$$S_{ub}^t = W_{int,t} \times L_{tren} - S_{no\acute{u}til} = 183,4 \times 2,75 - 36,4 = 468 \text{ m}^2$$

No se descuentan los armarios cuando su altura sobre el suelo no supere los 55 cm y además su superficie en planta sea menor de 0,5 m<sup>2</sup>, ya que se entiende que en estos casos se pueden ubicar asientos sobre ellos.

Tampoco se descuentan los armarios cuando su función sea comercial (ej.: racks de vídeo, instalaciones de restauración, etc.).

*Así, en el 103 no se ha descontado la zona dedicada a racks de sistema de audio-vídeo ni los armarios para equipajes, situados ambos en el coche 4. Tampoco se descuentan las instalaciones destinadas a prestar restauración a bordo.*

### Caso de los trenes de dos niveles

Si el tren tiene dos niveles, para el cálculo de la superficie útil bruta, se suman las superficies de los dos pisos, de acuerdo con los criterios anteriores.

Sin embargo, en este caso, entre las superficies a excluir se incluye la proyección en planta de las escaleras en cada uno de los dos pisos.

## 2.3. Incidencia en el consumo de los tipos de servicio y la infraestructura

El consumo de energía y las emisiones no dependen exclusivamente del vehículo, sino también del servicio que presta, ya que un 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, deceleración de servicio, etc.)

Un vehículo puede tener varios *indicadores absolutos* e *indicadores específicos* de consumo y de emisiones (así como diferentes *clases energéticas*): uno para cada uno de los servicios que pueda realizar. Igual ocurre en el caso de los automóviles; para ellos, se definen los ciclos urbanos, interurbanos o mixtos.

Así, por ejemplo, un mismo tren podrá tener unos *indicadores* y *clase* para el servicio de cercanías y otros diferentes para servicios de media distancia.

Por razones prácticas, las variables del servicio (incluyendo tanto las de la infraestructura como las características operativas) se estandarizarán en "ciclos teóricos".

### ➤ Definición de los ciclos teóricos representativos de los servicios

En el proyecto se definen unos *ciclos teóricos* "medios" (de un kilómetro de longitud) representativos de cada uno de los tipos de servicios existentes en el ferrocarril, siendo éstos los siguientes: Tranvía; Metro; Cercanías; Media distancia convencional;

Media distancia altas prestaciones; Larga distancia; Regional de alta velocidad; y Alta velocidad.

Cada uno de estos *ciclos teóricos* está definido de acuerdo con las características reales de la infraestructura de diversas líneas españolas. De esta forma, los ensayos para la comprobación de los consumos se podrían realizar en los tramos reales definidos para cada uno de los tipos de servicio y que son representativos de los parámetros típicos<sup>10</sup>.

*La Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" indica que se pueden emplear dos clases de perfiles de servicio. Perfiles basados en datos reales de una o varias líneas en las que el tren operará o perfiles de servicios tipo, distinguiendo: Suburban, Regional, Intercity (inter-regional) y High Speed (pp. 8-9).*

*En el Anexo B de la Recomendación Técnica están definidos los valores estándar de los servicios tipo (pp. 27-35).*

El usuario puede emplear los servicios definidos por la Especificación Técnica o en el caso de realizar un estudio del ferrocarril español puede ser de mayor interés emplear los servicios tipo aquí definidos.

Se muestra a continuación la correspondencia entre los servicios definidos por la Recomendación Técnica y los empleados en este documento:

<b>UIC</b>	<b>Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario</b>
Suburban	Cercanías
Regional	Media distancia convencional y Media distancia altas prestaciones
Intercity	Larga distancia
High Speed	Regional de alta velocidad y Alta velocidad

Cada uno de estos *ciclos teóricos* de servicio está caracterizado por un conjunto de valores concretos de los parámetros que se recogen en la siguiente tabla. Los parámetros se agrupan en características de la infraestructura, características del servicio y características de los periodos en parado.

---

<sup>10</sup> En la forma de determinar los ciclos, la metodología propuesta en este documento se aparta ligeramente de la propuesta contenida en [1], ya que allí se optaba por definir un tipo teórico, buscar una línea y servicio reales semejantes y redefinir los parámetros del ciclo teórico para que coincidan con la línea representativa. En este caso, se ha ido directamente a buscar la línea representativa, adoptando sus parámetros como los propios del "ciclo teórico".

Tabla 1. Parámetros característicos del servicio

<b>Características de la infraestructura</b>		
Longitud	km	$L_{línea}$
Longitud de túneles	km	$L_{túnel}$
Factor de túnel (Tf)		$T_{t}^s$
Tensión de alimentación	kV	$T_{ae}$
Diferencia del altitud (Hd-Ho)	m	$A_{od}^s$
Coefficiente de curvas	daN/t	$C_c^s$
Exceso específico de altura	mm / km	$E_p^s$
Velocidad media del viento exterior	km/h	$V_{ve}$
<b>Características del servicio</b>		
Velocidad máxima del servicio	km/h	$V_{max}^s$
Velocidad media del servicio (sin paradas)	km/h	$V_{media}^s$
% aprovechamiento s/plazas estándar	%	$A_{pl_{es}}^s$
Densidad de plazas y servicios		$?_{ps}^s$
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		$C_{tv}^s$
Paradas comerciales (sin contar la final)	N <sup>o</sup>	$N_{pc}$
Paradas comerciales equivalentes	N <sup>o</sup>	$N_{pec}$
Paradas técnicas programadas	N <sup>o</sup>	$N_{ptp}$
Paradas técnicas no programadas	N <sup>o</sup>	$N_{ptnp}$
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	N <sup>o</sup>	$N_{perv}$
Tiempo medio parada comercial	min	$T_{pc}^s$
<b>Características de los periodos fuera de servicio</b>		
Tiempo acondicionamiento previo	min	$T_{ap}^s$
% de potencia usada en acondicionamiento previo	%	$P_{ap}^s$
Tiempo en taller y limpieza	min	$T_l^s$
% de potencia usada en limpieza	%	$P_l^s$
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	min	$T_{hi}^s$
% de potencia usada en hibernación	%	$P_{hi}^s$

Fuente: [1] y elaboración propia

La Recomendación Técnica “Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock” define como parámetros requeridos algunas características más del sistema de electrificación (corriente media en pantógrafo y localización de las zonas neutras) (p. 23). Dichos parámetros son necesarios en el caso de calcularse el consumo de energía por integración, pero no lo son con el método definido en este documento.

La Recomendación Técnica indica como parámetros necesarios: perfil de velocidades, perfil de gradientes y características de las curvas. Para facilitar el tratamiento de estos datos en esta metodología se definen los parámetros: paradas equivalentes, exceso específico de altura y resistencia equivalente de las curvas. Estos parámetros requieren alguna explicación o aclaración sobre el concepto que subyace y la forma de su cálculo.

### Parada equivalente por reducción de velocidad

*Parada equivalente por reducción de velocidad* ( $N_{perv}$ ): 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 el cociente entre la parte de la energía cinética disipada en la reducción de velocidad y la energía cinética disipada en una parada, partiendo de la velocidad máxima de la línea.

Este indicador (que puede obtenerse del perfil de velocidades máximas del tren en la línea) 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, cada reducción de velocidad (de  $V_i$  a  $V_f$ ) supone una “fracción de parada equivalente”, que se calcula como

$$f_p = \frac{V_i^2 - V_f^2}{V_{\max}^2 - 0^2}$$

Por ejemplo, si un tren cuya velocidad máxima está limitada por la infraestructura a 200 km/h realiza una reducción de velocidad de 160 km/h a 100 km/h, el número

de paradas equivalentes de esta reducción es  $f_p = \frac{160^2 - 100^2}{200^2 - 0^2} = 0,39$

**Tabla 2. Fracciones de parada equivalente por reducción de velocidad según velocidad y de la limitación**

Fracciones de parada equivalente por reducción de velocidad según velocidad del tren y de la limitación								
Vel. tren	350	300	250	200	160	140	120	100
<b>Limitacion</b>								
<b>300</b>	0,27							
<b>250</b>	0,49	0,31						
<b>200</b>	0,67	0,56	0,36					
<b>160</b>	0,79	0,72	0,59	0,36				
<b>140</b>	0,84	0,78	0,69	0,51	0,23			
<b>120</b>	0,88	0,84	0,77	0,64	0,44	0,27		
<b>100</b>	0,92	0,89	0,84	0,75	0,61	0,49	0,31	
<b>80</b>	0,95	0,93	0,90	0,84	0,75	0,67	0,56	0,36
<b>60</b>	0,97	0,96	0,94	0,91	0,86	0,82	0,75	0,64
<b>50</b>	0,98	0,97	0,96	0,94	0,90	0,87	0,83	0,75
<b>30</b>	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,91

Fuente: Elaboración propia

### Paradas comerciales equivalentes

*Paradas comerciales equivalentes* ( $N_{pec}$ ): cada reducción de velocidad para realizar una parada comercial equivale a una "fracción de parada", que se calcula como el cociente entre la parte de la energía cinética disipada en la reducción de velocidad y la energía cinética disipada en una parada partiendo de la velocidad máxima de la línea. Se considera como velocidad inicial la velocidad de paso por la estación si no se efectuara parada y como velocidad final 0.

Por ejemplo, si un tren de alta velocidad efectúa parada en Córdoba, donde el paso por la estación está limitado a 90 km/h la fracción de parada correspondiente es

$$f_p = \frac{90^2 - 0^2}{300^2 - 0^2} = 0,09$$

Se debe tener en cuenta que la parada final se contabiliza como parada comercial equivalente.

### Exceso específico de altura

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

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

de donde, despejando  $p_e$ , se tiene:

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

El *exceso específico de altura* se define, entonces, como el sumatorio de cada diferencia [en (mm/m)/km] entre la pendiente real ( $p_r$ ) 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 dividido dicho sumatorio por la longitud total del recorrido.

Este indicador 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, al hacer que el parámetro sólo dependa de las características de la infraestructura, se puede partir de la suposición de que los coeficientes específicos de la resistencia al avance (sólo a estos efectos) son semejantes para todos trenes convencionales, y que también son semejantes entre sí, aunque con un valor diferente, para los de alta velocidad. Para el material convencional adoptamos  $a=1,15$  daN/t,  $b=0,01$  daN/[t.(km/h)] y  $c=2,25 \times 10^{-4}$  daN/[t.(km/h)<sup>2</sup>]; y para el de alta velocidad  $a=0,75$  daN/t,  $b=0,0065$  daN/[t.(km/h)] y  $c=1,2 \times 10^{-4}$  daN/[t.(km/h)<sup>2</sup>].

### Resistencia equivalente de las curvas

La *resistencia equivalente de las curvas* ( $C_c^s$ ) es un coeficiente propio de la infraestructura 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.

$$C^s_c = \frac{\sum l_{curva} \times \frac{800}{R_c}}{L_{línea}}$$

Siendo  $l_{curva}$  la longitud de cada una de las curvas de la línea y  $L_{línea}$  la longitud total de la línea.

En líneas de ancho de vía de 1.435 mm, el valor de 800 se sustituye por el de 600.

Aun así, para obtener la resistencia del tren en las curvas debe multiplicarse el valor del producto anterior, además, por una "constante de resistencia en las curvas por rodaje" ( $K^{t_{rodaje}}$ ), que depende exclusivamente de características del material rodante (si se trata de ruedas libres o caladas en un eje, longitud de la base rígida del bogie, distancia entre ejes, etc.) Al ser este coeficiente un parámetro que depende del material, deberá ser estimado o calculado para las características de cada tren.

### Aprovechamiento

El *aprovechamiento* (de las plazas estándar) del servicio se entiende como el cociente entre los viajeros.km transportados y las plazas estándar.km ofrecidas.

Conocer el aprovechamiento es necesario para calcular los viajeros del tren y, con ello, la masa del tren cargado y el consumo de los servicios auxiliares.

También es necesario si se quiere calcular el consumo específico por viajero.km. El aprovechamiento de un tren se puede expresar así:

$$\text{Aprovechamiento}(Plaza\_est) = \frac{\text{viajeros.km}}{\text{plazareales.km}} \times \frac{\text{plazasreales.km}}{\text{plazas\_est.km}} = \frac{\text{viajeros.km}}{\text{plazas\_est.km}}$$

A efectos de este proyecto, el *aprovechamiento* se considera una característica del servicio ( $A^{s_{pl\_est}}$ ).

### El efecto de los sistemas de ayuda a la conducción económica

El estilo de conducción no depende de las características del tren y, por lo tanto, no se considera la conducción económica para calcular el consumo de energía del tren.

Sí se tiene en cuenta, sin embargo, que el tren pueda incorporar sistemas de ayuda a la conducción económica, ya que la existencia de estos sistemas puede permitir un ahorro de energía para un mismo tren y servicio.

Se definen unos coeficientes "ahorro posible por equipos de ayuda a la conducción económica" que sí dependen de los equipos que incorpore el tren y que multiplican la energía que se disipa en el frenado. Como el coeficiente es igual o menor que 1, significa que puede reducirse esta energía disipada en el frenado con independencia de que en ocasiones también puede reducirse la energía regenerada.

**Tabla 3. Valores del coeficiente por equipos para la ayuda a la conducción económica**

<b>Parámetro</b>	<b>Valores</b>
Velocidad forzada	1
Conducción manual no asistida	0,95
Velocidad prefijada sin freno	0,8
ATO optimizado	0,5
Sistema de envío de consignas fijas	0,7
Sistema de envío de consignas variables	0,6

Fuente: Elaboración propia

---



## 3 CÁLCULO TEÓRICO DEL CONSUMO DE UN TREN EN UN SERVICIO TIPO

Combinando los parámetros del tren con los del servicio de que se trate en cada caso, se pueden obtener los *consumos teóricos precalculados*, según el modelo cuyas características se exponen a continuación.

### 3.1. El modelo

El modelo de simulación se basará en el balance de energías del tren:

$$\text{Energía que entra al tren} = \text{Energía que sale del tren} + \text{Pérdidas}$$

Y ello:

- en un recorrido circular (con origen y final en el mismo punto y, por ello, sin diferencia de altitud entre los extremos del recorrido);
- con las características del ciclo teórico de que se trate;
- y con salida y llegada a velocidad de 0 km/h.

La energía que entra en el tren en el recorrido es la suma de:

- energía necesaria para vencer las resistencia al avance en recta y en curva,
- energía perdida en el rendimiento de la cadena de tracción y auxiliares,
- energía disipada en el freno,
- energía consumida por los servicios auxiliares (incluyendo los tiempos de parada asociados al ciclo).

En el caso de los trenes de tracción eléctrica con freno regenerativo, a esta suma hay que restarle:

- energía eléctrica generada en el freno, tanto si se emplea para la alimentación de equipos como si se devuelve a la catenaria o a la red, o si se disipa en las resistencias de frenado por no admitirla la red.

#### ➤ Desarrollo expositivo del modelo

Seguidamente se presentan los parámetros del tren que inciden en el consumo y, en su caso, la forma de precalcularlos.

Ello es necesario para exponer, a continuación, la forma de cálculo de cada uno de los sumandos de la función de consumo a partir de las características del tren que se está evaluando y del servicio en el que se pretende evaluar dicho tren (en las expresiones matemáticas se denotarán con el superíndice "t" las variables que son propias del tren, y con el superíndice "s" las que dependen del servicio).

Una vez calculado (de acuerdo con lo que se expone) el consumo de energía por cada kilómetro recorrido por el tren, para obtener el indicador específico se dividirá el consumo por kilómetro.tren por la capacidad estándar, para de ese modo obtener el consumo por plaza\_equivalente.kilómetro.

## 3.2. Parámetros de diseño del tren que inciden en el consumo de energía

Los parámetros del tren que son necesarios para realizar el cálculo de los indicadores (absolutos y relativos) de consumo pueden clasificarse en dos grupos:

- *primarios*, aquellos que son introducidos por el usuario.
- *calculados*, que son calculados por el modelo a partir de los datos introducidos por el usuario

Seguidamente se expone cuáles son unos y otros y las relaciones entre los primarios y los secundarios.

### ➤ Parámetros primarios

Los parámetros primarios del tren que interviene en el consumo de la energía consumida, directamente, o bien a través de los calculados que se derivan de ellos, son los recogidos en la tabla 4.

### ➤ Obtención de los parámetros del tren calculados

Los parámetros primarios que no se pueden conocer de forma indubitada antes de la construcción del tren se estiman (partiendo de otros parámetros primarios y/o de parámetros secundarios) de la forma que se indica seguidamente.

#### 1. Coeficientes de la resistencia al avance en recta

Los coeficientes A, B y C de la resistencia al avance se estiman de la siguiente forma (Nótese que A y B son diferentes para los diversos tipos de servicio, por ser diferente el número de viajeros que transporta el tren en cada uno de ellos):

##### 1.a. Constante A, del término independiente de la velocidad (resistencias mecánicas), en daN

$$A^t = [(M^t + S^t_{ub} \times \rho^s_{ps} \times A^s_{pl\_est} \times 0,08) \times 0,25] + [7 \times N_e]$$

A efectos prácticos, y sólo para el cálculo de A, se considerará una densidad de plazas y servicios  $\rho^s_{ps}=1$  (plaza/m<sup>2</sup>).

##### 1.b. Constante B, del término dependiente linealmente de la velocidad (resistencia a la entrada de aire) en daN/(km/h).

1.b.1. Si  $K_{entaire}=0$ , que es el caso normal (no se puede regular la entrada de aire al tren en función del número de viajeros reales), entonces la cantidad de aire que entra es proporcional a las plazas de que dispone el tren, ya que al no poder regularse la entrada de aire, para asegurar la necesaria renovación del aire hay que suponer el caso más desfavorable, que es cuando el tren va lleno. Entonces:

$$B^t = \left[ \frac{P_{tren}}{243} + S^t_{ub} \times \rho^s_{ps} \times 1 \times 0,14166 \right] \times 0,034$$

**Tabla 4. Parámetros del tren empleados en el modelo**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Denominación</b>
<b>Características principales</b>		
Velocidad máxima	km/h	$V_{max}^t$
Potencia total del tren	kW	$P_{tren}$
Masa en vacío	t	$M^t$
Masas rotativas equivalentes	t	$M_{rot}^t$
Ancho de vía	mm	$A_{vía}$
Tensión de funcionamiento	kV	
Número de pantógrafos en captación	número	Pant
Plazas reales	plazas	$N_{plazas}$
Vida útil del tren	años	
<b>Dimensiones</b>		
Anchura exterior (media)	m	$W_{ext\_t}$
Altura exterior (máxima)	m	$H_{ext\_max\_t}$
Altura exterior (media)	m	$H_{ext\_med\_t}$
Longitud (total)	m	$L_{tren}$
Anchura del habitáculo de viajeros	m	$W_{int\_t}$
Altura del habitáculo de viajeros	m	$H_{int\_t}$
Longitud habitáculo de viajeros	m	$L_{util\_coche}$
Superficie de ventanas (2 costados)	m <sup>2</sup>	$S_{vent2costados}$
Longitud de puertas (1 costado)	m	$l_{puertas1cost}$
<b>Tracción y freno</b>		
Tipo de motor		
Potencia de cada motor eléctrico de tracción	kW	$P_{mot}$
¿Tiene freno regenerativo?	booleano	
Fuerza máxima del freno eléctrico	kN	$F_{max\_freet}$
Velocidad mínima del freno eléctrico	km/h	$v_{min\_F}$
<b>Rendimientos</b>		
Relación Rendimiento regeneración / Rendimiento en tracción		
<b>Rodadura</b>		
Número de ejes	número	$N_e$
Distancia entre ejes o rodales (vehículos sin bogie) o distancia entre ejes del mismo bogie	m	$D_{ejes}$
Tiene los ejes radiales u orientables (Si=1; No=0)		$K_{rradiales}$
Tiene las ruedas caladas en el eje (Si=0) o tiene ruedas libres (1)		$K_{rlibres}$

Servicios auxiliares		
Procedencia de la alimentación de auxiliares		
¿Tiene aire acondicionado?	<i>booleano</i>	
Coeficiente de transmisión de calor (K)	W/m <sup>2</sup> °C	K
Potencia iluminación	<i>kW</i>	<i>P<sub>iluminación</sub></i>
Potencia total evaporadores (climatización)	<i>kW</i>	<i>P<sub>climatización</sub></i>
Potencia de los auxiliares técnicos	<i>kW</i>	<i>P<sub>técnicos</sub></i>
Características para el ahorro de energía		
¿Tiene dispositivo que regula el aire en función de la ocupación real?	<i>booleano</i>	<i>K<sub>entaire</sub></i>
Coeficiente ahorro climatización (talleres, latencia)	<i>booleano</i>	<i>K<sub>ahorroC</sub></i>
Coeficiente ahorro iluminación (latencia)	<i>booleano</i>	<i>K<sub>ahorroI</sub></i>
Posibilidad de climatización directa	<i>booleano</i>	<i>C<sub>directa</sub></i>
Tiene regulación de la ventilación de los motores en función de la temperatura	<i>booleano</i>	<i>K<sub>VentMotor</sub></i>
Modo de conducción económica		
¿Tiene el primer bogie carenado?	<i>booleano</i>	<i>K<sub>primerBogie</sub></i>

Fuente: [1], [2] y elaboración propia

1.b.2. Si  $K_{entaire}=1$ , (caso ideal en el que el tren dispone de regulación de la entrada de aire que le permite modificar el caudal en función del número de viajeros reales), entonces la entrada de aire es proporcional al número real de viajeros, y por ello a las plazas por el aprovechamiento:

$$B^t = \left[ \frac{P_{tren}}{243} + S_{ub}^t \times \rho_{ps}^s \times A_{pl\_est}^s \times 0,14166 \right] \times 0,034$$

### 1.c. Constante C del término dependiente de la velocidad al cuadrado

La constante C tiene dos sumandos: uno derivado de la presión del aire sobre el tren y otro de la fricción. La primera depende de la superficie transversal por lo que se tiene en cuenta la altura máxima del tren puesto que las motrices y locomotoras suelen tener mayor altura que el resto del tren. La resistencia de fricción depende de la piel del tren, por lo que se tiene en cuenta la altura media del tren.

$$C^t = (W_{ext\_t} \times H_{ext\_max\_t}) \times 0,00096 + \left[ (2 \times H_{ext\_med\_t} + W_{ext\_t}) \times l_{tren} \right] \times 0,000021 + 0,0002 \times P_{ant}$$

## 2. Cálculo de la constante de resistencia en las curvas por rodaje $K^t_{rodaje}$

La constante de resistencia en las curvas por rodaje (que depende del tipo de rodaje del tren) y es adimensional, se calcula de la siguiente forma:

$$K^t_{rodaje} = 1 - 0,2 \times K_{r\text{libres}} + 0,03 \times (D_{ejes} - 3) - 0,4 \times k_{r\text{radiales}}$$

Si un tren tiene diversos  $K^t_{rodaje}$  en sus diferentes vehículos, se calculará el  $K^t_{rodaje}$  del tren como la media ponderada de los valores de los vehículos, ponderando por pares de ejes o rodales.

Tabla 5. Parámetros del tren calculados

Parámetro	Unidad	Denominación
<b>Características principales</b>		
Coefficiente A (resistencia mecánica)	daN	A <sup>t</sup>
Coefficiente B (resistencia entrada de aire)	daN/(km/h)	B <sup>t</sup>
Coefficiente C (resistencia aerodinámica)	daN/(km/h) <sup>2</sup>	C <sup>t</sup>
<b>Rendimientos</b>		
Rendimiento cadena de tracción	kWhs/kWhe	r <sup>t</sup> <sub>t</sub>
Rendimiento de auxiliares	kWhs/kWhe	r <sup>t</sup> <sub>a</sub>
Rendimiento del freno regenerativo	kWhs/kWhe	r <sup>t</sup> <sub>b</sub>
<b>Rodadura</b>		
Constante resistencia curvas por rodaje		K <sub>rodaje</sub>
<b>Servicios auxiliares</b>		
Consumo auxiliares iluminación por hora	kWh/h	
Consumo medio anual aux. calef. a.a. por hora	kWh/h	

Fuente: Elaboración propia

### ➤ Variables parametrizables consideradas independientes del tren

Además de los parámetros que definen los trenes y servicios que se han expuesto anteriormente, se han definido otros *independientes del tren*: se trata de unos parámetros que son iguales para todos los trenes y que se consideran hipótesis de simulación. En este proyecto se han adoptado los valores que se indican en la tabla, pero pueden cambiarse en caso de considerarse necesario en un caso concreto.

Tabla 6. Variables parametrizables consideradas independientes del tren

Parámetro	Unidad	Denominación	Valor
Multiplicador resistencia de curvas para líneas de ancho de vía de 1.435 mm	Coef.	C <sup>s</sup> <sub>c_1435</sub>	600
Multiplicador resistencia de curvas líneas de ancho de vía de 1.668 mm	Coef.	C <sup>s</sup> <sub>c_1668</sub>	800
Volumen de aire que se renueva para los viajeros para horas cálidos y muy cálidos.	m <sup>3</sup> /persona y hora	Q	15
Volumen de aire que se renueva para los viajeros para horas normales, fríos y muy fríos.	m <sup>3</sup> /persona y hora	Q	20
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas muy cálidas	°C	ΔT <sub>MC</sub>	15
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas cálidas	°C	ΔT <sub>C</sub>	10

Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas normales	°C	$\Delta T_N$	2
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas frías	°C	$\Delta T_F$	17
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas muy frías	°C	$\Delta T_{MF}$	22
Horas muy cálidas al año	%	$h_{MC}$	5
Horas cálidas al año	%	$h_C$	20
Horas normales al año	%	$h_N$	60
Horas frías al año	%	$h_F$	10
Horas muy frías al año	%	$h_{MF}$	5
Rendimiento de los equipos de transformación de energía para los servicios auxiliares (equipos eléctricos)		$\rho_{auxelec}$	0.85
Rendimiento de los equipos de transformación de energía para los servicios auxiliares (motores diésel-eléctricos)		$\rho_{auxdiésel}$	$0.35 \times \rho_{auxelec}$
Factor de uso de los auxiliares (a emplear a falta de otros datos)			0.5
Radiación solar	W/ m <sup>2</sup>	$Rad_{solar}$	800
Renovación de aire - horas muy cálidas	m <sup>3</sup> /viajero	$\Phi_{aire\_hMC}$	15
Renovación de aire - horas cálidas	m <sup>3</sup> /viajero	$\Phi_{aire\_hC}$	15
Renovación de aire - horas normales	m <sup>3</sup> /viajero	$\Phi_{aire\_hN}$	20
Renovación de aire - horas frías	m <sup>3</sup> /viajero	$\Phi_{aire\_hF}$	20
Renovación de aire - horas muy frías	m <sup>3</sup> /viajero	$\Phi_{aire\_hMF}$	20
Incremento de humedad específica-horas muy cálidas		$\Delta H_{MC}$	11,77
Incremento de humedad específica-horas cálidas		$\Delta H_C$	7,9
Coeficiente K del cristal		$K_{cristal}$	0.45
Velocidad máxima en deriva /Velocidad máxima del servicio			0.9
Horas al día de funcionamiento del vehículo	horas		10
Coeficiente del consumo de iluminación	kWh/h m <sup>2</sup>	$k_{otros}$	0,05
Velocidad máxima en deriva	km/h	$V_{max\_deriva}^s$	$0,09 \times V_{max}^s$

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Cálculo de la energía consumida para el movimiento del tren

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

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

$$E_{ar}[kWh/km] = (A^t[daN] + B^t[daN/(km/h)] \times V^s_{media}(km/h) + C^t[daN/(km/h)^2] \times ((V^s_{media}[km/h])^2 + \sigma(v)^2) \times [((T^s_f - 1) \times T^s_t[km]) + 1]) \times L_{línea}[km] \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{L_{línea}[km]}$$

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

$$E_{ac}[kWh/km] = L_{línea}[km] \times M^t_{cargado}[t] \times C^s_c[daN/t] \times K^t_{rodaje} \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{L_{línea}[km]}$$

$K^t_{rodaje}$  es un coeficiente que depende del tipo de rodaje de cada tren y es igual o menor que 1.  $C^s_c$  es el coeficiente equivalente de curvas.

$$C^s_c[daN/t] = \frac{1}{L_{línea}[m]} \times \sum l_{curva} \times \frac{800}{R_c[m]}$$

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 ayuda a la *conducción económica* (en un kilómetro medio):

$$E_{redV}[kWh/km] = \left[ (N_{pc} + N_{perv} + N_{ptp} + N_{ptmp}) \times \frac{1}{2} \times (M^t_{cargado}[t] + M^t_{rot}[t]) \times (V^s_{origenP}[km/h])^2 \right] - E_{ravd}[kWh] \times \frac{1}{L_{línea}[km]} \times \frac{1}{3,6^3 \times 10^3}$$

El sustraendo en la expresión anterior corresponde a la energía cinética que se emplea para vencer la resistencia al avance durante el proceso de deceleración; y que, por lo tanto, no se pierde en el freno. La expresión matemática que permite su cálculo (siendo  $d^s_{fs}$  la deceleración del servicio, en m/s<sup>2</sup>) es la siguiente:

$$E_{ravd}[kWh] = \left( \frac{A^t[daN] \times (V^s_{origenP}[km/h])^2}{2 \times d^s_{fs}[m/s^2]} + \frac{B^t \times (V^s_{origenP})^3}{3 \times d^s_{fs}} + \frac{C^t \times (V^s_{origenP})^4}{4 \times d^s_{fs}} \right) \times (N_{pc} + N_{perv} + N_{ptp} + N_{ptmp}) \times \frac{1}{3,6^3 \times 10^3}$$

Donde  $V^s_{origenP}$  es la velocidad origen de las paradas, que se calcula siguiendo el siguiente criterio:

- Si la distancia entre paradas ( $D^s_{pt}$ ) es mayor que 10 kilómetros:

$$V^s_{origenP} = \text{Min}(V^s_{max}; V^t_{max})$$

- Si la distancia entre paradas ( $D^s_{pt}$ ) es menor que 3 kilómetros:

$$V^s_{origenP} = V^s_{media} + 0,25 \times (V^s_{max} - V^s_{media})$$

- Si la distancia entre paradas (Dspt) está entre 3 y 10 kilómetros:

$$V^s_{origenP} = V^s_{media} + 0,35 \times (V^s_{max} - V^s_{media})$$

4. Energía potencial disipada en el freno en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima (en un kilómetro medio)<sup>11</sup>:

$$E_{pend} [kWh/km] = M^t_{cargado} [kg] \times g [m/s^2] \times excAlt [mm/m] \times L_{línea} [km] \times \frac{1}{L_{línea} [km]} \times \frac{1}{3600}$$

siendo *excAlt* el exceso específico de alturas. Este indicador se relaciona directamente con la parte de energía potencial que es disipada en el frenado en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima.

$$excAlt [mm/m] = \frac{\sum (p_{real} - p_{equilibrio}) \times l_{pendiente}}{L_{línea}}$$

5. Energía potencial consumida por diferencia de altitud entre los extremos (en un kilómetro medio)

$$E_{difAlt} [kWh/km] = M^t_{cargado} [t] \times g \times A^s_{od} [m] \times \frac{1}{L_{línea} [km]} \times \frac{1}{3.600}$$

6. Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica debida al viento exterior (en un kilómetro medio):

$$E_{vExt} [kWh/km] = C^t [daN/(km/h)^2] \times (V_{ve} [km/h] \times 0,43)^2 \times L_{línea} [km] \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{L_{línea} [km]}$$

Sumando las expresiones anteriores se obtiene que la energía para el movimiento en llantas (en un kilómetro medio) es:

$$E_{MOV/km} = \frac{E_{ar}}{L_{línea}} + \frac{E_{ac}}{L_{línea}} + \frac{E_{redV}}{L_{línea}} + \frac{E_{pend}}{L_{línea}} + \frac{E_{difAlt}}{L_{línea}} + \frac{E_{vExt}}{L_{línea}}$$

### 3.4. Pérdidas en la cadena de tracción

Las pérdidas de energía que se producen en la cadena de tracción se deben sumar, como se ha expuesto, para calcular la energía consumida. El efecto de estas pérdidas se modela a través del "rendimiento", entendiendo por tal el cociente entre la energía que sale del sistema y la energía que entra al mismo, es decir:

$$\rho^t_i = \frac{E_s}{E_e} = \frac{E_e - \text{pérdidas}}{E_e}$$

Conocido el rendimiento de la cadena de tracción, se obtiene la energía importada en el pantógrafo por kilómetro:

---

<sup>11</sup> Véase para más detalle el documento [2].



$$E_{Pant/km} = \frac{E_{MOV/km}}{\rho_b^t} = \frac{\frac{E_{ar}}{L_{línea}} + \frac{E_{ac}}{L_{línea}} + \frac{E_{redV}}{L_{línea}} + \frac{E_{pend}}{L_{línea}} + \frac{E_{difAlt}}{L_{línea}} + \frac{E_{vExt}}{L_{línea}}}{\rho_b^t}$$

Se consideran pérdidas en la cadena de tracción las que se producen entre pantógrafo y llantas, pero no el consumo de los auxiliares técnicos del tren.

### ➤ Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica

Como rendimientos de la cadena de tracción se considerará el producto del rendimiento de los motores, del convertidor y de las reductoras.

El rendimiento de motor se presumirá en función del tipo de motor, de su forma de alimentación y de la potencia nominal de cada motor de tracción (no de la potencia total del tren).

Para el freno regenerativo se supone el mismo rendimiento que para la tracción.

Se parte, como referencia, de los rendimientos del motor ofrecidos en [6] y en [4], ajustados con retoques obtenidos de medidas de Metro de Madrid y Renfe-Cercanías.

Los valores adoptados son los recogidos en las tablas:

**Tabla 7. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua**

	<b>Motor cc (500Kw)</b>	<b>Motor cc (1500Kw)</b>	<b>Síncrono ac (500Kw)</b>	<b>Síncrono ac (1500Kw)</b>	<b>Asíncronos ac</b>	<b>Imanes permanentes</b>
Transformador	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Convertidor	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Motor	0,915	0,935	0,93	0,945	0,95	0,98
Reductora (2 etapas)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
<b>Rendimiento Total</b>	<b>0,86998</b>	<b>0,88899</b>	<b>0,8932</b>	<b>0,9076</b>	<b>0,9124</b>	<b>0,94119</b>

Fuente: Elaboración propia

Aunque los motores de corriente continua no tienen transformador es necesario contemplar las pérdidas en el filtro, ya que éstas no han sido consideradas en el convertidor. Este valor depende del diseño del propio filtro y repercute en mayor o menor medida en diversos factores que dan lugar a efectos contrapuestos: peso de la inductancia, volumen ocupado, consumo de auxiliares para su refrigeración y pérdidas en la inductancia.

**Tabla 8. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente alterna**

	<b>Motor c.c. (500Kw)</b>	<b>Motor c.c. (1500Kw)</b>	<b>Síncrono c.a. (500Kw)</b>	<b>Síncrono c.a. (1500Kw)</b>	<b>Asíncronos c.a.</b>	<b>Imanes permanentes</b>
Transformador	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>	<b>0,943</b>
Convertidor	0	0	0,97	0,97	<b>0,97</b>	0,97
Motor	0	0	0,93	0,945	<b>0,95</b>	0,98
Reductora (2 etapas)	0	0	0,98	0,98	<b>0,98</b>	0,98
<b>Rendimiento Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,8337</b>	<b>0,8471</b>	<b>0,8516</b>	<b>0,8785</b>

Fuente: Elaboración propia

Para valores de la potencia de los motores situados entre los indicados se interpolará el valor entre los dos más próximos. Si es inferior al valor mínimo (500 kW) se figurará el valor del mínimo, y si es superior al máximo (2.000 kW) se figurará el valor máximo.

### ➤ Rendimientos en el vehículo de tracción diésel

Para la tracción diésel, se considera como rendimiento de la cadena de tracción el producto del rendimiento del motor diésel, de la transmisión y de las reductoras.

Los datos de partida se han tomado del trabajo [5] en la parte correspondiente a la tracción diésel. Se han ajustado, para este proyecto, en la parte correspondiente a los rendimientos de los motores eléctricos de tracción en el caso de las transmisiones eléctricas, a fin de lograr coherencia con los rendimientos de los motores eléctricos en la tracción eléctrica.

Los valores que se presumen para los diversos tipos de transmisión son los recogidos en la tabla.

**Tabla 9. Rendimientos en el vehículo de tracción diésel**

	<b>T. Mecánica</b>	<b>T. Hidráulica</b>	<b>T. Eléctrica c.c.</b>	<b>T. Eléctrica c.a.</b>
Motor	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>
Transmisión	0,95	0,82	0,81	0,9
Reductor	0,98	0,98	0,98	0,98
<b>Rendimiento Total</b>	<b>0,3538</b>	<b>0,3054</b>	<b>0,3016</b>	<b>0,3352</b>

Fuente: Elaboración propia

## 3.5. Cálculo de la energía consumida por los servicios auxiliares

En este documento, para el cálculo de la energía consumida por los servicios auxiliares se distinguen dos procedimientos, uno específico para los trenes con una elevada longitud de puertas por unidad de superficie, típicamente cercanías y metropolitanos, y otro para el resto.

Así, la energía consumida para el funcionamiento de los servicios auxiliares para los ferrocarriles que no efectúan muchas paradas se calcula en tres etapas:

1. En primer lugar se calcula **el consumo de energía útil (por hora) para los diferentes usos**. Es decir, la realmente perdida en los usos atendidos por los servicios auxiliares.
2. Seguidamente (una vez calculada la energía útil necesaria) **se calcula la energía necesaria a la entrada del vehículo** (por hora), que es el resultado de sumar (a la energía útil) la energía perdida en los diversos procesos de transformación de la energía dentro del tren; es decir, la perdida por los rendimientos de los equipos que intervienen en la cadena de tracción y en la alimentación de los servicios auxiliares (convertidor, equipos de aire acondicionado, grupos motor-alternador, etc.). El coeficiente de pérdidas es diferente según la alimentación de los equipos auxiliares sea directamente de la catenaria o a través de un grupo diésel motor-generador (valores parametrizables).
3. Finalmente se calcula el consumo indirecto de auxiliares, para lo que se multiplica la energía consumida por hora en cada una de las fases del servicio del vehículo diferentes del movimiento (paradas comerciales, taller y limpiezas, latencia) por el número de horas de la fase correspondiente y, en su caso, por los coeficientes de ahorro.

*Para el cálculo del consumo de los servicios auxiliares de confort, la Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" propone emplear las horas de funcionamiento de los equipos y un porcentaje de uso de la potencia instalada (p. 13). Esta forma de cálculo es útil para obtener un valor aproximado del consumo; sin embargo, puesto que el consumo de los equipos auxiliares en el ferrocarril es cada vez más relevante, parece interesante realizar este cálculo con mayor precisión. Por ello, en la presente metodología se propone en método detallado para el cálculo del consumo de los auxiliares comerciales.*

### ➤ Cálculo de la energía útil para los auxiliares

La energía útil para los servicios auxiliares se divide en tres sumandos:

#### Energía necesaria para calefacción y aire acondicionado

Es la media ponderada de la consumida en cinco tipos de horas: "hora muy cálida", "hora cálida", "hora normal", "hora fría" y "hora muy fría".

$$C_{auxCI/km} = \frac{k_{ac} \times (C_{auxC\_hMC} \times h_{MC}) + k_{ac} (C_{auxC\_hC} \times h_C) + k_{ac} (C_{auxC\_hN} \times h_N) + (C_{auxC\_hF} \times h_F) + (C_{auxC\_hMF} \times h_{MF})}{100}$$

El factor  $k_{ac}$  del tren indica si tiene aire acondicionado; en caso negativo, no cuantifica el consumo de auxiliares de climatización de días muy cálidos, cálidos y normales.

Cada uno de ellos es el sumatorio del consumo de auxiliares de calefacción y aire acondicionado por horas tipo  $hX$  = ganancia radiación solar por horas tipo, ganancia de transmisión por horas tipo, ganancias infiltración y ventilación por horas tipo y ganancias internas por horas tipo, es decir,

$$C_{auxC\_hX} = Q_{r\_hX} + Q_{t\_hX} + Q_{v\_hX} + Q_{i\_hX} ,$$

siempre que se trate de horas muy cálidas, cálidas y normales.

Si las horas son frías y muy frías, el consumo de auxiliares sería como sigue:

$$C_{auxC\_hX} = Q_{t\_hX} + Q_{v\_hX} + Q_{i\_hX}$$

El detalle de este cálculo se explica más adelante.

La diferencia en consumo de auxiliares de calefacción y aire acondicionado en horas cálidas, normales y frías, se deriva de la diferencia entre la temperatura exterior y la interior ( $\Delta T$ ), que es distinta para cada tipo de hora (valor parametrizable).

La fórmula del consumo es la misma en horas "muy cálidas", "cálidas" y "normales" (con valores diferentes del  $\Delta T$ ); pero no así en horas "frías" y "muy frías", ya que durante estas horas en las "ganancias internas" hay que tener en cuenta que la temperatura de las personas es superior a la temperatura exterior. Por ello, la energía aportada por el calor de las ganancias internas (debidas en su mayor parte al calor sensible de los viajeros) hay que restarla en lugar de sumarla.

Por otra parte, en las horas "frías" y "muy frías" no se considera el efecto de la radiación solar, que sí se considera en horas "normales", "cálidas" y "muy cálidas".

Los valores referentes al caudal de renovación de aire se han tomado de la Ficha UIC 553 ("Heating, ventilation and air-conditioning in coaches"): si la temperatura exterior está comprendida entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $+26^{\circ}\text{C}$ , se considera un caudal de aire de entrada de  $20\text{m}^3 / \text{h}$  por persona. Si la temperatura del exterior es superior a  $+26^{\circ}\text{C}$ , entonces el caudal de aire considerado es  $15\text{m}^3 / \text{h}$  por persona (valores parametrizables).

Los cálculos para horas muy cálidas, cálidas y normales son:

Ganancia radiación solar: (horas muy cálidas, cálidas y normales)

$$Q_{r\_hX} = \left( \frac{S_{vent2costados}}{2} \times K_{cristal} \times Rad_{Solar} + \left( L_{\acute{u}til\_coche} \times H_{int\_t} - \frac{S_{vent2costados}}{2} \right) \times K \times (\Delta T_X + 16) + L_{\acute{u}til\_tren} \times W_{int\_t} \times 0,8 \times K \times (\Delta T_X + 25) \right) / 1000$$

Ganancia transmisión: (horas muy cálidas, cálidas y normales)

$$Q_{t\_hX} = \left( \left( S_{vent2costados} + L_{\acute{u}til\_tren} \times H_{int\_t} - \frac{S_{vent2costados}}{2} + L_{\acute{u}til\_tren} \times W_{int\_t} \times 0,2 + L_{\acute{u}til\_tren} \times W_{int\_t} \right) \times K \times \Delta T_X \right) / 1000$$

Ganancia infiltración y ventilación: (horas muy cálidas, cálidas y normales)

$$Q_{v\_hX} = \left( (\Phi_{aire\_hX} \times N_{plazas} \times A_{pl\_es}^s \times \Delta T_X \times 0,335) + (\Phi_{aire\_hX} \times N_{plazas} \times A_{pl\_es}^s \times \Delta H_X \times 0,82) \right) / 1000$$

Ganancia interna: (horas muy cálidas, cálidas y normales)

$$Q_{i\_hX} = \left( Pot_{ilu\ min\ aci\ on} + Pot_{evaporador\ es} + (N_{plazas} \times A_{pl\_es}^s \times (69,38 + 46,36)) \right) / 1000$$

Los valores 69,38 y 46,36  $\frac{W}{persona}$  corresponden al calor sensible y al calor latente de una persona, respectivamente.

Los cálculos para horas muy frías y frías son:

Ganancia transmisión: (horas muy frías y frías)

$$Q_{t\_hX} = \left( \left( S_{\text{vent2costados}} + \left( L_{\text{útil\_tren}} \times H_{\text{int\_t}} - \frac{S_{\text{útil\_tren}}}{2} \right) \times 2 + L_{\text{útil\_tren}} \times W_{\text{int\_t}} \times 0,2 + L_{\text{útil\_tren}} \times W_{\text{int\_t}} \right) \times K \times \Delta T_X \right) / 1000$$

Ganancia infiltración y ventilación: (horas muy frías y frías)

$$Q_{v\_hX} = (N_{\text{plazas}} \times A_{\text{pl\_es}}^s \times \Phi_{\text{aire\_dX}} \times \Delta T_X \times 0,335) / 1000$$

Ganancia interna: (horas muy frías y frías)

$$Q_{i\_hX} = (P_{\text{iluminación}} + P_{\text{evaporadores}} + (N_{\text{plazas}} \times A_{\text{pl\_es}}^s \times 69,38)) / 1000$$

En el caso de que la temperatura de consigna sea similar a la temperatura exterior, los trenes podrían realizar lo que se conoce como enfriamiento o calentamiento gratuito, es decir, climatizar directamente el aire exterior. Si no disponen de esta característica, al consumo total de climatización se le sumará la cuarta parte del consumo en horas muy cálidas, donde t es 1 hora.

$$C_{\text{auxC}} = C_{\text{auxCl/km}} + (1 - C_{\text{directa}}) \times \frac{C_{\text{auxC\_hMC}}}{4} \times t$$

Para trenes con una elevada longitud de puertas por unidad de superficie, no se aplica el coeficiente térmico, puesto que el volumen de aire que entra y sale al vehículo en las paradas es muy elevado. En esta versión el consumo de auxiliares de climatización se modela como un porcentaje de la potencia instalada de los equipos auxiliares (66%).

Se considera que es necesario calcular el consumo de auxiliares de este modo cuando se cumple que:

$$\frac{l_{\text{puertas1cost}}}{S_{\text{ub}}^t} > \frac{2,6}{75}$$

Por tanto:

$$C_{\text{auxC}} = P_{\text{auxComerciales}} \times 0,66$$

**Energía necesaria para el resto de los servicios auxiliares comerciales (iluminación, cafetería, etc.):** esta energía se modela como el producto de la superficie bruta útil del tren por un coeficiente, igual para todos los trenes y parametrizable. En este trabajo se ha tomado por defecto el valor 0,05 kWh/h·m<sup>2</sup>.

**Energía necesaria para los auxiliares técnicos (ventiladores de equipos de tracción, compresores, cargador de baterías, etc.):** se modela como el producto de la potencia de los servicios auxiliares técnicos de uso por los motores en función de la temperatura. A dicho coeficiente se le asigna el valor de 0,6 si el motor dispone de regulación para su ventilación, y 0,7 si no dispone de regulación (valores parametrizables). Los equipos técnicos que se han considerado son el compresor, el cargador de baterías, los ventiladores de los equipos de tracción y el refrigerador del transformador.

## ➤ Detalle del cálculo

### Cálculo de la energía útil de auxiliares de calefacción y aire acondicionado por hora

El consumo de energía útil por los servicios auxiliares de calefacción y aire acondicionado, por hora, se calculará para cada hora tipo en función de:

- volumen de aire a acondicionar (dimensiones características del material rodante);
- coeficiente de transmisión del calor  $K$  (característica de aislamiento del tren);
- superficies del tren (de ventanas y parámetros ciegos en sus diferentes partes, es decir, costado, techo, extremos, etc.);
- número de personas en el tren (característica del servicio);
- volumen de aire que se renueva ( $Q$ , en  $m^3$ /persona y hora), que se supone igual para todos los trenes y servicios, y que a los efectos de este proyecto estimaremos en  $15 m^3/h$  por persona en horas muy cálidas y cálidas, y  $20 m^3/h$  por persona en horas normales, frías y muy frías (valor parametrizable); y
- diferencia entre la temperatura media exterior y la temperatura de consigna ( $\Delta T$ , valor que se supone igual para todos los trenes y servicios y que a los efectos de este proyecto se toma como  $\Delta T=15^\circ C$  en horas muy cálidas,  $\Delta T=10^\circ C$  en horas cálidas,  $\Delta T=2^\circ C$  en horas normales,  $\Delta T=17^\circ C$  en horas frías y  $\Delta T=22^\circ C$  en horas muy frías, valores parametrizables).
- La energía necesaria para la calefacción y el aire acondicionado se considera diferente si el tren tiene dispositivo regulador de la entrada de aire en función de la ocupación o si no lo tiene.

$$E_{Uauxca} = \frac{L_{Linea}}{V_{mediaConParadas}^S} \times C_{auxC}$$

### Energía para servicios auxiliares de iluminación y otros servicios auxiliares comerciales

La energía útil necesaria para alimentar la iluminación y otros servicios auxiliares ( $E_{Uotros}$ ) es:

$$E_{Uotros} = \frac{L_{Linea}}{V_{mediaConParadas}^S} \times (S'_{ub} \times 0,05)$$

### Energía necesaria para los auxiliares técnicos

La energía útil necesaria para alimentar los auxiliares técnicos, es decir, los compresores, el cargador de baterías, los ventiladores y los equipos de refrigeración de ventilación ( $E_{Utécnicos}$ ) es:

$$E_{Utécnicos} = Pot_{auxTécnicos} \times K_{VentMotor} \times \left( \frac{L_{Linea}}{V_{mediaConParadas}^S} \right)$$

Si existe regulación de la ventilación de los motores en función de la temperatura,  $K_{VentMotor}$  es igual a 0,6; si no, se considera 0,7.

### Energía para auxiliares necesaria a la entrada del vehículo

La energía necesaria a la entrada del vehículo para proporcionar esta energía útil se estima de la siguiente forma:

$$E_{AUX} = \frac{E_{Uaux}}{\rho_{auxelec} - 0 - \rho_{auxdiesel}} = \frac{E_{Uauxca} + E_{Uotros} + E_{Utécnicos}}{\rho_{auxelec} - 0 - \rho_{auxdiesel}}$$

Donde  $\rho_{auxelec}$  o  $\rho_{auxdiésel}$  es el rendimiento de los equipos de transformación de energía para los servicios auxiliares.

Se adoptan en este proyecto como valores parametrizables de dicho rendimiento los siguientes valores:

- En los vehículos de tracción eléctrica en los que los auxiliares se alimentan de la catenaria se adopta el valor  $\rho_{auxelec} = 0,85$  (valor parametrizable).
- En los vehículos en los que la energía para auxiliares sea producida por motores diésel embarcados,  $\rho_{auxdiésel} = 0,85 \times 0,35$  (coeficiente parametrizable).

### ➤ Energía total necesaria, por kilómetro, para servicios auxiliares

La energía total consumida por los servicios auxiliares, por kilómetro de recorrido comercial, se calcula sumando los productos de la energía consumida en cada una de las fases del ciclo (movimiento, paradas comerciales; rotación, talleres y latencia) y multiplicándolo por la duración de cada una de estas fases):

$$E_{AUX/km} = \frac{(E_{Uauxca} + E_{Uotros} + E_{Utécnicos})}{\rho_{aux} \times L_{Linea}} + \frac{(E_{Uauxca} + E_{Uotros} + E_{Utécnicos})}{(T_{pcr} + T_{tyl} + T_{lat}) \times L_{Linea}} \times \left[ 1 \times T_{rot} + K_{auxtaller} \times T_{tyl} + K_{auxlat} \times T_{lat} \right]$$

### ➤ Energía consumida por los servicios auxiliares en los periodos fuera de servicio

Los periodos fuera de servicio son aquellos en los que los trenes permanecen parados en depósitos o talleres sin tripulación ni viajeros a bordo. Durante estos tiempos algunos servicios auxiliares pueden estar en funcionamiento.

- Se define el "Tiempo de acondicionamiento previo" ( $T_{sap}$ ) como el tiempo previo a la subida de los viajeros en el que se conectan los equipos de climatización para alcanzar la temperatura adecuada.
- Los "Tiempos en taller y limpieza" ( $T_{si}$ ) son tiempos en los que el tren permanece en el taller para operaciones de limpieza y mantenimiento. Durante dichas operaciones, algunos equipos auxiliares permanecen en funcionamiento (por ejemplo, la iluminación), y hay otros consumos por conexión de aparatos (aspiradores...), aunque -por no haber viajeros- no sería necesario, por ejemplo, que permaneciesen encendidos los equipos de aire acondicionado y calefacción.
- El "Tiempo de estacionamiento" (o hibernación) ( $T_{shi}$ ) es el tiempo en que el tren se encuentra estacionado y sin viajeros, por lo que no es necesario que los equipos auxiliares permanezcan encendidos, aunque en algunos casos no interesa apagarlos totalmente. Se define en función del servicio y no del material.

d. El "Tiempo de rotaciones" ( $T_{ro}$ ) es el tiempo comprendido entre el final de un servicio y el comienzo de siguiente al llegar un tren a la cabecera de la línea, o desde el final del servicio y el paso a taller o viceversa. Durante este tiempo el tren se encuentra parado (velocidad = 0 km/h) con todos los servicios auxiliares en funcionamiento, porque hay o puede haber viajeros.

*La Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock" indica valores para estos tiempos por día (p. 14) que son los que en esta metodología se emplearán en caso de no contarse con valores reales.*

Parámetro	Valor
Tiempo acondicionamiento previo	30 min/día y 60 min/día para cercanías
Tiempo en taller y limpieza	60 min/día
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	24 horas en operación - Tiempo de acondicionamiento previo - Tiempo en taller y limpieza

*Según dicha Recomendación, el cálculo del consumo de los equipos auxiliares en esos periodos se debe hacer en función de un porcentaje de la potencia instalada. Si no se tienen otros valores se pueden emplear:*

Parámetro	Valor
% de potencia usada en acondicionamiento previo	80
% de potencia usada en taller y limpieza	30
% de potencia usada en estacionamiento (hibernación)	10

Aunque la recomendación técnica establece estos tiempos por día, en esta metodología se prefiere hacerlo por servicio.

Se han definido dos coeficientes que reflejan el efecto de los dispositivos de ahorro de energía:

- Coeficiente ahorro climatización (talleres, hibernación) ( $K_{ahorroC}$ ), que puede adoptar el valor de 0 (caso normal) o de 1 si dispone de un dispositivo que regula el consumo energético del equipo de climatización cuando el tren se encuentra en la fase de taller o en la de hibernación. Este coeficiente implica que el equipo de climatización se apaga en estos periodos, aunque sigue funcionando la iluminación.
- Coeficiente ahorro iluminación (hibernación) ( $K_{ahorroI}$ ), si dispone de un dispositivo que regule el consumo energético del equipo de iluminación cuando el tren se encuentra en la fase de hibernación. En concreto, si dispone de este equipo se supone que el tren no tiene consumos de iluminación mientras está en estado de hibernación.



## 3.6. Cálculo y efecto de la energía eléctrica regenerada por el freno regenerativo

En el caso de que el tren cuente con freno regenerativo hay que restar (de la energía recibida), la energía eléctrica producida por el freno regenerativo.

Desde luego, no toda la energía se aprovecha, pues en las líneas electrificadas en corriente continua que no están dotadas de subestaciones reversibles que permiten la devolución a la red, la energía excedente que no es aprovechada por otros trenes se quema en el freno reostático. Pero el hecho de que parte de esta energía se aproveche o no, es algo que no depende del tren, sino de que haya o no haya subestaciones reversibles, y en el caso de que no las haya, de que haya otros trenes demandando energía.

*Tal y como indica la Recomendación Técnica "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock", el cálculo de la energía consumida por trenes de tracción eléctrica que disponen de freno regenerativo se debe medir:*

- en líneas electrificadas en corriente alterna: energía neta en pantógrafo. La energía devuelta (de signo negativo) no debe tener más factores de reducción que el impuesto por el equipo de tracción (si, por ejemplo, una parte de la energía de freno regenerativo es sistemáticamente quemada en resistencia incluso en modo regenerativo);

- en línea electrificadas en corriente continua: se deben realizar dos cálculos: el primero en las mismas condiciones que en corriente alterna; el segundo, con toda la energía consumida en el frenado en el vehículo sin considerar la energía devuelta. Estos dos resultados corresponden a frenado regenerativo puro y a frenado reostático puro (p. 13).

### ➤ Energía eléctrica disipable en el freno

Siguiendo el principio de que únicamente deben tenerse en cuenta para el cálculo del consumo los factores que dependen del tren y considerando que el grado de aprovechamiento de la energía regenerada tenderá a subir en el futuro, se resta la energía regenerada en su totalidad, tanto si efectivamente es aprovechada por otro tren como si es devuelta a la red o si se disipa en el freno reostático<sup>12</sup>.

### Energía cinética y potencial disipable en el freno

Tal y como se ha expuesto, la totalidad de la energía cinética y potencial disipada en el freno se obtiene de la siguiente expresión:

$$E_{fr} (kWh) = [(N_{pc} + N_{perv} + N_{pip} + N_{pinp}) \times \frac{1}{2} \times (M^{t_{cargado}} [t] + M^{t_{rot}} [t]) \times (V^s_{origenP} [km/h])^2 - E_{ravid} + M^{t_{cargado}} [kg] \times g [m/s^2] \times excAlt [mm/m] \times L_{línea} [km] \times \rho'_{b}$$

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 una parte de la deceleración se consigue con la resistencia al avance (el sustraendo  $E_{ravid}$  en la fórmula anterior descuenta esta energía que no se disipa en el freno).

<sup>12</sup> En este punto, como ya se ha indicado, la solución adoptada en este proyecto se separa de la sugerida en los documentos [1] y [2], en los que sólo se suponía aprovechada, en corriente continua, una parte de la energía eléctrica regenerada.

### **Energía disipable en freno neumático a muy baja velocidad**

Pero no toda la energía disipada en el freno puede convertirse en electricidad con el freno regenerativo, 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 (al menos parcialmente) el freno regenerativo hasta una velocidad mínima ( $V_{minF\_motorxx}$ ) a partir de la cual emplean únicamente el freno neumático.

La fórmula de la energía eléctrica regenerable se convierte entonces en:

$$E_{fr}(kWh) = [(N_{pc} + N_{perv} + N_{ptp} + N_{ptmp}) \times \frac{1}{2} \times (M^t_{cargado}[t] + M^t_{rot}[t]) \times (V^s_{max\_deriva}[km/h] - V^t_{min\_F}[km/h]) - E_{ravid} + M^t_{cargado}[kg] \times g[m/s^2] \times excAl[mm/m] \times L_{linea}[km] \times \rho^t_b$$

siendo  $V_{min\_F}$  el límite inferior de velocidad que se usa en el freno eléctrico. En este proyecto se ha adoptado, por convenio, 5 km/h para aquellos trenes con motores de corriente alterna, y 15 km/h para trenes con motores corriente continua, siendo ambos valores parametrizables.

### **Energía disipable en el freno neumático por encima de la muy baja velocidad**

Incluso por encima de la velocidad  $V_{minF}$ , una parte de la energía disipada en el freno puede ser disipada por el freno neumático, ya que la fuerza del freno eléctrico puede no ser suficiente para lograr la deceleración de servicio y, por ello, actúan a la vez el freno eléctrico y el freno neumático.

La parte de la energía disipada por el freno eléctrico puede expresarse así:

$$E_{fr}(kWh) = [(N_{pc} + N_{perv} + N_{ptp} + N_{ptmp}) \times \frac{1}{2} \times (M^t_{cargado}[t] + M^t_{rot}[t]) \times (V^s_{max\_deriva}[km/h] - V^t_{min\_F}[km/h]) - E_{ravid} + M^t_{cargado}[kg] \times g[m/s^2] \times excAl[mm/m] \times L_{linea}[km] \times \rho^t_b \times B^{t,s}_r$$

donde  $B^{t,s}_r$  es el porcentaje de la energía de freno que, por encima de la velocidad  $V_{minF}$ , va al freno eléctrico.

$B^{t,s}_r$  depende de la potencia del freno eléctrico (que es propia del tren) y de la deceleración de servicio ( $d_{fs}^s$ ) que se aplique al tren (que es propia del tipo de servicio).

$B^{t,s}_r$  se calcula así:

$$B^{t,s}_r = \frac{\int F_{rlect} \times dl}{E_{fr}} = \frac{F^t_{max\_frlect} / 2}{(M^t_{cargado} + M^t_{rot}) \times d_{fs}^s}$$

La fuerza máxima del freno eléctrico se divide entre 2 para considerar la fuerza media del freno eléctrico, pues la fuerza máxima del freno sólo se aplica a bajas velocidades, y en realidad la fuerza es creciente a medida que se reduce la velocidad.

### **Energía regenerada aprovechada por los servicios auxiliares**

Se supone que una parte de la energía devuelta va a alimentar los servicios auxiliares del tren. Esta parte se calcula multiplicando el tiempo en el que el vehículo está frenando por la potencia instalada de auxiliares y por un "factor de uso de los auxiliares" a determinar, pero fijo. En este proyecto se adopta el factor de uso 0,5, pero se mantiene como un parámetro del modelo que puede cambiarse. Energía total consumida por el tren por plaza estándar.kilómetro.

A la vista de las expresiones anteriores, el indicador de consumo de energía específico de un tren es el que resulta de la expresión siguiente:

$$E = \frac{E_{pant} + E_{aux} - E_{gen}}{P_{es}}$$

donde  $E$  se expresa en tracción eléctrica en kWh/plaza estándar.kilómetro, y en tracción diésel en litros de gasóleo/plaza estándar.kilómetro.

## 3.7. Cálculo de la energía primaria y las emisiones

Una vez calculado el consumo de energía neto, se puede obtener el consumo aguas arriba multiplicando el resultado por los coeficientes de pérdidas correspondientes. De este modo se puede calcular:

- El consumo de energía a la entrada de la subestación (tracción eléctrica) es la energía neta multiplicada por el coeficiente de pérdidas en la red eléctrica ferroviaria que depende de la tensión de electrificación. Para tracción diésel se multiplica por 1.

$$E_{sub\_bgas} = E_n \times C_{red}$$

- El consumo en barras de la central de generación (tracción eléctrica) es el consumo a la entrada de la subestación multiplicado por el coeficiente de pérdidas en el transporte y distribución de la electricidad. En el caso de tracción diésel se multiplica por 1.

$$E_{bc} = E_{sub\_bgas} \times C_{tyd}$$

- El consumo de energía primaria es el consumo en barras de la central de generación (tracción eléctrica) multiplicado por el coeficiente que relaciona los kWh generados con los primarios. Para tracción diésel se multiplica por las pérdidas desde el pozo de petróleo a la entrada del vehículo.

$$E_p = E_{bc} \times C_p$$

- El consumo de energía fósil en tracción eléctrica es la energía consumida en barras de la central multiplicada por el coeficiente que relaciona kWh primarios de origen fósil con los generados. En el caso de tracción diésel toda la energía consumida es de origen fósil.

$$E_f = E_{bc} \times C_f \text{ (tracción eléctrica)}$$

$$E_f = E_p \text{ (tracción diésel)}$$

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> se calculan en barras de la central de generación (tracción eléctrica) o a la entrada del vehículo (tracción diésel) multiplicando los kWh consumidos por los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por kWh.

$$Em_{CO_2} = E_{bc} \times C_{emi}$$

## **Factores de emisión y de pérdidas para homogeneizar las comparaciones**

Tanto para comparar trenes diésel con eléctricos, o trenes eléctricos de diferentes tensiones, se ha recurrido a los resultados de diferentes monografías del proyecto de Investigación EnerTrans<sup>13</sup>:

- a) así, en [8] se describe el ciclo de la energía según el tipo de tracción y se incluye una explicación cualitativa de las pérdidas de energía y de las emisiones, lo que permite identificar cuáles son los factores que deben tenerse en cuenta en cada una de las comparaciones;
- b) en [9] se presentan los factores de emisión del gasóleo (y de otros combustibles derivados del petróleo y del gas), así como las pérdidas de energía que se producen antes de llegar al vehículo;
- c) en [10] se calculan los factores de emisiones y de pérdidas en la generación de electricidad (particularizados para el caso español), así como las pérdidas de energía en el transporte y distribución de electricidad según el nivel de tensión en que funcione el tren.

---

<sup>13</sup> El Proyecto de investigación EnerTrans (*Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte, que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte*) tuvo el objetivo de obtener un modelo ajustado para conocer el consumo de energía (y sus emisiones asociadas) del sistema español de transporte, en función de las variables relevantes de las que depende. Con él se pretendía superar la necesidad de extrapolar series históricas y calculadas con metodologías diversas en el ámbito europeo para cada modo de transporte. En el proyecto participaron entidades de naturaleza diversa y ligadas a distintos modos de transporte: la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, la Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, la Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, la Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, la Fundación Agustín de Betancourt y la Fundación Universidad de Oviedo. El proyecto EnerTrans contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).



## 4 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CONSUMO

Hasta el capítulo anterior se ha determinado exclusivamente, y como objeto básico del proyecto, el consumo que va a tener en un tren medido en kilovatios.hora o litros de gasóleo por plaza estándar.kilómetro. También puede obtenerse el consumo (en litros de gasóleo o en kilovatios.hora) por kilómetro.tren, multiplicando el indicador anterior por el número de plazas estándar. Esto es suficiente para especificar las prestaciones de los trenes en un proceso de selección del material y para comparar unos trenes con otros.

Sin embargo, hay ciertos propósitos que requieren conocer también el importe económico de la energía que va a consumir el vehículo en todo su ciclo de vida.

Para entender mejor las razones de esta necesidad, se resume seguidamente, adaptada al caso, la reflexión sobre las “condiciones de los pliegos” formulada en [2].

### 4.1. Las condiciones de los pliegos

Los llamados “pliegos de condiciones” constituyen un instrumento básico para la configuración de las características del sistema ferroviario, tanto en lo que se refiere a la infraestructura como a los vehículos y su explotación.

Así, en el ámbito de la operación de los servicios de transporte, se redactan dos tipos de pliegos de condiciones relevantes:

- para la adquisición del material rodante (pliegos redactados por los operadores de servicios de transporte);
- para licitar los concursos de explotación o de concesión de servicios (pliegos que redactan las autoridades públicas).

En ambos casos, los pliegos especifican unas determinadas condiciones relativas a los vehículos y a sus prestaciones.

#### **El criterio del mínimo/máximo y el criterio de la valoración**

Las condiciones y prestaciones que se esperan de los trenes se pueden conseguir (en diferentes grados) de dos formas:

- Exigiendo en el pliego un “valor mínimo” o un “valor máximo” del indicador que mide la prestación (por ejemplo, especificando que el tren tendrá una potencia mínima de 8.000 kW, o una velocidad máxima de 300 km/h, que tendrá al menos 320 plazas o que consumirá, como máximo, 0,05 kWh/plaza\_est.km).
- Estableciendo “criterios de valoración” (técnica y/o económica) de las ofertas que incluyan los diferentes valores posibles de estos indicadores y la ponderación que se les concede. Por ejemplo, prescribiendo que la valoración económica del coste del tren se hará dividiendo el precio ofertado por el número de plazas; o que en el coste del tren para la valoración económica se sumará el precio de adquisición y el coste de la energía que va a consumir a lo largo de su vida útil.

Generalmente, en los pliegos de condiciones para la adquisición del material rodante o para licitar los concursos de explotación o de concesión de servicios se opta casi exclusivamente por establecer un valor mínimo o máximo de ciertos indicadores (así, “los asientos deberán tener la separación mínima establecida en la ficha UIC” o “la potencia deberá ser al menos de 5.000 kW...”). Ello hace que, una vez alcanzado el valor mínimo o máximo que permite cumplir las condiciones del pliego, no existen estímulos adicionales para mejorar el valor del indicador, por lo que el diseñador no tiene criterios que le permitan encontrar un equilibrio si están en juego dos intereses contrapuestos.

Un ejemplo muy clásico es el de la configuración de los asientos de un tren: una vez que se han cumplido los mínimos, el diseñador del tren tiene muchos estímulos para aumentar en lo posible la “densidad” de plazas del tren, instalando cuantos más asientos sea posible si, como es lo habitual, el coste del tren (a los efectos de valoración de la oferta) se mide dividiendo el coste total del tren por el número de plazas que ofrece. Es posible que este indicador por sí mismo (coste/plaza) sea interesante, pero también es posible que el óptimo pueda alcanzarse con un mayor coste por plaza derivado de un mayor confort de cada plaza. Desde luego, las posibilidades son muchas, pero el modelo deberá poder recoger todas ellas, y el sistema de especificar únicamente “mínimos” o “máximos” no parece el más adecuado para lograr los objetivos globales.

Existe una alternativa complementaria en el caso del consumo de energía al criterio del “valor máximo”. Consistiría en que, una vez fijado el consumo máximo admisible (que jugaría como una “cláusula de admisibilidad” de la oferta), se establezca una “regla de valoración del consumo”, de forma que la evaluación de la oferta, pudiera realizarse de acuerdo con unos baremos objetivos que puedan recoger la riqueza de matices que suponen los diversos valores y las mejoras que, por debajo del consumo máximo, puedan ofrecerse en el consumo del tren.

## **4.2. Necesidad de conocer el valor económico de la energía consumida en el ciclo de vida**

A la vista de lo anterior, se aprecia que existen casos en los que es necesario conocer el valor económico de la energía que va a consumir un tren en el conjunto de su ciclo de vida.

Así puede ocurrir, por ejemplo, en tres supuestos:

1. Se quiere otorgar, en la valoración técnica de los trenes, una ponderación a la reducción del consumo de energía por debajo del máximo aceptado. Comoquiera que la reducción del consumo se traduce en ahorros económicos en el conjunto del ciclo de vida, una forma sencilla de valorar las mejoras que se ofrezcan sobre un consumo máximo aceptado sería convertirla en el coste económico que el consumo supone en el ciclo de vida del tren.
2. En otros casos puede ocurrir que el consumo de un tren, una vez construido, no sea el precalculado. Y no porque el modelo no refleje la realidad (lo que no sería imputable en ningún caso al fabricante), sino porque algún dato constructivo del tren no se corresponde con el dato que se estimó para evaluar su consumo (por ejemplo, la masa del tren resulta, una vez fabricado, ser mayor que la declarada). En tal caso resulta evidente que se produce un perjuicio económico al operador, ya que el tren va a consumir más energía

que la que justificó la elección en el momento de la compra. Por ello, y si el operador juzgase conveniente o necesario fijar una indemnización para estos casos, el valor de la diferencia de energía (calculada como seguidamente se expondrá) podría ser un buen criterio para fijarla.

3. Finalmente, en algunos casos puede ser conveniente conocer el ahorro que, en términos de energía, puede suponer una determinada mejora en el tren (por ejemplo, adoptar un material más ligero para parte del vehículo, pero que resulta más caro de adquisición). En tales casos puede ser necesario conocer el coste de la energía en el ciclo de vida en cada una de las alternativas que se comparan, para que la comparación pueda ayudar en la toma de decisión. Por ejemplo, emplear un material más ligero produce un ahorro de energía, pero resulta más caro. Para decidir hasta cuánto sobreprecio debe admitirse para ahorrar energía, hay que conocer el valor económico de la energía ahorrada por tal reducción del peso.

### 4.3. Forma de cálculo del coste de la energía consumida

Se parte del dato del consumo teórico precalculado por plaza estandar.kilometro (CONSEST\_ENG<sub>serv</sub>), que se conoce por el cálculo expuesto en los capítulos anteriores. Si a lo largo de la vida del vehículo éste va a hacer varios tipos de servicios, se parte de cada uno de los consumos teóricos precalculados.

*Supongamos, por ejemplo, que para un tren de alta velocidad, el consumo de energía teórico precalculado para los servicios de alta velocidad larga distancia es: CONSEST\_ENG<sub>avld</sub>=0,037 kWh/pl\_est.km.*

*Y que el consumo de energía teórico precalculado para los servicios de alta velocidad media distancia es: CONSEST\_ENG<sub>avmd</sub>=0,026 kWh/pl\_est.km.*

El primer lugar, se multiplica dicho consumo por el número de plazas estándar del tren, para obtener el consumo por kilómetro.tren:

En tracción eléctrica sería:

$$CONS\_ENG_s(kWh/pl\_est.km) = CONSEST\_ENG_s(kWh/trenkm) \times Pl\_est_s / tren(pl\_est / tren)$$

Y en tracción diésel sería:

$$CONS\_ENG_s(l / pl\_est.km) = CONSEST\_ENG_s(l / tren.km) \times Pl\_est_s / tren(pl\_est / tren)$$

*Si en el caso del tren del ejemplo, el número de plazas estándar para el servicio de alta velocidad larga distancia es de 330, su consumo por kilómetro en este servicio es  $CONS\_ENG_{avld} = 0,037 \times 330 = 12,21$  kWh/kmtren<sub>avld</sub>; y si el número de plazas estándar para el servicio de alta velocidad media distancia es de 380, el consumo por kilómetro es  $CONS\_ENG_{avmd} = 0,026 \times 380 = 9,88$  kWh/kmtren<sub>avmd</sub>.*

Se toma después el precio de referencia de la energía PR-ENG<sub>ref</sub>, que se fija, para el año 2009, de la siguiente forma:

Para tracción eléctrica:

$$PR\_ENG_{2009} = 0,085\text{€/ kWh}$$

Para tracción diésel:

$$PR\_ENG_{2009} = 0,6\text{€/ litrogasóleo}$$



Se estima seguidamente la subida anual de precio de la energía anual ( $i$ ). Se adopta como hipótesis una subida de los precios energéticos del orden de un 0,6% por encima de la tasa de inflación (valor parametrizable). Tomando el 2% como valor de la tasa de inflación, la subida anual de los precios de la energía sería de:

$$i_a = 0,026 \quad \forall a$$

A continuación se calcula el precio de la energía en cada uno de los años de vida del vehículo.

$$PR\_ENG_a = PR\_ENG_{2009} \times (1 + i)^{(a-2009)}$$

*En el caso del ejemplo, suponiendo que el tren fuese a estar en servicio entre los años 2012 y 2036, el precio de la energía pasaría de 0,092 €/kWh en 2012 a 0,17 €/kWh en 2036. En cada año el precio (en moneda corriente) sería el siguiente:*

**Tabla 10. Precio de la energía eléctrica entre los años 2012 y 2036**

<b>PRECIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE LOS AÑOS 2012 Y 2036 (€/kWh)</b>									
<b>Año</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
PR_ENG <sub>a</sub>	0,092	0,094	0,097	0,099	0,102	0,104	0,107	0,110	0,113
<b>Año</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>
PR_ENG <sub>a</sub>	0,116	0,119	0,122	0,125	0,128	0,131	0,135	0,138	0,142
<b>Año</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>2035</b>	<b>2036</b>		
PR_ENG <sub>a</sub>	0,146	0,150	0,153	0,157	0,161	0,166	0,170		
<b>Datos partida</b>	$i = 0,026$		Año refer. 2009		PR_ENG <sub>ref</sub> = PR_ENG <sub>2009</sub> = 0,085 €/kWh				

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el coste económico de la energía en el año  $a$  ( $COST\_ENG_a$ ), se multiplica el precio de la energía en dicho año ( $PR\_ENG_a$ ) por el consumo de energía por km.tren ( $CONS\_ENG$ ) y por la distancia (en kilómetros) recorrida en el año  $a$ . Resulta entonces:

Para la tracción eléctrica

$$COST\_ENG_a (\text{€/ año}) = PR\_ENG_a (\text{€/ kWh}) \times CONS\_ENG (\text{kWh/ km}) \times DIST (\text{km/ año})$$

Y para la tracción diésel

$$COST\_ENG_a (\text{€/ año}) = PR\_ENG_a (\text{€/ l}) \times CONS\_ENG (\text{l/ km}) \times DIST (\text{km/ año})$$

*En el caso del ejemplo, suponiendo que el tren durante sus primeros 17 años de vida hace servicios de alta velocidad media distancia, recorriendo una distancia anual (DIST) de 500.000 km; y en los siguientes 8 años de via hace servicios de alta velocidad media distancia, con un recorrido anual de 420.000 kilómetros, el consumo de energía por kilómetro y la distancia recorrida en cada año son los recogidos en la tabla.*

*Multiplicando, para cada año, estos valores por el precio de la energía, se obtiene el coste económico de la energía consumida por el tren en cada año de vida:*

**Tabla 11. Coste de la energía en cada año entre los años 2012 y 2036**

COSTE DE LA ENERGÍA EN CADA AÑO ENTRE LOS AÑOS 2012 Y 2036 (€)									
Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
COST_ENG <sub>a</sub>	561.840	576.448	591.435	606.812	622.590	638.777	655.385	672.425	689.908
Año	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
COST_ENG <sub>a</sub>	707.846	726.250	745.132	764.506	784.383	804.777	825.701	847.169	592.928
Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	TOTAL VIDA	
COST_ENG <sub>a</sub>	608.344	624.161	640.389	657.039	674.122	691.649	709.632	<b>17.019.648</b>	
Coste de la energía (COST_ENG <sub>a</sub> ) en de euros (€) corrientes en el año									

Fuente: Elaboración propia

### ➤ Cálculo del valor actual de la energía consumida

Los costes que se han poner en relación con el coste de la energía (el precio pagado por la adquisición del tren es el más importante de ellos) se producen en el momento de la entrega del tren, al comienzo de su servicio comercial. Por ello, los pagos anuales de la energía deben descontarse hasta esta fecha.

Adoptado como tasa de descuento  $td$ , la fórmula que permite conocer el valor actual es:

$$VALOR\_ACTUAL\_ENG = \sum_{a=1}^n \frac{COST\_ENG_a}{(1+td)^n}$$

Un valor razonable para  $td$  es de 0,05.

*En el ejemplo, el valor actual en el momento de compra del tren (2012) de la energía consumida a lo largo de la vida útil del tren será de 9.914.861 euros según se desprende de la tabla.*

**Tabla 12. Valor actual de la energía consumida cada año**

VALOR ACTUAL DE LA ENERGIA CONSUMIDA CADA AÑO									
Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
VACT_ENG <sub>a</sub>	535.085	522.855	510.904	499.226	487.815	476.665	465.770	455.124	444.721
Año	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
VACT_ENG <sub>a</sub>	434.556	424.623	414.918	405.434	396.167	387.111	378.263	369.617	246.374
Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	TOTAL VIDA	
VACT_ENG <sub>a</sub>	240.742	235.240	229.863	224.609	219.475	214.458	209.556	<b>9.429.171</b>	
VALT_ENG <sub>a</sub> en el año	<b>2012</b>			Tasa Descuento.100			<b>5</b>		

Fuente: Elaboración propia

*Ello significa que una actuación en la fase de diseño que, por ejemplo, permitiera reducir el consumo de energía del tren en un 1%, resulta interesante económicamente si su coste está por debajo de 94.291 euros por tren.*



# ANEJO

Tabla 13. Características de los servicios tipo Larga distancia

Línea			ST AVE-Mad-Cdb- Mál.	ST LD CONV - Mad-Cartagena
			010+030	0
<b>Características de la línea</b>				
Longitud	km	$L_{línea}$	513	530
Longitud de túneles	km	$L_{túnel}$	36,73	2,37
Factor de túnel (Tf)		$T_{sf}$	1,50	1,80
Tensión de alimentación	kV	$T_{ae}$	2x25kV CA	3kV CC (tráf.normal)
Diferencia de altitud (Hd-Ho)	m	$A_{od}^S$	0,0	0,0
Coefficiente de curvas	daN/t	$C_C^S$	0,097	0,400
Exceso específico pendientes	mm / km	$E_p^S$	335,69	1.063,75
Velocidad media del viento exterior	km/h	$V_{ve}$	10	10
<b>Características del servicio</b>				
Velocidad máxima del servicio	km/h	$V_{max}^S$	300,00	180,00
Velocidad media del servicio (sin paradas)	km/h	$V_{media}^S$	194,62	107,82
% aprovechamiento s/plazas estándar	%	$A_{pLes}^S$	0,61	0,58
Densidad de plazas y servicios		$\rho_{ps}^S$	1	1
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		$C_{tv}^S$	1	1
Paradas comerciales (sin contar la final)	Nº	$N_{pc}$	1,00	3,00
Paradas comerciales equivalentes	Nº	$N_{pec}$	1,09	1,96
Paradas técnicas programadas	Nº	$N_{ptp}$	0,00	0,00
Paradas técnicas no programadas	Nº	$N_{ptnp}$	0,10	0,10
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	Nº	$N_{perv}$	2,78	10,56
Tiempo medio parada comercial	min	$T_{pc}^S$	2,00	1,00
<b>Características de los periodos en parado</b>				
Tiempo acondicionamiento previo	min	$T_{rot}$	0,00	25,25
Tiempo en taller y limpieza	min	$T_{tyl}$	0,00	50,50
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	min	$T_{lat}$	0,00	793,25
Tiempo de rotación	min	$T_{ro}$	40,00	40,00

Fuente: ALPI2810.09

Tabla 14. Características de los servicios tipo de media distancia

			ST AVANT - Mad- Seg-Vld	ST MD CONV - Mora-Bcn	ST REX - Mad- Soria
<b>Línea</b>			80	210+600+200	200+202
<b>Características de la línea</b>					
Longitud	km	$L_{línea}$	179	158	247
Longitud de túneles	km	$L_{túnel}$	43,60	13,22	1,12
Factor de túnel (Tf)		$T_f^S$	1,50	1,80	1,80
Tensión de alimentación	kV	$T_{ae}$	2x25kV CA	3kV CC (tráf.normal)	3kV CC (tráf.normal)
Diferencia de altitud (Hd-Ho)	m	$A_{od}^S$	0,0	-37,0	0,0
Coefficiente de curvas	daN/t	$C_c^S$	0,093	0,387	0,390
Exceso específico pendientes	mm / km	$E_p^S$	1.360,83	1.487,16	1.232,27
Velocidad media del viento exterior	km/h	$V_{ve}$	10	10	10
<b>Características del servicio</b>					
Velocidad máxima del servicio	km/h	$V_{max}^S$	250,00	140,00	120,00
Velocidad media del servicio (sin paradas)	km/h	$V_{media}^S$	139,09	69,23	86,33
% aprovechamiento s/plazas estándar	%	$A_{plEs}^S$	0,60	0,52	0,57
Densidad de plazas y servicios		$?_{ps}^S$	1	1	1
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		$C_{lv}^S$	1	1	1
Paradas comerciales (sin contar la final)	Nº	$N_{pc}$	1,00	15,00	9,00
Paradas comerciales equivalentes	Nº	$N_{pec}$	2,00	10,72	7,01
Paradas técnicas programadas	Nº	$N_{ptp}$	0,00	1,00	0,00
Paradas técnicas no programadas	Nº	$N_{ptnp}$	0,10	0,20	0,20
Paradas equivalentes por reducción de veloc.	Nº	$N_{perv}$	0,61	6,81	5,50
Tiempo medio parada comercial	min	$T_{pc}^S$	2,00	0,50	0,50
<b>Características de los periodos en parado</b>					
Tiempo acondicionamiento previo	min	$T_{rot}$	5,42	12,30	14,65
Tiempo en taller y limpieza	min	$T_{lyl}$	10,83	24,60	29,30
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	min	$T_{lat}$	158,70	385,90	463,45
Tiempo de rotación	min	$T_{ro}$	20,00	20,00	20,00

Fuente: ALPI2810.09

Tabla 15. Características de los servicios tipo de Cercanías, FGC y Tranviario y metro

			ST Cerc - El Caleyó-S.Juan de Nieva	ST Suburbano FGC	MM Línea 10	ST TRANVIA - Trambaix
Línea			0	0	L10	T1
<b>Características de la línea</b>						
Longitud	km	$L_{línea}$	38	15	23	10
Longitud de túneles	km	$L_{túnel}$	1,90	8,17	20,59	0,00
Factor de túnel (Tf)		$T_f^S$	1,80	1,80	1,15	1,00
Tensión de alimentación	kV	$T_{ae}$	3kV CC (tráf.normal)	1,5kV CC	1,5kV CC	0,75kV CC
Diferencia de altitud (Hd-Ho)	m	$A_{od}^S$	0,0	0,0	0,0	0,0
Coefficiente de curvas	daN/t	$C_c^S$	0,804	1,471	0,682	0,966
Exceso específico pendientes	mm / km	$E_p^S$	2.475,30	10.857,31	6.514,98	7.567,83
Velocidad media del viento exterior	km/h	$V_{ve}$	10	10	0	10
<b>Características del servicio</b>						
Velocidad máxima del servicio	km/h	$V_{max}^S$	140,00	90,00	110,00	50,00
Velocidad media del servicio (sin paradas)	km/h	$V_{media}^S$	50,09	37,36	51,19	22,10
% aprovechamiento s/plazas estándar	%	$A_{pl_{es}}^S$	0,33	0,26	0,33	0,28
Densidad de plazas y servicios		$?_{ps}^S$	2,49	2,49	3	2,49
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		$C_{tv}^S$	1	1	1	1
Paradas comerciales (sin contar la final)	Nº	$N_{pc}$	14,00	9,00	19,00	19,00
Paradas comerciales equivalentes	Nº	$N_{pec}$	6,34	4,96	8,40	16,69
Paradas técnicas programadas	Nº	$N_{ptp}$	0,00	0,00	0,00	0,00
Paradas técnicas no programadas	Nº	$N_{ptnp}$	0,20	0,00	0,00	0,00
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	Nº	$N_{perv}$	1,16	2,70	3,07	4,21
Tiempo medio parada comercial	min	$T_{pc}^S$	0,50	0,30	0,33	0,33
<b>Características de los periodos en parado</b>						
Tiempo acondicionamiento previo	min	$T_{rot}$	4,00	4,42	2,43	2,67
Tiempo en taller y limpieza	min	$T_{tyl}$	8,00	8,83	4,87	5,33
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	min	$T_{lat}$	127,00	140,75	75,35	83,00
Tiempo de rotación	min	$T_{ro}$	5,00	5,00	5,00	5,00

Fuente: ALP2810.09

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] García Álvarez, A. (2007): "Metodología para la evaluación y normalización de los consumos energéticos de los trenes de viajeros", comunicación presentada en el III Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Santa Cruz de Tenerife, mayo de 2007.
- [2] García Álvarez, A.; Cillero, A.; Ramos, R.; Puente, F.; y Martín Cañizares, M. del P. (2008): *Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros*. Madrid: FFE.
- [3] UIC y UNIFE (2010): Technical Recommendation "Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock".
- [4] Jiménez Redondo, J. A. (2006): "Diseño de la cadena de tracción eléctrica". Ponencia presentada en las I Jornadas de Eficiencia Energética en el Ferrocarril (FFE), Madrid.
- [5] Arenillas, J. y López Gómez, J. L. (2007): *La tracción en los ferrocarriles españoles. La tracción diésel*. Madrid: Vía Libre, FFE.
- [6] Olea Unamuno, F. J. (2008): *Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica*. Monografías ElecRail/2.
- [7] Cillero, A.; Bouzada, P.; García Álvarez, A.; y Martín Cañizares, M. del P. (2008): *Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte*. Monografías EnerTrans/6.
- [8] García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M. del P. (2008): *Usos de la energía en el transporte*. Monografías EnerTrans/2.
- [9] López Martínez J. M.; Sánchez Alejo, J.; Gómez, A.; y Fernández, A.: *Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte*. Monografías EnerTrans/8.
- [10] Pilo de la Fuente, E.; Pérez Arriaga, J. I.; Hierro Ausín, I. de L.; y Jiménez Octavio, J. (2008): *Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*. Monografías EnerTrans/9.
- [11] García Álvarez, A. (2007): *Dinámica de los trenes en Alta Velocidad: documentos de explotación técnica y económica de ferrocarriles*. 4ª edición. Madrid: FFE.

colección

# MONOGRAFÍAS

## del FERROCARRIL

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

Este documento es el resultado de la reflexión de un grupo de trabajo constituido en el seno de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE) para el desarrollo del convenio firmado con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Ha sido dirigido por Alberto García Álvarez con la colaboración de M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares y han participado en él Estefanía Sánchez Gómez, de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles; José Antonio Jiménez Redondo, Ignacio Ribera Sánchez, Alfonso Serrano Duque y Francisco Esteban Casas, de Renfe-Alta Velocidad y Larga Distancia; Ramón Morales Arquero, de Renfe-Cercanías y Media Distancia; Jorge Blanquer Jaraiz, de Metro de Madrid; Rafael Fernández Pérez, de Cetren; Josep Lluís Arqués y José Carlos Terés, de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya; Ramón Vall Canosa, de Trambaix; y Ángel Cediél Galán, del IDAE.

Esta publicación forma parte de la Colección “Monografías del Ferrocarril”, Serie “Ingeniería / Arquitectura”, que edita la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Edita:  FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

Colabora:  MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, TURISMO  
Y COMERCIO  IDAE  
Instituto para la Diversificación  
y Ahorro de la Energía