

Diseño de los vehículos ferroviarios para la mejora de su eficiencia energética



Alberto García Álvarez

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Diseño de los vehículos ferroviarios para la mejora de su eficiencia energética

Alberto García Álvarez

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles



© Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2009

ISBN: 978-84-940054-1-1

Depósito Legal: M-12060-2012

La presente monografía se corresponde con la fase 1 (“Características del vehículo para el ahorro de energía”), que está incluida en el bloque 1 de (“Los Vehículos y la red”), del proyecto *ElecRail*. Constituye el documento entregable del mismo que se complementa con las Notas Técnicas del proyecto.

El presente documento tiene por objeto establecer una metodología para la estimación del consumo de energía de los trenes de viajeros y la determinación de las medidas y actuaciones que se pueden llevar a cabo en la fase de diseño del material rodante para la reducción de su consumo.

El documento se estructura en tres bloques:

Modelado del consumo de energía de los trenes de viajeros

Cuantificación de los consumos por tipos de trenes y análisis de sensibilidad a la variación de diversas variables.

Medidas a considerar en la fase de diseño de los trenes para reducir su consumo de energía eléctrica

La metodología expuesta en la primera parte está basada en el proyecto "Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario" que fue desarrollado por un grupo de trabajo constituido en el seno de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles para el desarrollo del Convenio firmado el 9 de octubre de 2008 entre la propia Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

En él participaron Alberto García Álvarez, María del Pilar Martín Cañizares y 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.

Otros trabajos que han servido de apoyo para la elaboración de la presenta monografía son:

Desarrollados en el marco del Proyecto EnerTrans:

Cillero Hernández et al. (2007): "Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte". Monografías EnerTrans

Pilo de la Fuente et al. (2008): "Flujos de la energía de la electricidad para el transporte". Monografías EnerTrans.

Trabajos del proyecto ElecRail:

Olea Unamuno, F.J. (2008): "Rendimientos de la tracción eléctrica". Monografías ElecRail.

La ponencia Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A. "Caracterización de los perfiles operaciones del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos". IX Congreso de Ingeniería del Transporte (Madrid, 8 julio de 2010)

Y el libro García Álvarez, A. (2010): "Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril". Fundación de los Ferrocarriles Españoles.



ÍNDICE

ÍNDICE.....	4
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MODELADO DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS TRENES DE VIAJEROS	7
2.1. Tipos de indicadores del consumo	8
2.1.1 Consumos referidos al kilómetro recorrido	9
2.1.2 Indicadores específicos	9
2.2. Incidencia en el consumo de los tipos de servicio y la infraestructura	11
2.3. Parámetros del tren	15
2.3.1 Parámetros primarios	16
2.3.2 Obtención de los parámetros del tren calculados	19
2.4. Cálculo del consumo de energía y pérdidas en el vehículo	22
2.4.1 Cálculo de la energía consumida para el movimiento del tren.....	22
2.4.2 Pérdidas en la cadena de tracción	24
2.5. Cálculo de la energía servicios auxiliares.....	26
2.5.1 Energía para auxiliares necesaria a la entrada del vehículo.....	27
2.5.2 Energía total necesaria por kilómetro para servicios auxiliares.....	28
2.5.3 Energía consumida por los servicios auxiliares en los periodos fuera de servicio 28	
2.6. Cálculo y efecto de la energía eléctrica regenerada por el freno regenerativo... 29	
2.6.1 Energía eléctrica disipable en el freno.....	30
2.7. Cálculo de la energía primaria y las emisiones	32
3. CUANTIFICACIÓN DE LOS CONSUMOS POR TIPOS DE TRENES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE DIVERSAS VARIABLES	34
3.1. Características de los servicios y de los trenes empleados para la simulación ... 35	
3.1.1 Características de los servicios representativos y de la infraestructura .. 35	
3.1.2 Características del material móvil	37
3.2. Resultados del consumo por tipos de tren y servicio	39
3.2.1 Homogeneización de la capacidad	42
3.2.2 Homogeneización de la capacidad genérica con independencia de su uso 43	
3.2.3 Homogeneización de la distancia	44
3.2.4 Incidencia de cada uno de los términos del consumo de energía	45
3.3. Análisis de sensibilidad a diversas variables.....	48
3.3.1 Análisis de sensibilidad a la variación de la masa	49
3.3.2 Análisis de sensibilidad a la variación del coeficiente B (resistencia a la entrada de aire)	50
3.3.3 Análisis de sensibilidad a la variación coeficiente C (resistencia aerodinámica).....	51
3.3.4 Análisis de sensibilidad a la variación de la velocidad máxima	52
3.4. Influencia del tipo de tracción	52
3.5. Conclusiones.....	53
4. MEDIDAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS TRENES	54

4.1. Parámetros de diseño del tren que inciden en el consumo de energía	54
4.2. Mejora de las variables que inciden en el consumo	55
4.3. Uso de arquitecturas eficientes del tren.....	57
BIBLIOGRAFÍA	59
Lista de tablas y figuras.....	60

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene por objeto establecer una metodología para la estimación del consumo de energía de los trenes de viajeros y la determinación de las medidas que se pueden llevar a cabo en la fase de diseño del material rodante para la reducción de su consumo.

El documento se estructura en tres bloques:

1. Modelado del consumo de energía de los trenes de viajeros.
2. Cuantificación de los consumos por tipos de trenes y análisis de sensibilidad a la variación de diversas variables.
3. Medidas a considerar en la fase de diseño de los trenes para reducir su consumo de energía eléctrica.

El consumo del ferrocarril depende de múltiples variables del vehículo empleado, la infraestructura, el servicio y la operación. Todos estos parámetros se han contemplado en el modelado del consumo de energía, aunque las medidas para reducir el consumo de energía se centran en el vehículo.

La metodología expuesta en la primera parte está basada en el proyecto "Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario" que fue desarrollado por un grupo de trabajo constituido en el seno de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles para el desarrollo del Convenio firmado el 9 de octubre de 2008 entre la propia Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Otros trabajos que han servido de apoyo para la elaboración de la presenta monografía son:

Desarrollados en el marco del Proyecto EnerTrans:

- Cillero Hernández et al. (2007): *"Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte"*. Monografías EnerTrans
- Pilo de la Fuente et al. (2008): *"Flujos de la energía de la electricidad para el transporte"*. Monografías EnerTrans.

Trabajos del proyecto ElecRail:

- Olea Unamuno, F.J. (2008): *"Rendimientos de la tracción eléctrica"*. Monografías ElecRail.

La ponencia Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A. *"Caracterización de los perfiles operaciones del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos"*. IX Congreso de Ingeniería del Transporte (Madrid, 8 julio de 2010)

Y el libro García Álvarez, A. (2010): *"Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril"*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

2. MODELADO DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS TRENES DE VIAJEROS

Se pretende 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 CO₂ asociadas.

Para comprender y predecir el consumo de energía de un tren, se pueden adoptar dos enfoques:

- Por una parte, analizaremos cada uno de los tipos elementales de movimientos que realiza el tren a lo largo de su recorrido para el cálculo del consumo de energía por integración de éstos. Esta visión es útil para comprender cualitativamente los efectos en el consumo energético de las rampas, de las paradas y de las limitaciones de velocidad.
- Por otra parte, analizaremos el balance energético del movimiento de un tren en el conjunto o en una parte significativa de su recorrido. Este enfoque es útil para predecir el consumo de energía para una infraestructura, un tren y unas velocidades máximas determinadas. Y además ofrece la ventaja de permitir el conocimiento desglosado de cada uno de los sumandos de la energía.

En este documento se presenta una formulación basada en el balance de energía en el recorrido total que explica el consumo total desagregando sus diversos componentes relevantes y explicando para cada uno de esos componentes en las variables de las que depende. Estas variables pueden ser:

- Características del material rodante empleado (masa, masas rotativas, sección transversal, superficie mojada, ...)
- Datos relevantes del trayecto del tramo de infraestructura recorrida por el tren (curvas, rampas, ...)
- Características del servicio y tiempo de la marcha particular programada o realizada por el tren (paradas, tiempos reales empleados, velocidades, rotaciones, etc.)

Este es el enfoque más útil para predecir y analizar el consumo de energía de un tren en un recorrido entre dos puntos pues consiste en aplicar el principio de conservación de la energía: la energía que entra en el tren es igual a la energía que sale del tren, más (en su caso) la energía que se ha almacenado en el recorrido.

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

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 resistencias 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 restar:

- 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.

2.1. Tipos de indicadores del consumo

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.

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 [$(\text{kWh}_{\text{pant}} - \text{kWh}_{\text{generados}})/\text{km.tren}$].

Las emisiones gases de efecto invernadero no son un indicador directamente relevante a los efectos de este proyecto; pero, como referencia, estas emisiones absolutas se medirán en kilogramos de CO₂ equivalente emitidos (en el vehículo o en la generación de electricidad) por cada kilómetro recorrido por el tren.

2.1.1 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 en 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, según distintas situaciones) para su reparto posterior entre los kilómetros comerciales recorridos por el tren.

2.1.2 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, 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 estudio son:

- En tracción diésel, los litros de gasoil suministrados al vehículo por cada plaza estándar y kilómetro [litros / plazaest 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 [$\text{kWh}_{\text{pant}}/\text{plazaest} \times \text{km}$]
- 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 [1]

Como unidad de capacidad o de oferta no se utilizará (salvo que en algún caso concreto sea preferible hacerlo así)¹ 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, cabezas tractoras...) por un *Índice de densidad de plazas y servicios* (ρ^{s}_{ps}) que depende del tipo de servicio.

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 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 ρ^{s}_{ps} es el *Índice de densidad de plazas y servicios* (plazas estándar/ m^2). Este índice es propio para cada tipo de servicio.

¹ 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 las 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.

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

2.2. 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 y como las características operativas) se estandarizarán en "ciclos teóricos".

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.

Tabla 1. Parámetros característicos del servicio

Características de la infraestructura		
Longitud	km	$L_{línea}$
Longitud de túneles	km	$L_{túnel}$
Factor de túnel (Tf)		T_f^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}
Características del servicio		
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		ρ_{ps}^s
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		C_{tv}^s
Paradas comerciales (sin contar la final)	N ^o	N_{pc}
Paradas comerciales equivalentes	N ^o	N_{pec}
Paradas técnicas programadas	N ^o	N_{ptp}
Paradas técnicas no programadas	N ^o	N_{ptnp}
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	N ^o	N_{perv}
Tiempo medio parada comercial	min	T_{pc}^s
Características de los periodos fuera de servicio		
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: Elaboración propia

Paradas equivalente por reducción de velocidad

Paradas 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_j) 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 y realiza una reducción de velocidad de 160 km/h a 100 km/h, el número de

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

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
Limitación								
300	0,27							
250	0,49	0,31						
200	0,67	0,56	0,36					
160	0,79	0,72	0,59	0,36				
140	0,84	0,78	0,69	0,51	0,23			
120	0,88	0,84	0,77	0,64	0,44	0,27		
100	0,92	0,89	0,84	0,75	0,61	0,49	0,31	
80	0,95	0,93	0,90	0,84	0,75	0,67	0,56	0,36
60	0,97	0,96	0,94	0,91	0,86	0,82	0,75	0,64
50	0,98	0,97	0,96	0,94	0,90	0,87	0,83	0,75
30	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96	0,95	0,94	0,91

Velocidades en km/h

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 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 solo 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)²]; 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)²]

Resistencia equivalente de las curvas

La *resistencia equivalente de las curvas* (C^s_c) 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.

Aún 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:

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

A efectos de este proyecto, el *aprovechamiento* se considera como una característica del servicio ($A_{pl_{est}}^s$).

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 que dependen de los equipos que incorpore el tren y que multiplican a 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 reducir la energía regenerada.

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

Parámetro	Valores
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

2.3. Parámetros del tren

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.

2.3.1 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.

Tabla 4. Parámetros del tren empleados en el modelo

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Denominación</i>
Características principales		
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_{via}
Tensión de funcionamiento	kV	
Número de pantógrafos en captación	número	Pant
Plazas reales	plazas	N_{plazas}
Vida útil del tren	años	
Dimensiones		
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 ²	$S_{vent2costados}$
Longitud de puertas (1 costado)	m	$l_{puertas1cost}$
Tracción y freno		
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_frect}
Velocidad mínima del freno eléctrico	km/h	V_{min_F}
Rendimientos		
Relación Rendimiento regeneración / Rendimiento en tracción		
Rodadura		
Número de ejes	número	N_e
Distancia entre ejes o rodales (vehículos sin bogie) o distancia entre ejes del	m	D_{ejes}

mismo bogie		
Tiene los ejes radiales u orientables (Si=1; No=0)		K _{radiales}
Tiene las ruedas caladas en el eje (Si=0) o tiene ruedas libres (1)		K _{libres}
Servicios auxiliares		
Procedencia de la alimentación de auxiliares		
Tiene aire acondicionado?	booleano	
Coefficiente de transmisión de calor (K)	W/m ² °C	K
Potencia iluminación	kW	P _{iluminación}
Potencia total evaporadores (climatización)	kW	P _{climatización}
Potencia de los auxiliares técnicos	kW	P _{técnicos}
Características para el ahorro de energía		
Tiene dispositivo que regula el aire en función de la ocupación real?	booleano	k _{entaire}
Coefficiente ahorro climatización (talleres, latencia)	booleano	K _{ahorroC}
Coefficiente ahorro iluminación (latencia)	booleano	K _{ahorroI}
Posibilidad de climatización directa	booleano	C _{directa}
Tiene regulación de la ventilación de los motores en función de la temperatura	booleano	K _{VentMotor}
Modo de conducción económica		
Tiene el primer bogie carenado?	booleano	K _{primerBogie}

Fuente: Elaboración propia

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 ($l_{\text{útil coche}}$) 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 coches²).

En el caso del tren de la serie 103, las longitudes útiles de cada coche son las siguientes: Coches extremos (1 y 8): 21,2m; 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 ($S_{\text{noútil}}$) 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.

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 m²; en coche 2: 4,8 m²; en coche 3: 4,1 m²; en coche 4: 4,1 m²; en coche 5: 4,1 m²; en coche 6: 4,8 m²; en coche 7: 4,8 m²; en coche 8: 5,5 m² resultando $S_{\text{noútil}}=36,4 \text{ m}^2$).

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

$$S'_{ub} = W_{\text{int}_t} \times l_{\text{tren}} - S_{\text{noútil}} = 183,4 \times 2,75 - 36,4 = 468 \text{ m}^2$$

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 m², 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 una de los dos pisos.

² En el documento [1] sí se considera como parte de la superficie útil la situada entre coches en los trenes de pasillo continuo.

2.3.2 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

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

A efectos prácticos, y solo para el cálculo de A, se considerará una densidad de plazas y servicios $\rho^s_{ps}=1$ (plaza/m²).

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:

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

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:

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

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.

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

Y esta constante C^t se expresa en $\text{daN}/(\text{km/h})^2$

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:

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

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
Características principales		
Coefficiente A (resistencia mecánica)	daN	A ^t
Coefficiente B (resistencia entrada de aire)	daN/(km/h)	B ^t
Coefficiente C (resistencia aerodinámica)	daN/(km/h) ²	C ^t
Rendimientos		
Rendimiento cadena de tracción	kWhs/kWhe	r ^t _t
Rendimiento de auxiliares	kWhs/kWhe	r ^t _a
Rendimiento del freno regenerativo	kWhs/kWhe	r ^t _b
Rodadura		
Constante resistencia curvas por rodaje		K _{rodaje}
Servicios auxiliares		
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.	$C_{c_1435}^s$	600
Multiplicador resistencia de curvas líneas de ancho de vía de 1.668 mm	Coef.	$C_{c_1668}^s$	800
Volumen de aire que se renueva para los viajeros para horas cálidos y muy cálidos.	m ³ /persona y hora	Q	15
Volumen de aire que se renueva para los viajeros para horas normales, fríos y muy fríos.	m ³ /persona y hora	Q	20
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas muy cálidas	°C	ΔT_{MC}	15
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas cálidas	°C	ΔT_C	10
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas normales	°C	ΔT_N	2
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas frías	°C	ΔT_F	17
Incremento temperatura media exterior y la temperatura de consigna-horas muy frías	°C	ΔT_{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		$\rho_{auxelec}$	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			0.5
Radiación solar	W/ m ²	Rad_{solar}	800
Renovación de aire – horas muy cálidas	m ³ /viajero	Φ_{aire_hMC}	15
Renovación de aire - horas cálidas	m ³ /viajero	Φ_{aire_hC}	15
Renovación de aire - horas normales	m ³ /viajero	Φ_{aire_hN}	20
Renovación de aire - horas frías	m ³ /viajero	Φ_{aire_hF}	20
Renovación de aire - horas muy frías	m ³ /viajero	Φ_{aire_hMF}	20
Incremento de humedad específica-horas muy cálidas		ΔH_{MC}	11,77
Incremento de humedad específica-horas cálidas		ΔH_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 ²	k_{otros}	0,05
Velocidad máxima en deriva	km/h	$V_{max_deriva}^s$	$0,09 \times V_{s_{max}}$

Fuente: Elaboración propia

2.4. Cálculo del consumo de energía y pérdidas en el vehículo

2.4.1 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):

$$E_{ar} [kWh/km] = (A' [daN] + B' [daN / (km/h)]) \times V^s_{media} (km/h) + C' [daN / (km/h)^2] \times \left((V^s_{media} [km/h])^2 + \sigma(v)^2 \right) \times \left[(T^s_f - 1) \times T^s_t [km] + 1 \right] \times L_{linea} [km] \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{L_{linea} [km]}$$

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

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

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

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

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):

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

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/s²) es la siguiente:

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

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:

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

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

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

Si la distancia entre paradas (D_{spt}) está entre 3 y 10 kilómetros:

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

4. Energía potencial disipada en el freno en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima (en un kilómetro medio)³:

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

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.

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

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

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

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

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

³ Véase para más detalle el documento [2]

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

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

2.4.2 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:

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

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

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

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 [3] 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

	Motor cc (500Kw)	Motor cc (1500Kw)	Sincrono ac (500Kw)	Sincrono ac (1500Kw)	Asíncronos ac	Imanes permanentes
Transformador	0,99	0,99	1	1	1	1
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
Rendimiento Total	0,86998	0,88899	0,8932	0,9076	0,9124	0,94119

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

	Motor cc (500Kw)	Motor cc (1500Kw)	Sincrono ac (500Kw)	Sincrono ac (1500Kw)	Asíncronos ac	Imanes permanentes
Transformador	0	0	0,943	0,943	0,943	0,943
Convertidor	0	0	0,97	0,97	0,97	0,97
Motor	0	0	0,93	0,945	0,95	0,98
Reductora (2 etapas)	0	0	0,98	0,98	0,98	0,98
Rendimiento Total	0	0	0,8337	0,8471	0,8516	0,8785

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 motores son los recogidos en la tabla.

Tabla 9. Rendimientos en el vehículo de tracción diésel

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

Fuente: Elaboración propia

2.5. Cálculo de la energía servicios auxiliares

La energía útil para los servicios auxiliares se divide en cuatro sumando:

1. Energía necesaria para la calefacción y el aire acondicionado.
2. Energía necesaria para el resto de los servicios auxiliares comerciales (iluminación, cafetería,...)
3. Energía necesaria para los auxiliares técnicos (ventiladores de equipos de tracción, compresores, cargador de baterías, etc.)

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 (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 (ΔT , valor que se supone igual para todos los trenes y servicios y que los efectos de este proyecto se toma como $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ en horas muy cálidas, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ en horas cálidas, $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ en horas normales, $\Delta T=17^{\circ}\text{C}$ en horas frías y $\Delta T=22^{\circ}\text{C}$ 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, a 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.

2.5.1 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 $\rho_{auxdiesel}$ 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).

2.5.2 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) por la duración de cada una de estas fases):

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

2.5.3 Energía consumida por los servicios auxiliares en los periodos fuera de servicio

Los periodos fuera de servicios 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.

1. Se define el "Tiempo de acondicionamiento previo" (T_{ap}^s) es el tiempo previo a la subida de los viajeros en el que se conectan los equipos de climatización para alcanzar la temperatura adecuada.
2. Los "tiempos en taller y limpieza" (T_t^s) son tiempos 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.
3. El "Tiempo de estacionamiento" (o hibernación) (T_{hi}^s): 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.
4. El "Tiempo de rotaciones" (T_{ro}^s): 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.

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)	24h-horas en operación - Tiempo de acondicionamiento previo - Tiempo en taller y limpieza

El cálculo del consumo de los equipos auxiliares en esos periodos se hace 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

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.

2.6. 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 no, es algo que no depende del tren, sino que depende de que haya o no

haya subestaciones reversibles, y en el caso de que no las haya, de que haya otros trenes demandando energía.

2.6.1 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 reostático⁴.

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:

$$E_{fr} = \left[\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{D_{pc}^s} + \frac{1}{D_{pe}^s} + \frac{1}{D_{pt}^s} \right) \times (M_{c\ arg\ ado}^t + M_{rot}^t) \times (V_{max}^s)^2 - E_{ravid} + M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L_{linea}} \right] \times \rho_{t_b}^t$$

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 sustrayendo E_{ravid} en la fórmula anterior descuenta esta energía que no se disipa en el freno).

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:

$$E_{fr} = \left[\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{D_{pc}^s} + \frac{1}{D_{pe}^s} + \frac{1}{D_{pt}^s} \right) \times (M_{c\ arg\ ado}^t + M_{rot}^t) \times (V_{max_deriva}^s)^2 - V_{minF_motorxx}^2 - \left[E_{ravid} + M^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L_{linea}} \right] \right] \times \rho_{t_b}^t$$

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.

⁴ En este punto se separa la solución adoptada en este proyecto de la sugerida en los documentos [6] y [7] en los que sólo se suponía aprovechada, en corriente continua, una parte de la energía eléctrica regenerada.

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

Incluso por encima de la velocidad $V_{minF_motorxxx}$, 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:

$$E_{fr} = \left[\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{D_{pc}^s} + \frac{1}{D_{pe}^s} + \frac{1}{D_{pt}^s} \right) \times (M_{cargado}^t + M_{rot}^t) \times (V_{max_deriva}^s{}^2 - V_{minF}^s{}^2) - \right. \\ \left. E_{ravid} + M_{cargado}^t \times g \times \left(\sum l_p \times [p_t - p_e] \right) \times \frac{1}{L} \right] \times \rho_{fb}^t \times B_{fr}^{t,s}$$

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

$B_{fr}^{t,s}$ 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 propia del tipo de servicio.

$B_{fr}^{t,s}$ se calcula así:

$$B_{fr}^{t,s} = \frac{\int F_{rlect} \times dl}{E_{fr}} = \frac{F_{max_frlect}^t / 2}{(M_{cargado}^t + M_{rot}^t) \times d_{fs}^s}$$

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 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.km y en tracción diésel en litros de gasóleo/plaza estándar kilómetro.

2.7. Cálculo de la energía primaria y las emisiones

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

1. 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.

$$E_{sub_bgas} = E_n \times C_{red}$$

2. 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.

$$E_{bc} = E_{sub_bgas} \times C_{tyd}$$

3. 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.

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

4. 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.

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

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

5. Las emisiones de CO₂ 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 CO₂ 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*:

1. 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.

2. 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.
3. 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.

3. CUANTIFICACIÓN DE LOS CONSUMOS POR TIPOS DE TRENES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA VARIACIÓN DE DIVERSAS VARIABLES

La diversidad de arquitecturas y tamaños de los trenes así como de los servicios que pueden realizar hace necesario disponer de un orden de magnitud de los consumos y de su rango de variación.

Por ello, el objetivo de este apartado es analizar el consumo y las emisiones de distintos trenes de viajeros españoles en las rutas y servicios que realizan.

Conforme a la metodología ya explicada se ha estimado el consumo de los trenes en dos puntos:

- *Energía importada en pantógrafo*: es la energía consumida en llantas y auxiliares más las pérdidas que se producen en los equipos de tracción y convertidores de auxiliares.
- *Consumo neto en pantógrafo (energía neta final)*: es la energía importada en pantógrafo menos la energía que se podría devolver a la catenaria por el freno regenerativo. No siempre es posible la devolución de toda la energía, depende de si el tren dispone de freno regenerativo y de si las subestaciones son reversibles.

Adicionalmente se muestran las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) producidas en la generación de electricidad o por la combustión en el caso de vehículos diésel.

Se ha supuesto que no se realiza ningún tipo de conducción económica y, por ello, el consumo es el máximo.

Como se ha considerado que toda la energía que es susceptible de devolverse mediante freno regenerativo se aprovecha, los resultados no se ven alterados (en líneas electrificadas en corriente continua) por la densidad de tráfico.

El consumo que se muestra es la media de los dos sentidos, para evitar variaciones debidas a las diferencias de energía potencial.

3.1. Características de los servicios y de los trenes empleados para la simulación

3.1.1 Características de los servicios representativos y de la infraestructura

Para la caracterización de los consumos de los trenes españoles de viajeros se emplean los servicios ferroviarios que se consideran representativos en España. Dichos servicios fueron definidos en [11].

Este trabajo establece los servicios representativos de los trenes de cercanías, larga y media distancia.

Las variables consideradas relevantes para la caracterización de los perfiles operacionales de los trenes son:

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

Los servicios tipo de los trenes de cercanías tienen las variables características siguientes:

Tabla 10. Servicios tipo de cercanías

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

Fuente: Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A. (2010)

Del mismo modo, los servicios de media y larga distancia identificados se resumen en la tabla:

Tabla 11. Servicios tipo de larga y media distancia

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

Fuente: Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A. (2010)

De los servicios definidos en este estudio emplearemos:

- CER2: El Caleyo-S.Juan de Nieva (38,40 km) como representativo de los trenes de cercanías.
- REG: Regional Soria- Madrid Chamartín (247,20 km) como representativo de los trenes de media distancia.
- AVANT: Avant Valladolid-Madrid Chamartín (178,40 km) como representativo de los servicios de alta velocidad y media distancia.
- LD: Altaria Cartagena-Madrid (530,10) como representativo de los servicios de larga distancia convencionales.
- AVE: AVE Madrid-Málaga (512,50) como representativo de los trenes de alta velocidad.

Adicionalmente se estudiará el caso de un ferrocarril metropolitano, uno suburbano y un servicio tranviario:

- Metropolitano: se ha seleccionado la línea 10 de Metro de Madrid (23 km).
- Suburbano: se emplea la línea de FGC de Plaza de Cataluña a Sant Cugat (15,31 km).
- Servicio tranviario: se ha seleccionado el servicio de Trambaix T1, de Bon Viatge a Francesc Macià (9,82 km)

La línea de Madrid a Cartagena no está electrificada en su totalidad, sólo el tramo entre Madrid y Chinchilla está electrificado a 3 kV en corriente continua y lo mismo ocurre con la línea de Madrid a Soria, electrificada hasta Torralba. Sin embargo, puesto que se trata de analizar el consumo de los trenes de viajeros de tracción eléctrica, supondremos que todas las líneas están electrificadas, cada una con su tensión correspondiente.

3.1.2 Características del material móvil

Para la simulación de cada uno de los servicios se emplearán los vehículos que se consideran representativos:

Tabla 12. Vehículos empleados en los diferentes servicios tipo

Servicio tipo	Vehículos
Tranviario	Citadis
Metropolitano	Serie 7000 de Metro de Madrid
Suburbano	Serie 112 de FGC
Cercanías	Serie 465 (Civia)
Regional	Serie 449
Alta velocidad media distancia	Serie 104
Larga distancia	Serie 130
Alta velocidad larga distancia	Serie 102

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran las características principales de cada uno de los trenes en cuanto a dimensiones, tracción y número de plazas.

Citadis Trambaix		
	Composición	Masa en vacío (OM)
	M+R+M	41 t
	Velocidad máxima	Longitud total tren
	70 km/h	32,17 m
	Potencia	Plazas
	480 kW	218
	Tensión de alimentación	Freno regenerativo
	0,75 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía	
Asíncrono CA	1.435 mm	

Servicio: Tranviario

Serie 7000 Metro de Madrid		
	Composición	Masa en vacío (OM)
	M+R+S+S+R+M	194,2 t
	Velocidad máxima	Longitud total tren
	110 km/h	108,3 m
	Potencia	Plazas
	3.168 kW	1094
	Tensión de alimentación	Freno regenerativo
	1,5 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía	
Asíncrono CA	1.445 mm	

Servicio: Metropolitano

Serie 112 FGC



Servicio: Suburbano

Composición	Masa en vacío (OM)
M+M+R+M	142,9 t
Velocidad máxima	Longitud total tren
90 km/h	78 m
Potencia	Plazas
2.160 kW	504
Tensión de alimentación	Freno regenerativo
1,5 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía
Asíncrono CA	1.435 mm

Serie 465 - Civia



Servicio: Cercanías

Composición	Masa en vacío (OM)
M+3R+M	160 t
Velocidad máxima	Longitud total tren
120 km/h	98,98 m
Potencia	Plazas
2.400 kW	978
Tensión de alimentación	Freno regenerativo
3 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía
Asíncrono CA	1.668 mm

Serie 449



Servicio: Regional

Composición	Masa en vacío (OM)
A1+A4+A4+A5+A2	172 t
Velocidad máxima	Longitud total tren
160 km/h	98,97 m
Potencia	Plazas
2.400 kW	261
Tensión de alimentación	Freno regenerativo
3 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía
Asíncrono CA	1.668 mm

Serie 104



Servicio: Alta velocidad Media distancia

Composición	Masa en vacío (OM)
M+M+M+M	221,5 t
Velocidad máxima	Longitud total tren
250 km/h	107,1 m
Potencia	Plazas
4.400 kW	237
Tensión de alimentación	Freno regenerativo
1x25 kV CA	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía
Asíncrono CA	1.435 mm

Serie 130		
	Composición	Masa en vacío (OM)
	M+11R+M	329,0 t
	Velocidad máxima	Longitud total tren
	250 km/h	200 m
	Potencia	Plazas
	4.800 kW	319
	Tensión de alimentación	Freno regenerativo
	1x25 kV CA / 3 kV CC	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía	
Asíncrono CA	1.435 mm	

Servicio: Larga distancia

Serie 102		
	Composición	Masa en vacío (OM)
	M+12R+M	329,0 t
	Velocidad máxima	Longitud total tren
	330 km/h	200 m
	Potencia	Plazas
	8.000 kW	319
	Tensión de alimentación	Freno regenerativo
	1x25 kV CA	Sí
Tipo de motor	Ancho de vía	
Asíncrono CA	1.435 mm	

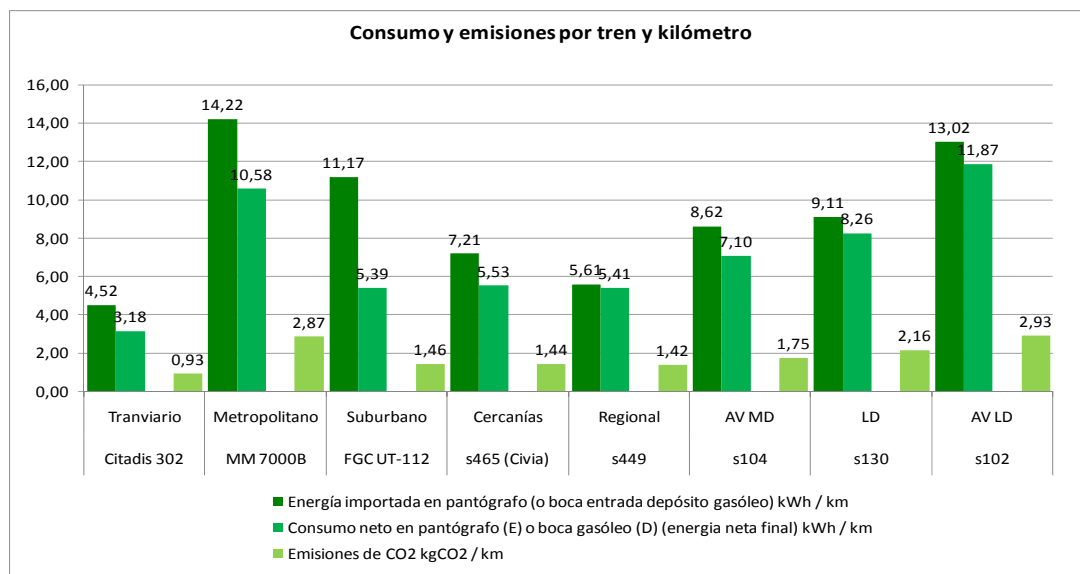
Servicio: Alta velocidad Larga distancia

3.2. Resultados del consumo por tipos de tren y servicio

En primer lugar se calculan con el simulador los consumos y emisiones por kilómetro recorrido de los trenes-tipo en su servicio-tipo. En todos los casos la energía neta es inferior a la importada. Ello se debe a que todos los trenes simulados disponen de freno regenerativo.

En aquellos que realizan muchas paradas la diferencia entre la energía importada y la neta es mayor, debido a la mayor energía disipada en las reducciones de velocidad (tranviario, metropolitano y suburbano). En el suburbano la diferencia es todavía mayor debido a las fuertes pendientes de la línea que obligan a frenar para no superar la velocidad máxima.

Figura 1. Consumo y emisiones por kilómetro



Fuente: Elaboración propia

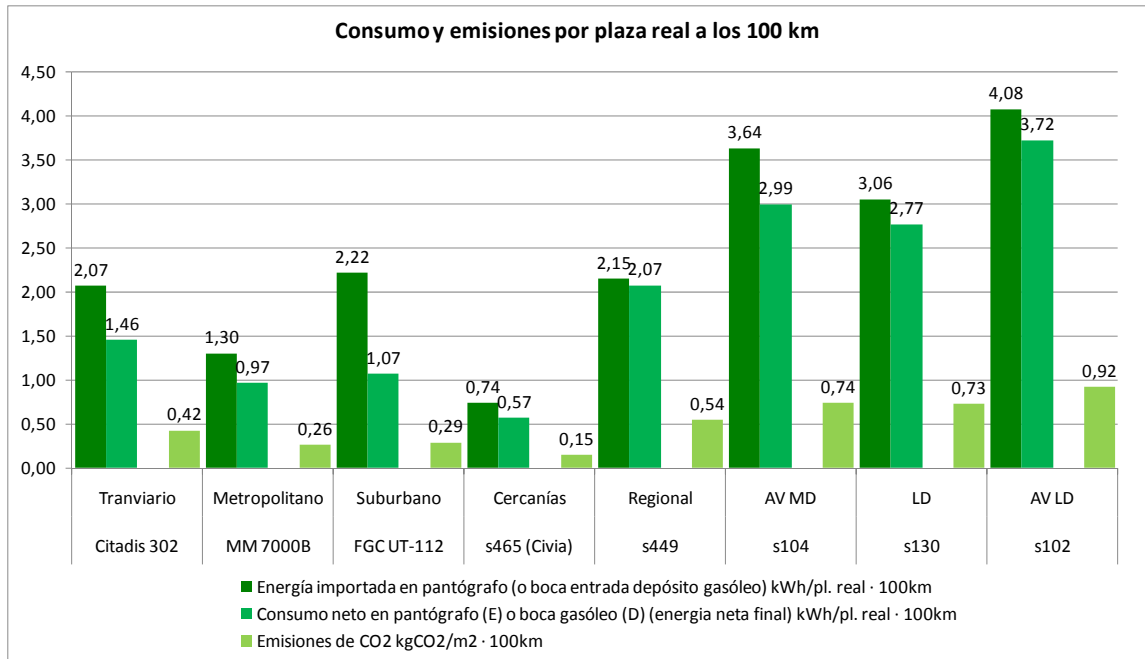
Existen tres factores que hacen que la comparación anterior entre vehículos no sea homogénea:

- El tamaño del vehículo: ya que cuanto mayor es el vehículo, menor es el consumo por plaza.
- La densidad de plazas y servicios: cuanto más pequeñas son las plazas o menor el espacio entre ellas, resulta menor el consumo por plaza.
- La distancia recorrida: algunos consumos están relacionados con la distancia recorrida por el vehículo, mientras que otros son proporcionales al tiempo de viaje.

En las siguientes simulaciones se irán eliminando dichos factores de heterogeneidad para llegar a resultados que sean homogéneos y comparables.

Los consumos y emisiones corresponden a trenes de capacidades muy diferentes. Por ello, los mismos resultados se muestran ahora por plaza·kilómetro.

Figura 2. Consumo y emisiones por plaza real y kilómetro



Fuente: Elaboración propia

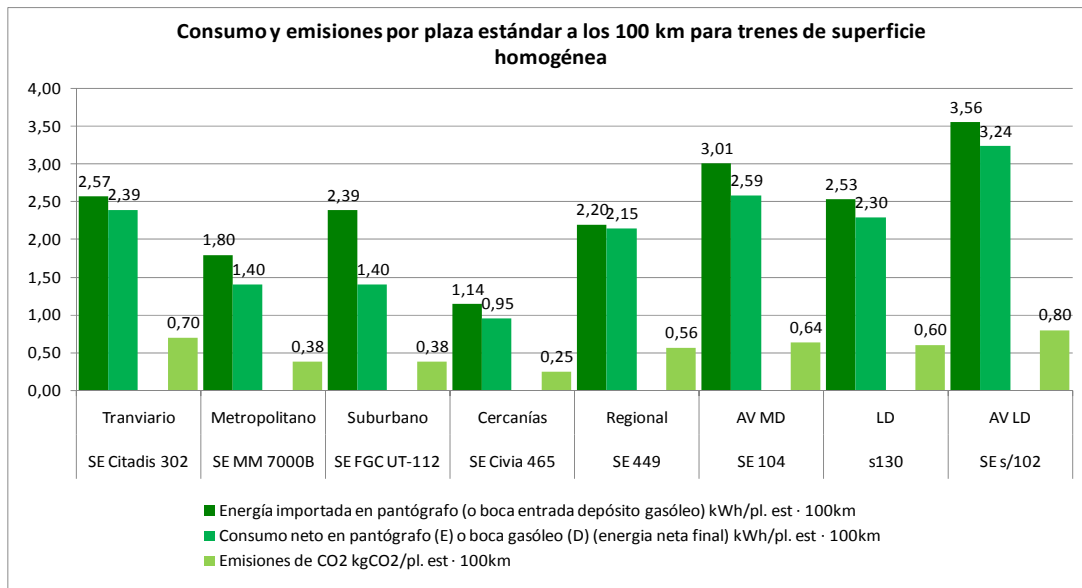
Si se compara el consumo de energía neto por tren kilómetro el tren de alta velocidad es el que más consume (11,87 kWh/km) seguido muy de cerca por el metropolitano (10,58 kWh/km) y el que menos consume es el tranvía (3,18 kWh/km). Sin embargo si la comparación de consumos se hace por plaza real se observa que el que tiene mayor consumo es el tren de alta velocidad (3,72 kWh/plaza.100km) pero sin embargo el metropolitano (0,97 kWh/plaza.100km) junto con el cercanías (0,57 kWh/plaza.100km) son los que tienen menor consumo.

3.2.1 Homogeneización de la capacidad

Para eliminar las distorsiones producidas por la diferencia de tamaños de vehículos (capacidad) se iguala la superficie útil bruta de los trenes. Para ello se ha tomado como superficie de referencia la superficie interior del tren de la serie 130 (empleado para los servicios de larga distancia) que es de 496,64 m² y se han adaptado los parámetros del resto de los vehículos.

A continuación se muestran los consumos por “plaza estándar”, que se obtiene multiplicando la superficie útil del vehículo por la densidad de plazas y servicios. Esta densidad depende del tipo de servicio (por ejemplo, metropolitano: 3 viajeros/m², cercanías: 2,49 viajeros/m², alta velocidad: 1 viajero/m²).

Figura 3. Consumo y emisiones por plaza estándar y kilómetro



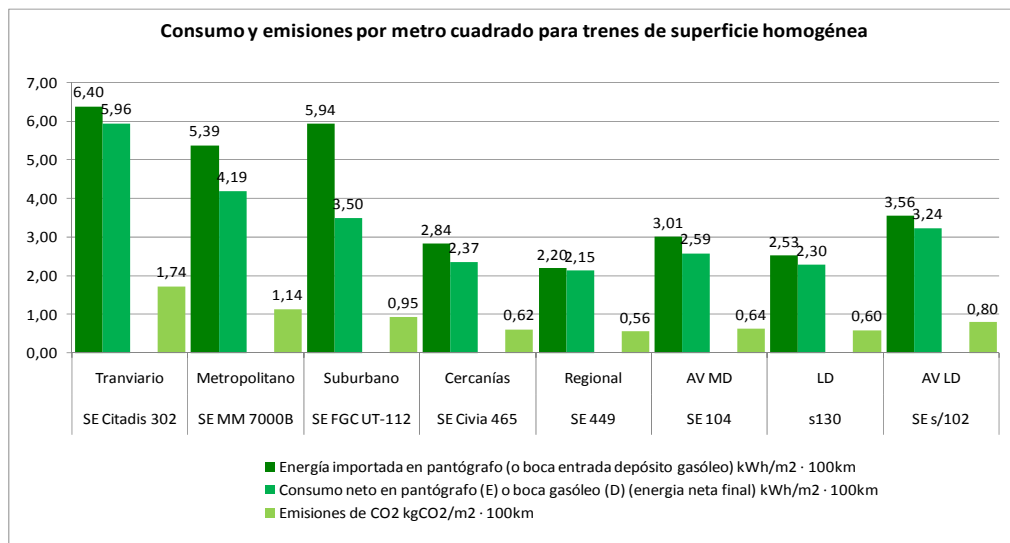
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, al calcular el consumo por plaza estándar los trenes con una mayor densidad de plazas y servicios son los que obtienen mejores resultados, por ejemplo, el metropolitano y el suburbano tiene un consumo de 1,40 kWh/plaza estándar.100 km, frente a los 3,24 kWh/plaza estándar.100 km del tren de alta velocidad.

3.2.2 Homogenización de la capacidad genérica con independencia de su uso

Para eliminar las distorsiones introducidas por los diferentes usos que se le puede dar a la superficie de los trenes destinada a viajeros, es decir, por la diferente densidad de plazas y servicios, se muestran a continuación los resultados por unidad de superficie para los trenes de superficie homogénea.

Figura 4. Consumo y emisiones por unidad de superficie y kilómetro



Fuente: Elaboración propia

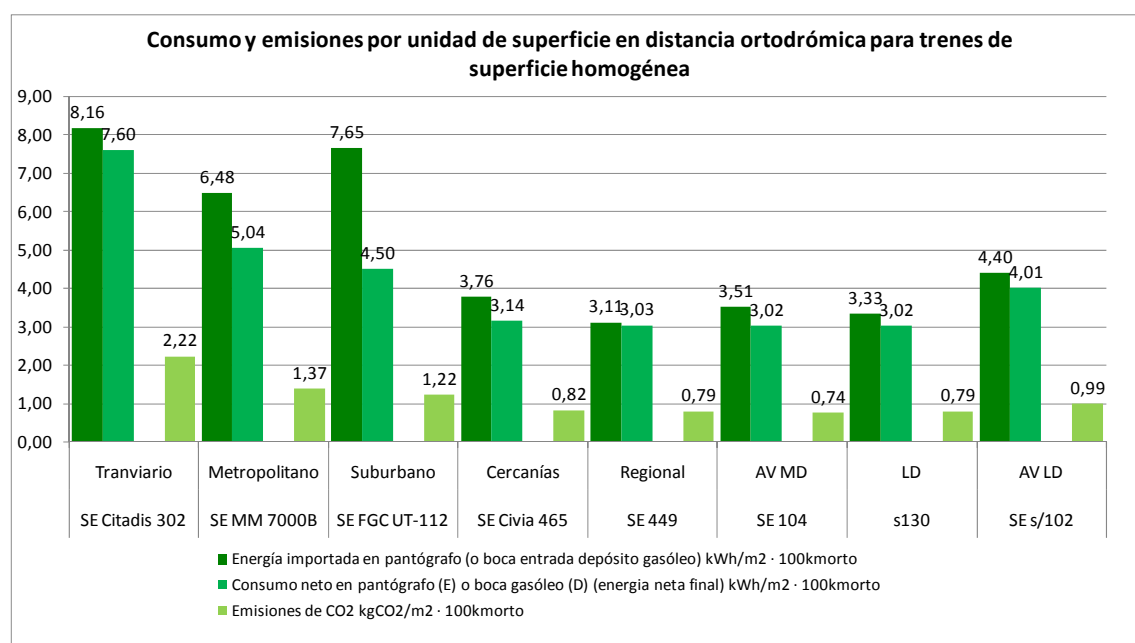
Como se puede observar, los vehículos pequeños que antes salían muy beneficiados, ahora tienen los consumos más altos. El tren que presenta un mayor consumo por unidad de superficie es el tranvía (5,96 kWh/m²) frente al tren de alta velocidad que tiene un menor consumo (3,24 kWh/m²), esto significa que, a igual de superficie densidad de plazas y servicios, el tren que menos consume es el de alta velocidad.

3.2.3 Homogeneización de la distancia

Todos los resultados presentados anteriormente se han mostrado por kilómetro recorrido, sin embargo en ciertos casos, para poder comparar distintos tipos de servicios con otros modos de transporte es conveniente realizar los cálculos por kilómetro en línea recta entre los puntos de origen y destino.

A continuación se muestran los consumos y emisiones por unidad de superficie y por distancia ortodrómica⁵.

Figura 5. Consumo y emisiones por unidad de superficie y kilómetro ortodrómico



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, no cambian significativamente los consumos. Pero los consumos en distancia ortodrómica son siempre superiores a los de línea real, ello es debido a que en el ferrocarril la distancia ortodrómica siempre es muy inferior a la distancia real.

⁵ Distancia ortodrómica: es el camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre; es el arco del círculo máximo que los une, menor de 180 grados.

Tabla 13. Relación entre la distancia real y la ortodrómica

TREN SERVICIO	SE Citadis 302 Tranviario	SE MM 7000B Metropolitano	SE FGC UT-112 Suburbano	SE Civia 465 Cercanías	SE 449 Regional	SE 104 AVMD	s130 LD	SE s/102 AV LD
D. real / D. ortodrómica <i>km real / km orto</i>	1,28	1,20	1,29	1,32	1,41	1,17	1,32	1,24
Distancia real <i>km real</i>	9,83	23,42	15,31	38,40	247,20	178,50	530,10	512,50
Distancia ortodrómica <i>km orto</i>	7,70	19,50	11,89	29,00	175,00	153,00	403,00	414,00

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Incidencia de cada uno de los términos del consumo de energía

A continuación, a partir de la cifra de consumo calculada para los trenes de superficie homogénea por kilómetros en distancia ortodrómica, estudiaremos el peso de cada uno de los factores. Para ello se desglosa la energía importada en diversos sumandos:

- Energía para vencer las resistencias mecánicas, que agrupa:
 - Energía para vencer la resistencia mecánica al avance en recta.
 - Energía para vencer la resistencia adicional al avance en curvas.

Energía disipada en el freno, que agrupa:

- Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad, menos la empleada para vencer la resistencia al avance en el proceso de deceleración.
- Energía potencial disipada en el freno en pendientes sin conducción económica.
- De esta energía una parte se pierde y otra se recupera mediante el freno regenerativo.

Energía para vencer las resistencias aerodinámicas, que comprende:

- Energía para vencer la resistencia de la entrada de aire
- Energía para vencer la resistencia aerodinámica en cielo abierto.
- Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica en túnel
- Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica debida al viento exterior.

Consumo de auxiliares, que comprende:

- Energía consumida por los auxiliares comerciales, iluminación.
- Energía consumida por los auxiliares comerciales, climatización.
- Energía consumida por los auxiliares técnicos.

Pérdidas en el vehículo, que agrupa:

- Pérdidas en la locomotora, es decir, las pérdidas en la cadena de tracción por rendimiento.

- Pérdidas en la alimentación de los equipos auxiliares, tanto comerciales como técnicos.

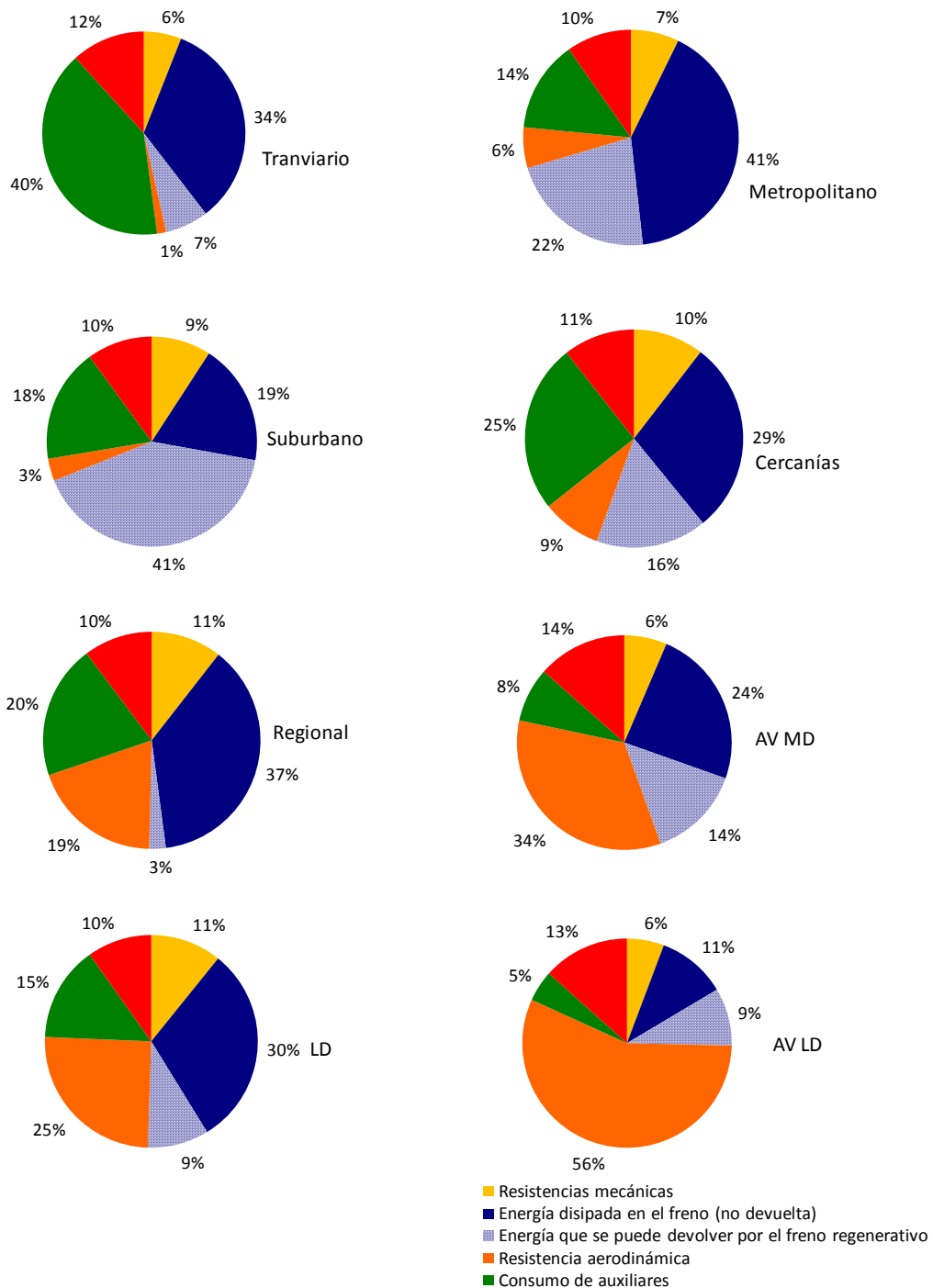
La tabla muestra el peso de cada uno de los componentes del consumo sobre la energía importada:

Tabla 14. Peso de cada componente del consumo de energía

TREN SERVICIO	SE Citadis 302 Tranviario	SE MM 7000B Metropolitano	SE FGC UT-112 Suburbano	SE Civia 465 Cercanías	SE 449 Regional	SE 104 AV MD	s130 LD	SE s/102 AV LD
Resistencias mecánicas	6%	7%	9%	10%	11%	6%	11%	6%
Energía disipada en el freno	34%	41%	19%	29%	37%	24%	30%	11%
Energía devuelta por el freno reg.	7%	22%	41%	16%	2%	14%	9%	9%
Resistencia aerodinámica	1%	6%	3%	9%	19%	34%	25%	56%
Consumo de auxiliares	40%	14%	18%	25%	20%	8%	15%	5%
Pérdidas en el vehículo	12%	10%	10%	11%	10%	13%	10%	13%

Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Peso de cada componente del consumo de energía



Fuente: Elaboración propia

De estos gráficos del desglose de la energía importada podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Las resistencias mecánicas se encuentran en torno al 10% en todos los trenes, aunque este término se compone de dos sumandos, resistencia al avance en recta y resistencia al avance en curva, que no tienen el mismo peso en todos los casos.

- Las resistencias aerodinámicas suponen el 56% del consumo en alta velocidad larga distancia, 34% en alta velocidad media distancia y 25% en larga distancia. En el resto de servicios se encuentran entre el 19 y el 1%.
- El consumo de auxiliares alcanza el 40% en el servicio tranviario. En el resto de servicios se encuentra entre el 25 y el 5%. El consumo de los servicios auxiliares es proporcional al tiempo de funcionamiento de los equipos.
- Las pérdidas en el vehículo debidas a los rozamientos son en todos los servicios próximas al 11%.
- La energía disipada en el freno supone el 41% en metropolitano, 37% en regional y 34% en tranviario. En el resto de servicios oscila entre el 29 y el 11%.
- La energía devuelta por el freno regenerativo alcanza el 41% en suburbano. En el resto de servicios oscila entre el 22 y el 2%.

En general:

- En los servicios con muchas paradas (tranviario, metropolitano, suburbanos, cercanías y regional) la energía disipada en el freno tiene un peso alto debido a que la componente de la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad. Ello es debido a las reducciones de velocidad en las que se disipa energía cinética.
- En los servicios que discurren por tramos urbanos la energía disipada en el freno tiene un peso elevado debido a que la componente de energía potencial tiene mucho peso porque suelen tener pendientes muy fuertes (tranviario, metropolitano y suburbano).
- El consumo de los servicios auxiliares (directamente relacionado con el tiempo de viaje) es más elevado en metropolitano, suburbanos, cercanías y regional. En el caso del servicio tranviario esta cifra se duplica debido a las numerosas puertas con que cuenta el vehículo (5,5 metros de longitud de puertas por costado) que se abren cada muy poco tiempo en las paradas.
- En el servicio de alta velocidad y larga distancia la componente que predomina es la energía para vencer las resistencias aerodinámicas, que son proporcionales al cuadrado de la velocidad. En el caso de alta velocidad y media distancia sucede lo mismo, aunque también la energía cinética y potencial es elevada debido a las paradas intermedias en la que el tren tiene que frenar desde la velocidad máxima hasta su detención.
- En servicios de velocidad baja (al contrario que en los de alta velocidad) la componente de la resistencia mecánica es mayor (tranviario, cercanías) o muy similar (metropolitano) que la aerodinámica. En estos trenes por tanto, tiene mayor influencia la masa que el tamaño y la forma.

3.3. Análisis de sensibilidad a diversas variables

Se realiza a continuación un análisis de sensibilidad del consumo de energía de a diferentes variables en diversos tipos de servicio con sus trenes-tipo.

Para más simplicidad se han seleccionado sólo cuatro de los servicios tipos: tranviario, cercanías, larga distancia y alta velocidad larga distancia.

3.3.1 Análisis de sensibilidad a la variación de la masa

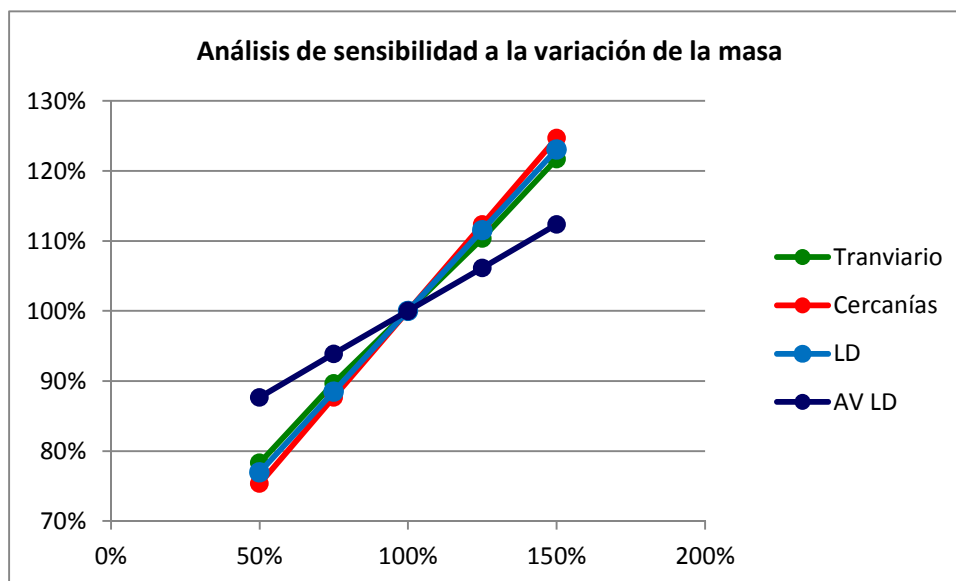
Se estudia a continuación la sensibilidad del consumo a la variabilidad de la masa.

Tabla 15. Sensibilidad a la variación de la masa

Análisis de sensibilidad a la variación de la masa				
Masa/Masa de referencia	Tranviario	Cercanías	LD	AV LD
50%	78%	75%	77%	88%
75%	90%	88%	88%	94%
100%	100%	100%	100%	100%
125%	110%	112%	112%	106%
150%	122%	125%	123%	112%

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Sensibilidad a la variación de la masa



Fuente: Elaboración propia

Los servicios de cercanías, larga distancia y tranviario son los más sensibles a la variación de la masa. Una disminución del 25% de la masa del vehículo supone reducir un 22% el consumo de energía, es decir, se observa una elasticidad de 0,88. Sin embargo, la sensibilidad del servicio de alta velocidad larga distancia es baja, con una elasticidad de 0,40.

3.3.2 Análisis de sensibilidad a la variación del coeficiente B (resistencia a la entrada de aire)

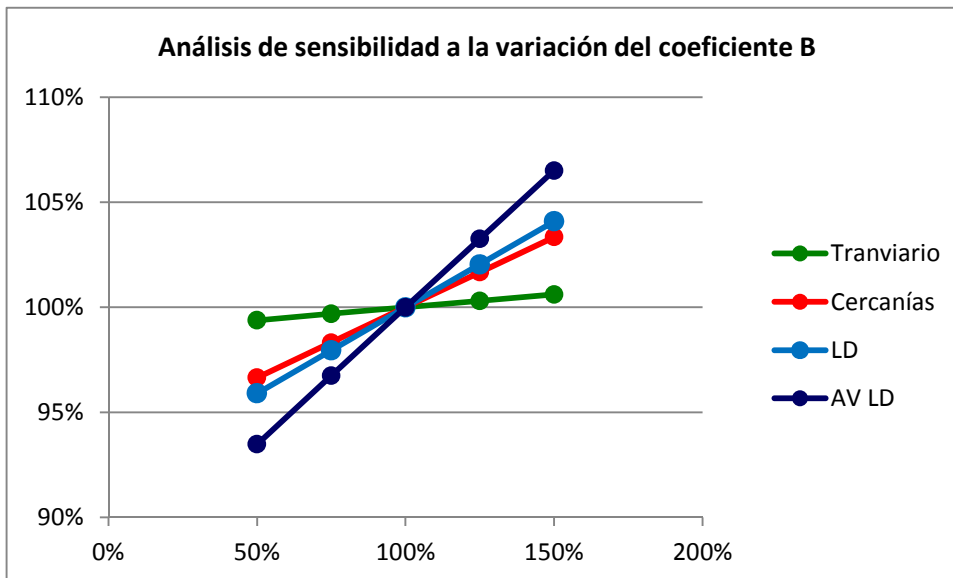
Se estudia a continuación la sensibilidad del consumo a la variación del coeficiente B, es decir, la resistencia a la entrada de aire.

Tabla 16. Sensibilidad a la variación del coeficiente B

Análisis de sensibilidad a la variación del coeficiente B				
Masa/Masa de referencia	Tranviario	Cercanías	LD	AV LD
50%	99%	97%	96%	93%
75%	100%	98%	98%	97%
100%	100%	100%	100%	100%
125%	100%	102%	102%	103%
150%	101%	103%	104%	107%

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Sensibilidad a la variación del coeficiente B



Fuente: Elaboración propia

El servicio más sensible a la variación del coeficiente B es el de alta velocidad larga distancia, puesto que la resistencia a la entrada de aire es directamente proporcional a la velocidad. Una disminución del 25% del coeficiente B se traduce en una disminución del 3% del consumo de energía, es decir, la elasticidad es 0,12. El efecto es prácticamente inapreciable en ferrocarriles de baja velocidad como el tranvía.

3.3.3 Análisis de sensibilidad a la variación coeficiente C (resistencia aerodinámica)

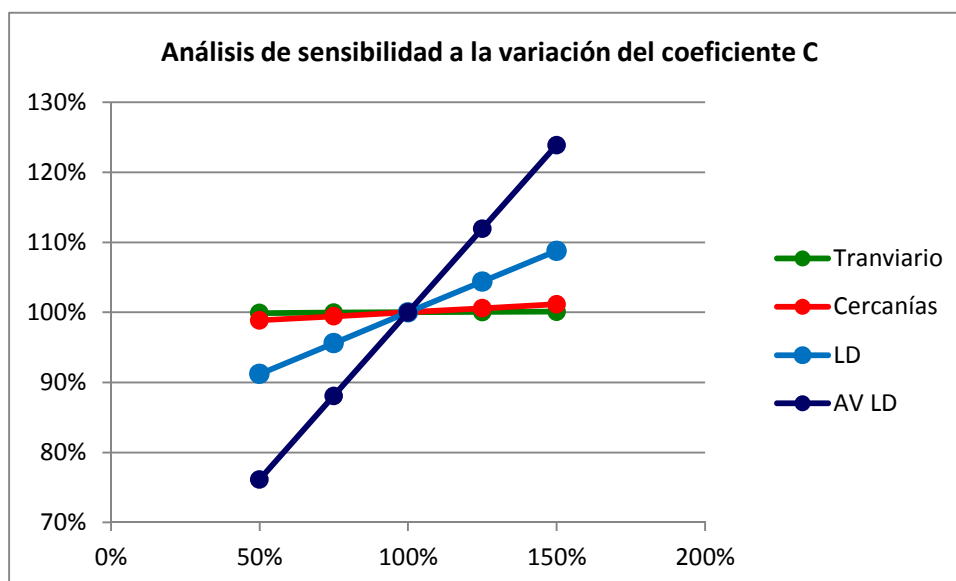
A continuación se estudia el efecto que tiene sobre el consumo la reducción del coeficiente C, es decir, de la resistencia aerodinámica.

Tabla 17. Sensibilidad a la variación del coeficiente C

Análisis de sensibilidad a la variación del coeficiente C					
Masa/Masa de referencia	Tranviario	Cercanías	LD	AV LD	
50%	100%	99%	91%	76%	
75%	100%	99%	96%	88%	
100%	100%	100%	100%	100%	
125%	100%	101%	104%	112%	
150%	100%	101%	109%	124%	

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Sensibilidad a la variación del coeficiente C



Fuente: Elaboración propia

El efecto de la reducción del coeficiente C es especialmente notable en alta velocidad larga distancia, donde una reducción del 25% supone disminuir el consumo de energía un 22%, es decir, la elasticidad es 0,88. Sin embargo en trenes de baja velocidad apenas tiene efecto. Esto es debido a la resistencia aerodinámica crece con el cuadrado de la velocidad.

3.3.4 Análisis de sensibilidad a la variación de la velocidad máxima

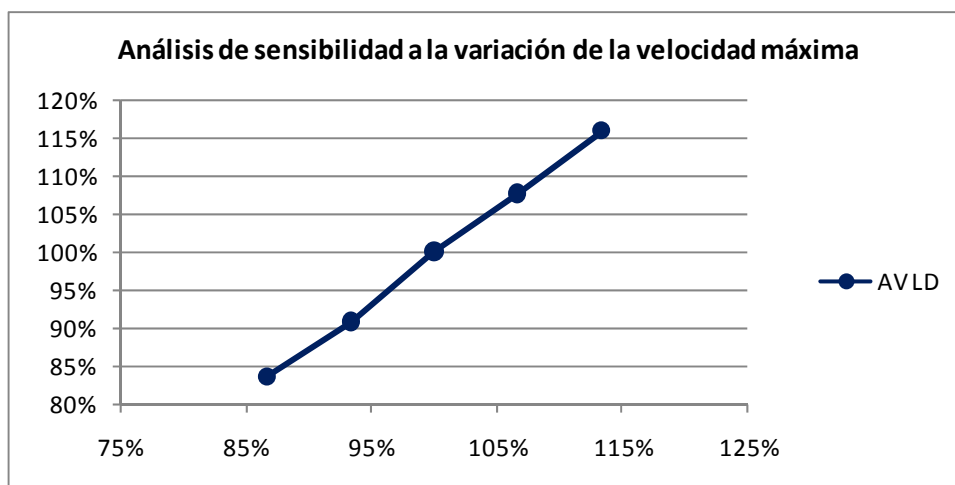
Uno de los factores más determinantes del consumo es la velocidad máxima y consecuentemente la media, especialmente en los trenes de alta velocidad. Por ello a continuación se estudia la sensibilidad del consumo de energía a la velocidad máxima del tren para el servicio de alta velocidad larga distancia.

Tabla 18. Sensibilidad a la variación de la velocidad máxima

AV LD			
Vmax	Vmedia	Inc. Vel.	Inc. Consumo
260	206,4	87%	84%
280	221,3	93%	91%
300	236,1	100%	100%
320	250,8	107%	108%
340	265,4	113%	116%

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Sensibilidad a la variación de la velocidad máxima



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse el consumo aumenta de manera directamente proporcional al aumento de la velocidad.

3.4. Influencia del tipo de tracción

A continuación se compara el consumo de un tren con tracción eléctrica a diferentes tensiones. Para ello se ha tomado el servicio y el tren de larga distancia convencional y se ha modificado exclusivamente la tensión de alimentación, manteniéndose

iguales el resto de parámetros tanto del servicio como de la línea. Los resultados se muestran por plaza estándar en distancia ortodrómica.

Tabla 19. Consumo a diferentes tensiones de alimentación

		2x25kV ac	1x25kV ac	3kV cc	1,5kV cc
Consumo neto en pantógrafo (E)	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	3,182	3,182	3,022	3,022
Consumo a la entrada de la subestación (E)	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	3,253	3,294	3,202	3,326
Consumo en barras de la central de generación (E)	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	3,294	3,368	3,392	3,523
Consumo energía primaria	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	7,199	7,362	7,413	7,700
Consumo energía fósil	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	5,276	5,396	5,433	5,644
Emissiones de CO ₂	<i>kgCO₂/m² · 100km_{orto}</i>	0,767	0,785	0,790	0,821

Fuente: Elaboración propia

El consumo neto en pantógrafo es superior en los dos casos de electrificación en corriente continua, esto se debe a que las pérdidas en el vehículo son mayores en corriente alterna que en continua. Sin embargo, el consumo en barras de la central es inferior en tracción alterna que en continua porque las pérdidas en el transporte y distribución de la energía son superiores en electrificaciones en corriente continua.

A continuación se compara el consumo de un tren con tracción diésel y transmisión mecánica, hidráulica y eléctrica en corriente continua y corriente alterna. Para ello se emplea nuevamente el servicio y el tren de larga distancia convencional.

Tabla 20. Consumo de trenes diésel con diferentes transmisiones

		Diesel- mecánica	Diésel- hidráulica	Diésel- eléctrica c.c.	Diésel- eléctrica c.a.
Consumo en boca de depósito	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	7,573	8,719	8,823	7,976
Consumo energía primaria	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	8,929	10,280	10,402	9,403
Consumo energía fósil	<i>kWh/viajero · 100km_{orto}</i>	8,929	10,280	10,402	9,403
Emissiones de CO ₂	<i>kgCO₂/m² · 100km_{orto}</i>	1,986	2,286	2,313	2,091

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias que se aprecian en boca de depósito son debidas al rendimiento de la transmisión. El consumo más bajo se corresponde con la transmisión mecánica, seguida por la eléctrica de corriente alterna, la hidráulica y finalmente la eléctrica de corriente continua.

3.5. Conclusiones

De todos los resultados expuestos anteriormente se puede concluir que:

- Existe una gran variabilidad en los valores de consumo y emisiones dependiendo del tipo de tren y servicio.
- Para poder comparar diferentes servicios es necesario homogenizar previamente la capacidad y la distancia recorrida por el vehículo.
- El peso de cada uno de los sumandos que componen el consumo del tren es diferente dependiendo del tren y el servicio.

4. MEDIDAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS TRENES

La fase del diseño de un sistema ferroviario ofrece una buena oportunidad de mejorar la eficiencia energética, tanto en lo que se refiere al diseño de trenes como del trazado de la línea ferroviaria.

Las medidas adoptadas en esta fase de diseño tienen un coste de implantación menor que las adoptadas posteriormente, y su eficacia suele ser mayor.

Los vehículos de transporte pueden tener propiedades que contribuyan al menor consumo de energía. Su diseño puede, pues, orientarse a la reducción del consumo de energía y de las emisiones a lo largo de su vida que por otra parte suele ser largo (de 25 a 35 años normalmente).

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

Los parámetros del tren sobre los que se puede actuar en el momento del diseño y que inciden en el consumo de energía son muy numerosos. De todos ellos, los que tiene más incidencia en el consumo específico de energía (por unidad de capacidad) son:

- Masa del tren (y masas rotativas equivalentes) por unidad de capacidad.
- Sección transversal y superficie mojada del tren por unidad de capacidad.
- Coeficiente de transmisión de calor K de la caja del tren.
- Existencia de un sistema de reducción la entrada de aire en el tren.
- Coeficiente de rozamiento entre rueda y carril y empleo de ejes orientados radialmente.
- Número de bogies y de ejes.
- Rendimientos del motor y de la cadena de tracción.

Además, y aún cuando no es algo que incida de forma directa en el consumo, debe señalarse que una buena accesibilidad (que se logra con puertas numerosas, anchas y situadas a la altura del andén) reduce el tiempo de parada. Por ello, para el mismo tiempo de viaje, reduce el consumo de energía.

Relación entre tamaño y eficiencia del tren

Los trenes tienen un menor consumo por unidad de capacidad (por plaza o por superficie útil) cuanto más grande sea el tren; es decir, cuanto mayor sea su capacidad. Se puede afirmar que hay "economías de tamaño" del tren.

Esta propiedad es consecuencia de que cuanto mayor sea el tren, más se "diluyen" ciertas masas y superficies que son necesarias para tren, pero son que independientes de su tamaño (por ejemplo, las cabinas de conducción, o la sección transversal)

Hay ciertas variables (por ejemplo la masa del tren) cuya reducción tiene un efecto en la reducción del consumo de energía, pero si la reducción de la masa es consecuencia de una reducción del tamaño del tren, se puede perder el efecto positivo, precisamente por estas "economías de tamaño". Por ello, normalmente para reducir el consumo específico lo más correcto será reducir el inductor específico (por ejemplo, la masa por plaza estándar o por metro cuadrado útil; o la sección transversal por plaza).

4.2. Mejora de las variables que inciden en el consumo

Reducción de la masa específica de los trenes

En el sistema ferroviario, los vehículos tienen una masa por plaza muy superior a la que se observa en el resto de los modos de transporte. En un tren, la tara por plaza ofrecida suele estar en el entorno de los 800 a 1.200 kilogramos, frente a los 200-300 kilogramos del coche, los 500 kilogramos del autobús o los 300 kilogramos por plaza del avión,

En los trenes mercancías, las cosas no son muy diferentes. En el caso de los trenes, la tara de tren por cada tonelada de capacidad es del orden de 800 kilogramos, frente a los 600 kilogramos del camión.

Además, en el caso de los vehículos ferroviarios, las masas rotativas equivalentes son proporcionalmente mayores que en las de cualquier otro vehículo de transporte, debido a la elevada masa de las ruedas y de los ejes.

Sobre la incidencia de la masa del vehículo en consumo de energía y las emisiones del transporte ferroviario, pueden formularse tres reflexiones:

- Tiene una incidencia especialmente elevada en el caso del transporte urbano y suburbano, con elasticidades de +0,6 y 0,7. La reducción de la masa es importante en los servicios tipo tranvía y tipo cercanías; y es menor en el caso de los servicios de alta velocidad.
- La importancia de la masa en el consumo tiende a disminuir cuando los trenes equipan freno regenerativo y cuando se implantan medidas para el aprovechamiento de la energía generada en el frenado.

- La masa de los viajeros no tiene, en general, incidencia en el consumo energético del tren debido a la elevada proporción entre masa del vehículo y masa de los viajeros. En los servicios de mercancías, y en algunos casos en tranvías, metros y cercanías, sí que puede ser relevante, aunque no tanto como en otros modos de transporte.

La masa incide en el consumo directamente e indirectamente de varias formas:

- La masa aumenta las resistencias mecánicas al avance, tanto en recta (el término independiente de la velocidad en la fórmula de la resistencia al avance puede considerarse proporcional a la masa con constantes de valor 1 a 2 decanewtons por tonelada), como en curva (la resistencia en curva puede considerarse proporcional a la masa con coeficiente de 0,008 a 1,4 decanewtons por tonelada según líneas (véase “Dinámica de los trenes de alta velocidad, García Álvarez, 7^a edición, 2009).
- La masa aumenta la energía cinética que el tren necesita absorber para acelerar y, por lo tanto (y esto es lo relevante desde el punto de vista del consumo), también aumenta la energía que disipa al frenar para reducir la velocidad.
- Análogamente, la masa es proporcional a la energía potencial que el tren necesita para subir las rampas y, por lo tanto, a la que disipa al frenar en las bajadas cuando necesita hacerlo para no rebasar la velocidad máxima.
- Una mayor masa requiere una mayor potencia para tener las mismas prestaciones (velocidad, aceleración), por lo que una mayor masa de la caja de los vehículos puede suponer que la necesidad de aumentar las masas de las locomotoras o coches motores, lo que supone, además, un aumento indirecto del consumo.
- Una mayor masa supone más consumo de energía en la fabricación del vehículo, especialmente por la energía incorporada los materiales del propio vehículo. La energía empleada en la fabricación de un vehículo ferroviario puede ser del orden del 3 al 8% de la energía consumida en su vida útil.

En cuanto a las masas rotativas, un aumento de éstas supone una mayor energía cinética almacenada al acelerar y por ello, un aumento de la energía perdida en freno para reducir la velocidad.

Las pérdidas relacionadas con la energía perdida en el freno para reducir la velocidad (tanto la debida a las masas como a las masas rotativas) y la energía perdida en el freno para bajar las pendientes pueden reducirse si el tren dispone de freno regenerativo y si existen dispositivos o procedimientos que permitan aprovechar o devolver a la red una parte o la totalidad de la energía regenerada en el freno.

Reducción de pérdidas en los servicios auxiliares

Las pérdidas de energía en los servicios auxiliares pueden reducirse de diversas formas, muchas de ellas relacionadas con la climatización de los trenes de viajeros (que es, con mucho, el mayor consumidor de energía entre los servicios auxiliares). Entre otras pueden citarse las siguientes:

- Mejora del rendimiento de los equipos auxiliares y reducción de la masa de los equipos.

- Reducción de las pérdidas de energía por transmisión al reducir el coeficiente K de transmisión del calor por la caja del vehículo.
- Reducción de cantidad de aire que entra el tren para su ventilación, ya que este aire debe ser acondicionado (cambio de humedad y de temperatura).
- Empleo de “bombas de calor” para la calefacción.
- Utilización del calor o frío del aire que se expulsa del tren en el proceso de renovación.

Reducción de las resistencias aerodinámicas

Las resistencias aerodinámicas al avance (que conllevan un consumo de energía) tienen especial importancia en alta velocidad. Para reducir el consumo de energía asociado, pueden adoptarse varias medidas, entre ellas, las siguientes:

- Reducción de la sección transversal de la cabeza y cola del tren.
- Reducción de la *superficie mojada* del tren (llamada *piel del tren*). Esta superficie es el producto del perímetro mojado (dos veces la altura más la anchura del tren) por la longitud del tren.
- Mejora de la forma aerodinámica de la cabeza y de la cola del tren
- Mejora de la calidad superficial y reducción de las discontinuidades (pasos entre coches, etc.)
- Reducción del número de pantógrafos en captación.
- Reducción de la cantidad de aire que entra en el tren (cuya masa debe ser acelerada).

Mejora de los rendimientos de tracción

Cualquier mejora en el rendimiento de la cadena de tracción se traslada inmediatamente al consumo. Para la mejora de los rendimientos se puede:

- Emplear cadenas de tracción totalmente o parcialmente eléctricas.
- Emplear motores de tecnologías más eficientes con mejores rendimientos.
- Reducir el número de motores, aumentando su tamaño.

4.3. Uso de arquitecturas eficientes del tren

La arquitectura del tren incide de forma importante en el consumo de energía del tren. Hay arquitecturas más eficientes que otras.

Los trenes autopropulsados son más eficientes que los remolcados. Los trenes autopropulsados resultan, en general, más eficientes que los remolcados por locomotora (especialmente para tamaños pequeños del tren). La razón principal es que el peso de la locomotora penaliza el consumo del tren. La masa por unidad de capacidad es normalmente más reducida en los trenes autopropulsados. También son más reducidas en estos trenes la sección transversal por plaza y la “piel del tren” por plaza.

Los trenes de caja ancha y de dos pisos son más eficientes. - Para vehículos de más de 50 metros de longitud normalmente tiene más importancia la resistencia aerodinámica de fricción que la presión, por lo que configuraciones de tren de caja ancha y/o de dos pisos son más eficientes que las de dimensiones convencionales. Y ello es así porque (para la misma capacidad) aumentan la anchura y/o la altura del tren (y con ellos la sección transversal), pero se reduce la longitud en una proporción mayor, lo que provoca una reducción importante en la *piel del tren* cuyo efecto positivo en el consumo es siempre mayor que el efecto negativo del aumento de la sección transversal.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 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"*. Monografía EnerTrans/6.
- [2] García Álvarez, A. (2007) *"Dinámica de los trenes en Alta Velocidad"*, documentos de explotación técnica y económica de ferrocarriles. 4ª edición. FFE
- [3] Olea Unamuno, F.J. (2008): *"Rendimientos de la tracción eléctrica"*. Monografías ElecRail.
- [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, 2006
- [5] Arenillas, J. y López Gómez, J.L. (2007) *"La tracción en los ferrocarriles españoles. La tracción diésel"*. Ed.: Vía Libre, FFE.
- [6] García Álvarez, A. (2007) *"Metodología para la evaluación y normalización de los consumos energéticos de los trenes de viajeros"* [1], comunicación presentada en el III Congreso de Innovación Ferroviaria, Tenerife, mayo de 2007.
- [7] 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"*.
- [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., Fernández, A.: *"Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte"*, Monografías EnerTrans/8.
- [10] Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio *"Flujos de la energía de la electricidad para el transporte"*: Monografía 9.
- [11] Martín Cañizares, M.P. y García Álvarez, A. *"Caracterización de los perfiles operaciones del ferrocarril español para el cálculo del consumo de energía y costes operativos"*. IX Congreso de Ingeniería del Transporte (Madrid, 8 julio de 2010)

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Parámetros característicos del servicio	12
Tabla 2. Fracciones de parada equivalente por reducción de velocidad según velocidad y de la limitación	13
Tabla 3. Valores del coeficiente por equipos para la ayuda a la conducción económica	15
Tabla 4. Parámetros del tren empleados en el modelo	16
Tabla 5. Parámetros del tren calculados	20
Tabla 6. Variables parametrizables consideradas independientes del tren	21
Tabla 7. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua	25
Tabla 8. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente alterna	25
Tabla 9. Rendimientos en el vehículo de tracción diésel	26
Tabla 10. Servicios tipo de cercanías	35
Tabla 11. Servicios tipo de larga y media distancia	36
Tabla 12. Vehículos empleados en los diferentes servicios tipo	37
Figura 1. Consumo y emisiones por kilómetro	40
Figura 2. Consumo y emisiones por plaza real y kilómetro	41
Figura 3. Consumo y emisiones por plaza estándar y kilómetro	42
Figura 4. Consumo y emisiones por unidad de superficie y kilómetro	43
Figura 5. Consumo y emisiones por unidad de superficie y kilómetro ortodrómico	44
Tabla 13. Relación entre la distancia real y la ortodrómica	45
Tabla 14. Peso de cada componente del consumo de energía	46
Figura 7. Peso de cada componente del consumo de energía	47
Tabla 15. Sensibilidad a la variación de la masa	49
Figura 8. Sensibilidad a la variación de la masa	49
Tabla 16. Sensibilidad a la variación del coeficiente B	50
Figura 9. Sensibilidad a la variación del coeficiente B	50
Tabla 17. Sensibilidad a la variación del coeficiente C	51
Figura 10. Sensibilidad a la variación del coeficiente C	51
Tabla 18. Sensibilidad a la variación de la velocidad máxima	52
Figura 11. Sensibilidad a la variación de la velocidad máxima	52
Tabla 19. Consumo a diferentes tensiones de alimentación	53
Tabla 20. Consumo de trenes diésel con diferentes transmisiones	53

Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

Monografías:

Monografía 1: *“Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 2: *“Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica”*: Francisco Javier Olea.

Monografía 3: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria”*: José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tovagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz.

Monografía 4: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes”*: Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri.

Monografía 5: *“Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 6: *“Diseño de los vehículos ferroviarios para la mejora de su eficiencia energética”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 7: *“Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red”*: Ramón R. Pecharromán, Eduardo Pilo, Álvaro López.

Monografía 8: *“Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, Instituto de Investigación Tecnológica de Metro de Madrid.

Monografía 9: *“Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 10: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 11: *“Resultados de conducciones eficientes en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 12: *“Implementación, resultados y pruebas de los modelos para líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 13: *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables (ELECRAIL)”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.