



Monografía 16

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril

*Energy consumption and emissions associated with
transportation by rail*

Alberto García Álvarez
M^a del Pilar Martín Cañizares
<http://www.enertrans.es>

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril

Energy consumption and emissions associated with transportation by rail

Alberto García Álvarez

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 EnerTrans, 2008

ISBN: 978-84-89649-49-1

Depósito Legal: M-13506-2009

Esta monografía ha sido redactada por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación “*Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte*” (EnerTrans).

El proyecto *EnerTrans* ha sido desarrollado por los siguientes organismos: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA; Universidad de Castilla-La Mancha; ALSA; Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid; Fundación “Agustín de Betancourt”; Fundación Universidad de Oviedo.

El proyecto *EnerTrans* contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).

El proyecto *EnerTrans* estuvo dirigido por su investigador principal Alberto García Álvarez con el apoyo de un “Comité Científico” del que formaron parte las siguientes personas: Alberto García Álvarez (Fundación de los Ferrocarriles Españoles); Ignacio Pérez Arriaga y Eduardo Pilo de la Fuente (Universidad Pontificia Comillas de Madrid); Jose María López Martínez (Universidad Politécnica de Madrid-INSIA); Alberto Cillero Hernández y Carlos Acha Ledesma (ALSA); Timoteo Martínez Aguado y Aurora Ruiz Rúa (Universidad de Castilla-La Mancha); José Miguel Rodríguez Antón y Luis Rubio Andrada (Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid); Manuel Cegarra Plané (Fundación “Agustín de Betancourt”) y Rosa Isabel Aza y José Franciso Baños Pino (Fundación Universidad de Oviedo). El coordinador del proyecto por parte del CEDEX fue Antonio Sánchez Trujillano.

The aim of the EnerTrans research project is to obtain an accurate model to find out the energy consumption (and associated emissions) of the Spanish transport system, according to the important variables on which it depends, and thereby avoid the need to extrapolate historical data series calculated with various methodologies in the European sphere for each mode of transport. The participants include various universities and foundations linked to different modes of transport: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, Fundación Agustín de Betancourt and Fundación Universidad de Oviedo.

The project has involved constructing a model which can be used to explain and predict energy consumption (and associated emissions) in the Spanish transport system, using a coherent methodology for all modes, considering all energy utilizations (construction, operation, maintenance, movement) and the whole energy cycle from source to final use, thus allowing the effects of the results of infrastructure or transport policy to be anticipated and evaluated. As a secondary objective, the project will permit assessment of the impact of any type of technical or operational measure aimed at reducing this energy consumption, which will be useful for transport operators.

It includes innovations such as taking into consideration different routes between the same points for each one of the different modes of transport, or separating consumption from load or space utilization coefficients.

The published documents corresponding to the EnerTrans project fall into three categories: Monographs, Articles and Technical notes.



Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2006-006-01IASM.

Monografías
EnerTrans



Monografía 16

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril

*Energy consumption and emissions associated with
transportation by rail*

Alberto García Álvarez
M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografías EnerTrans /16 - *EnerTrans Project Documents* /16

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril

Energy consumption and emissions associated with transportation by rail

Alberto García Álvarez

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

<http://www.enertrans.es>

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Consumo de energía en el transporte	5
1.2. Objetivos y metodología	5
1.2.1 Objetivos	5
1.2.2 Metodología	5
1.3. Definición y clases de ferrocarril	5
2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS Y SU OPERACIÓN	7
2.1. Arquitectura de los vehículos	7
2.1.1 Tren remolcado.....	7
2.1.2 Tren autopulsado.....	9
2.2. Propiedades relacionadas con la arquitectura.....	11
2.2.1 Reversibilidad.....	11
2.2.2 Flexibilidad.....	14
2.3. La tracción y su posición en el tren	16
2.4. Trenes articulados y no articulados	20
2.5. Trenes de dos niveles y de caja ancha.....	24
2.6. Trenes de cajas inclinables	27
2.7. Tipos de vehículos empleados en el transporte de viajeros por tipo de transporte/distancia	31
2.7.1 Tranvías.....	31
2.7.2 Metros ligeros	31
2.7.3 Metros convencionales	32
2.7.4 Trenes de cercanías eléctricos.....	33
2.7.5 Trenes de media distancia.....	34
2.7.6 Trenes de larga distancia	34
2.7.7 Trenes de alta velocidad.....	36
2.7.8 Trenhotel	37
2.7.9 Resumen de las características de los trenes de viajeros	37
2.7.10 Mercancías	37
3. OPERACIÓN DE LOS SERVICIOS DE TRANSPORTE.....	39
3.1. Tipos de servicios para transporte de viajeros	39
3.1.1 Urbano 1: servicios tranviarios.....	39
3.1.2 Urbano 2: servicios de metro convencional.....	40
3.1.3 Metropolitano 1: servicios de metro ligero	40
3.1.4 Metropolitano 2: servicios de cercanías cortos.....	40
3.1.5 Metropolitano 3: servicios de cercanías largos	41
3.1.6 Interurbano 1: servicios de media distancia	41

3.1.7	Interurbano 2, 3, 4 y 5: servicios de larga distancia	41
3.2.	Explotación y ciclos operativos.....	42
4.	SISTEMAS DE PROPULSIÓN EN EL FERROCARRIL	43
4.1.	Clasificación general de los sistemas de tracción.....	43
4.1.1	Tracción vapor	43
4.1.2	La tracción eléctrica.....	44
4.1.3	Tracción diésel	46
4.1.4	La tracción por turbina de gas	47
4.2.	La cadena de tracción eléctrica	48
4.2.1	Motores empleados, tamaño y potencia.....	49
4.2.2	Rendimientos en el vehículo en tracción eléctrica y variables de las que depende	49
4.3.	La cadena de tracción diésel	49
4.3.1	Motores empleados en la tracción diésel.....	49
4.3.2	Transmisiones.....	50
4.3.3	Rendimientos y emisiones en tracción diésel y variables de las que dependen.....	52
5.	DINÁMICA DEL TREN.....	53
5.1.	Resistencia al avance	53
5.1.1	Resistencia mecánica al avance	54
5.1.2	Resistencia a la entrada del aire	58
5.1.3	Resistencia aerodinámica de presión y fricción	58
5.2.	El efecto de la gravedad	61
5.3.	Ecuación del movimiento del tren.....	62
5.3.1	Expresión simple de la ecuación del movimiento.....	62
5.3.2	El efecto de la inercia de las masas giratorias	63
5.3.3	Expresión completa de la ecuación del movimiento del tren.....	64
5.4.	Dinámica del tren en pendientes y rampas	65
5.4.1	Dinámica del tren en rampas.....	65
5.4.2	Dinámica del tren en pendientes	66
5.4.3	Consideración conjunta de la pendiente y la rampa	67
5.5.	Freno	69
5.5.1	Condiciones de aplicación del freno	69
5.5.2	Prestaciones mínimas de los frenos	71
6.	CONSUMO Y EMISIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA	75
	LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Consumo de energía en el transporte

En el sector del transporte se produce un consumo de energía especialmente intensivo, creciente y singularmente perjudicial para el medio ambiente.

Y ello agravado por el hecho de que el modelo de transporte dominante actualmente (supuestamente “desarrollado”, pero intensivo en uso de energía y agresivo con el medio ambiente) sólo es accesible a una pequeña parte de la población mundial.

Se debe calificar el vigente modelo energético de transporte como “insostenible” y plantearse la necesidad de su modificación. El necesario cambio requiere el conocimiento profundo e intensivo de la relación entre los procesos de transporte y consumo de energía.

1.2. Objetivos y metodología

1.2.1 Objetivos

El objeto de este documento es analizar el consumo de energía y las emisiones asociadas en el transporte por ferrocarril y definir una función de consumo de energía (y otra de emisiones) para el ferrocarril, tanto en tracción eléctrica como en diésel, que incluya los inductores del consumo de la energía que emplea el ferrocarril, en su ciclo global de funcionamiento, tanto para su movimiento como para los servicios auxiliares.

También pretende ofrecer los parámetros necesarios para homogeneizar el consumo en las comparaciones entre varios vehículos o modos de transporte.

1.2.2 Metodología

Se emplea una metodología “bottom-up” ya que los consumos y emisiones se determinan a través del proceso físico que los produce (como contraposición de una hipotética metodología alternativa “top-down” basada en el reparto de consumos reales)

Se comienza con una descripción de los vehículos y de la forma de operarlos, para seguir con el análisis de los sistemas de propulsión, de las cadenas de tracción y de la dinámica del tren.

1.3. Definición y clases de ferrocarril

El ferrocarril es un modo de transporte caracterizado porque los vehículos en los que se transportan las personas y las mercancías, se mueven sobre dos carriles metálicos paralelos que además guían al vehículo a través de pestañas situadas en la parte interior de las ruedas de éstos.

Normalmente el transporte se realiza en un conjunto de varios vehículos enganchados entre sí, que forman los llamados “trenes”. En cada “tren” hay al menos un vehículo que realiza la fuerza necesaria para mover el tren (llamada normalmente “la fuerza de tracción”, o simplemente “la tracción”).

Dentro del ferrocarril, en su sentido más amplio, pueden distinguirse:

- Ferrocarriles de adherencia. En ellos la fuerza que mueve el vehículo se consigue exclusivamente por la adherencia las ruedas motoras y el carril;
- Ferrocarriles de adherencia parcial. La adherencia de las ruedas metálicas está complementada por la adherencia de unos neumáticos de caucho (por ejemplo, el Metro de París). En España no hay ferrocarriles de este tipo.
- Ferrocarriles de cremallera, que emplean en alguna parte de su recorrido el agarre una rueda dentada sobre una cremallera instalada entre los dos carriles. En España solamente hay dos ferrocarriles de cremallera, ambos en Catalunya; los de Nuria -en Girona- y de Montserrat -en Barcelona-, pero son muy abundantes los ferrocarriles de cremallera, por ejemplo, en Suiza.
- Ferrocarriles funiculares, en los que el movimiento se consigue por un cable situado entre los dos carriles que es movido por unos motores situados en los extremos de la instalación.

No entran en la definición de ferrocarril los trenes de levitación magnética (aunque la estructura de “tren” hace que a veces se consideren como ferrocarriles) ni los monorraíles o “people mover” que no emplean carriles metálicos para el guiado del tren.

Los ferrocarriles de adherencia puede clasificarse en: a) Ferrocarriles convencionales (y entre ellos, como grupos específicos; suele hablarse “de viajeros” o “de mercancías”); b) de alta velocidad; c) Metros; y d) Tranvías. No hay diferencias sustanciales entre estos sistemas y por ello las fronteras entre ellos son siempre difusas.

En los ferrocarriles, el movimiento se consigue con unos motores embarcados que transmiten el movimiento normalmente a unas ruedas que se apoyan en la adherencia sobre el carril, o a las ruedas dentadas de la cremallera. En los funiculares, el motor que mueve el cable no está embarcado en el vehículo.

La tracción en los ferrocarriles modernos puede ser eléctrica o diésel. La primera emplea motores eléctricos, alimentados normalmente por una fuente externa de electricidad que recibe a través de un hilo aéreo sobre el vehículo (“catenaria”), o por un “tercer carril”.

En la tracción diésel, el movimiento es producido por el motor diésel embarcado que transmite el movimiento a las ruedas a través de una transmisión mecánica o -más frecuentemente- hidráulica o hidromecánica.

Los vehículos con motores de tracción eléctricos que reciben la electricidad de un grupo motor diésel generador o alternador embarcado suelen considerarse como vehículos de tracción diésel con transmisión eléctrica (o “diésel-eléctrica”), por lo que en este documento seguiremos, en aras de homogeneidad con la literatura clásica, la denominación de diésel para estos vehículos.

Modernamente han aparecido vehículos mixtos, denominados “híbridos”, que combinan en el mismo tren la tracción eléctrica y la diésel-eléctrica, con lo que pueden circular por líneas no electrificadas, pero cuando circulan por líneas electrificadas pueden tener las ventajas de la tracción eléctrica.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS Y SU OPERACIÓN

Los trenes pueden tener muy diferentes arquitecturas y configuraciones, lo que produce entre ellos importantes diferencias de masa, tamaño y prestaciones y repercute en su consumo energético. Por ello parece oportuno incluir, para el lector no iniciado una descripción de las características relevantes de los vehículos y de los trenes empleados en el transporte ferroviario.

Para la descripción y análisis de la arquitectura y configuración de los trenes seguiremos el estudio “Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros” (García Álvarez et al. 2008) que puede consultarse para ampliar detalles.

Los vehículos para el transporte por ferrocarril de viajeros o de mercancías presentan la peculiaridad de que normalmente no circulan aislados, sino que varios vehículos circulan unidos solidariamente formando trenes que, o bien son remolcados por uno o varios vehículos situados en cabeza o cola; o bien lo son por vehículos motorizados situados a lo largo del tren.

2.1. Arquitectura de los vehículos

Desde el punto de vista operativo, quizá la clasificación más importante de la arquitectura de los vehículos es la que se establece entre los *trenes remolcados* por locomotora (también llamados a veces “*trenes convencionales*”) y los llamados *trenes autopulsados*. Las fronteras entre ambos tipos son cada vez difusas, al haber ido apareciendo elementos técnicos en el material remolcado que han permitido superar los inconvenientes que presentaban con respecto a los autopulsados, manteniendo a la vez sus propias ventajas.

2.1.1 Tren remolcado



El *tren remolcado* era el único que existía en el origen del ferrocarril: está formado por una “máquina” o “locomotora” que remolca un tren de varios vehículos para el transporte de viajeros (coches) y/o de mercancías (vagones).

Unión entre vehículos

La unión entre los diferentes vehículos que componen el tren (locomotora y coches y/o vagones) inicialmente era sólo mecánica, y tenía por objeto posibilitar el arrastre o remolque del material remolcado (coches o vagones) por la locomotora. Cuando la locomotora tracciona para acelerar el tren, subir una rampa o para vencer la resistencia al avance, transmite una fuerza al primer vehículo remolcado, éste al segundo y así sucesivamente. La tracción mecánica se ejerce normalmente a través de un gancho, situado entre cada pareja de vehículos consecutivos.

Cuando la locomotora frena, la inercia de los vehículos remolcados comprime éstos sobre la locomotora, lo que hace necesaria la existencia de elementos resistentes a la compresión (“topes”) que transmiten la fuerza de inercia de cada vehículo al que le precede en el sentido de la marcha.

A medida que fueron aumentando las velocidades, se hizo necesario que frenasen más vehículos en el tren, lo que se logró inicialmente de forma manual por la acción de unos trabajadores, denominados “guardafrenos”, que viajaban en algunos vehículos.

Más adelante, los trenes se pasaron a frenar por medio del *freno automático* con mando neumático (primero *de vacío* y luego *de aire comprimido*). Ello trajo consigo la necesidad de dotar de una conexión neumática (normalmente a 5 kg/cm² de presión) entre cada par de vehículos consecutivos. En los trenes de alta velocidad, hay además una conexión de mando eléctrico de freno de los vehículos remolcados, que se denomina *freno electroneumático* (E_p), con el que se evita el retardo que implica el mando neumático de las órdenes de freno¹.

Otras necesidades posteriores fueron ampliando las conexiones entre vehículos con mangas neumáticas de alta presión, conexiones eléctricas para equipos de mando y bloqueo de puertas, comprobadores de alarma y estado de elementos, etc.

Al agregar un vehículo a la composición de un tren es preciso realizar la unión entre las diferentes conexiones mecánicas, neumáticas, eléctricas y de datos; así como, en su caso, de las conexiones que permiten el paso de los viajeros (pasarelas y fuelles). A medida que tales conexiones se van haciendo más numerosas, el proceso de unión de los vehículos se complica, al requerir más tiempo para su realización y consiguientemente más coste.

Para evitar estos inconvenientes se han desarrollado diversos sistemas de “enganche automático” que tienen la ventaja de requerir menos tiempo y recursos humanos para realizar estas operaciones, pero presentan el inconveniente del mayor coste de adquisición y mantenimiento, así como la incompatibilidad de los vehículos si el sistema no está extendido a todos y cada uno de ellos.

Figura 1. Conexiones mecánicas, neumáticas y eléctricas entre tres autopulsados eléctricos de la serie 442 en Cotos.



Foto: Gonzalo Rubio (2007)

¹ De observarse que el freno neumático no es el único que se emplea en los ferrocarriles modernos; en los que el freno eléctrico tiene cada vez más importancia.

Clasificación de los trenes remolcados

Una clasificación de los trenes remolcados (también denominados *convencionales*), según su característica operativa más relevante, la encontramos en Ribera (2007a). Este autor destaca que en el “tren convencional” el control de los servicios auxiliares, puertas, información, etc... es normalmente descentralizado. Es decir, cada coche controla sus servicios; o desde un coche (no desde la locomotora) se controlan, por ejemplo, las puertas exteriores o la megafonía. Los trenes así definidos, para el autor, se clasifican en dos grandes grupos:

- *Tren traccionado*: Es un tren convencional en el que la locomotora se encuentra en cabeza del tren en el sentido de la marcha. Cuando hay que cambiar de sentido, es necesario cambiar la locomotora de posición o añadir otra locomotora en la parte de atrás y retirar la que tenía antes.
- *Tren “Push- Pull”*: En este caso, hay una locomotora en un extremo del tren, pero en el otro hay una cabina de conducción con la misma funcionalidad que una cabina de la locomotora. Por lo tanto, en las inversiones de sentido de marcha, solo es necesario que el maquinista cambie de cabina. Este tipo de trenes se aproxima a los *autopropulsados con tracción concentrada*, y podría llegar a confundirse con ellos. El encuadre en una u otra categoría depende de la integración de sistemas dentro de la composición; básicamente de la posibilidad de mando de los distintos sistemas desde las cabinas o un lugar habilitado en algún coche y de la posibilidad o imposibilidad de modificar la composición en ruta o en los talleres.

2.1.2 Tren autopropulsado



El *tren autopropulsado* es el integrado por un conjunto indeformable de vehículos, que incluye tanto la tracción como los espacios para los viajeros.

Los *trenes autopropulsados* tienen su origen en los *automotores*, que a su vez nacieron por emulación de los autobuses. Se trataba en general de un único vehículo (en principio unidireccional y posteriormente dotado de cabinas en ambos extremos) que llevaba viajeros y que era movido por un pequeño motor térmico. Estos vehículos eran muy apropiados en los primeros años del ferrocarril para rutas en las que no había muchos viajeros, y por lo tanto las potencias necesarias no eran muy grandes, y así podía instalarse el motor en el propio vehículo en el cual se transportaban los viajeros.

Tradicionalmente, los vehículos autopropulsados eran de tracción térmica (primero de gasolina y luego de gasóleo), si bien también han existido automotores de tracción vapor. Normalmente los trenes autopropulsados se han empleado para transporte de viajeros.

El aumento de la demanda hizo que a estos automotores se añadiesen posteriormente algunos remolques: primero sin cabina de conducción y sin posibilidad de paso de viajeros; más adelante los remolques disponían de paso de viajeros y cabina de conducción en el extremo. Circulaban automotores diésel con hasta tres y cuatro remolques.

Las menores dimensiones de los motores eléctricos (frente a los diésel, de mayor tamaño y peso) permitió el rápido desarrollo de estos trenes autopropulsados en el ámbito de la tracción eléctrica (Arenillas, 1986). De hecho, en esta tracción han alcanzado su mayor aplicabilidad, puesto que el entorno fundamental de uso de los

trenes autopropulsados es la alta velocidad y los servicios de cercanías, en ambos casos casi siempre electrificados.

Los vehículos autopropulsados para servicios de medias y largas distancias han tenido también extendida aplicación en España, lo que sin embargo no ha ocurrido en otros países de nuestro entorno. Así, en Francia y Alemania casi siempre se han empleado trenes remolcados, generalmente con cabina de conducción en ambos extremos para los servicios de Larga Distancia, con la excepción de los de alta velocidad.

Vehículos que integran los trenes autopropulsados

Los vehículos que integran los *trenes autopropulsados* suelen clasificarse de la siguiente forma:

- Coches motores (aquellos que llevan los elementos de tracción, espacio para viajeros y, en muchos casos, cabinas de conducción).
- Remolques (no tienen ni elementos de tracción, ni cabina),
- Remolques con cabina de conducción
- Motrices (o cabezas motrices). Son vehículos que llevan los equipos de tracción pero que no incluyen espacio para los viajeros. Como se ha expuesto, ésta es una categoría que en la práctica ha aparecido con los trenes de alta velocidad (“ramas”), y que en realidad son semejantes a las locomotoras, pero que, por integrarse en un tren normalmente indeformable, no suelen tener más que una cabina de conducción y en ocasiones carecen de todos los equipos necesarios, parte de los cuales se instalan en los coches.

Características y clasificación de los trenes autopropulsados

Ribera (2007a) señala que el tren autopropulsado tiene como características más destacables: a) ser indeformable (salvo en taller), y por lo tanto tener una composición constante en cuanto a plazas y prestaciones; b) tener una integración de sistemas y mando de los mismos; y c) tener cabinas de conducción permanentes en cada uno de los extremos (como en el caso de los trenes “*Push-pull*”). Naturalmente, se pueden acoplar varias composiciones para aumentar la capacidad, pero las prestaciones, en cuanto a aceleración, se mantienen como si fuera una única unidad

Ribera clasifica estos trenes en dos grandes grupos, según cuál sea la distribución de la tracción:



- *Tracción concentrada*: Este caso hay una “locomotora” o motriz un extremo; y puede haber otra motriz, y en todo caso hay una cabina, en el extremo opuesto. Las motrices tienen una cabina en el frontal y no la tienen en el lado de acoplamiento con los coches de viajeros. Hay casos, poco frecuentes, en el que las motrices están intercaladas dentro de la composición; esta configuración presenta el inconveniente de que se rompe la continuidad de desplazamiento dentro del tren.



- *Tracción distribuida*: En los trenes de *tracción distribuida*, la zona de viajeros se extiende de cabeza a cola del tren con la única salvedad de las cabinas de conducción.

2.2. Propiedades relacionadas con la arquitectura

2.2.1 Reversibilidad

Figura 2. Proceso de inversión del sentido de la marcha de un automotor de única cabina



Foto: Alberto García Álvarez; Río Adaja (2001)

La *reversibilidad* hace alusión a la posibilidad de que el tren circule indistintamente en cada uno de los dos sentidos a la misma velocidad, sin realizar para ello ninguna maniobra adicional. La condición de reversibilidad se traduce en la posibilidad de disponer de un puesto de conducción en cada uno de los extremos del tren, dotado de todos los elementos necesarios para que el tren, pueda circular en condiciones y a velocidades normales. No debe considerarse reversible un tren que puede circular en sentido contrario al normal pero a velocidad más reducida, ya sea por razones técnicas o reglamentarias.

Son reversibles los automotores, así como los trenes autopropulsados (tanto eléctricos como diésel).

Tren unidireccional

El concepto de “*tren no reversible*” no debe ser confundido con el aún más restrictivo de *tren unidireccional*, que es el tren que sólo puede circular en un sentido, debido por ejemplo, al ángulo de ataque rueda-carril (como era el caso del tren español Talgo II).

Figura 3. Tren unidireccional Talgo II invirtiendo su sentido en el triángulo de Aravaca

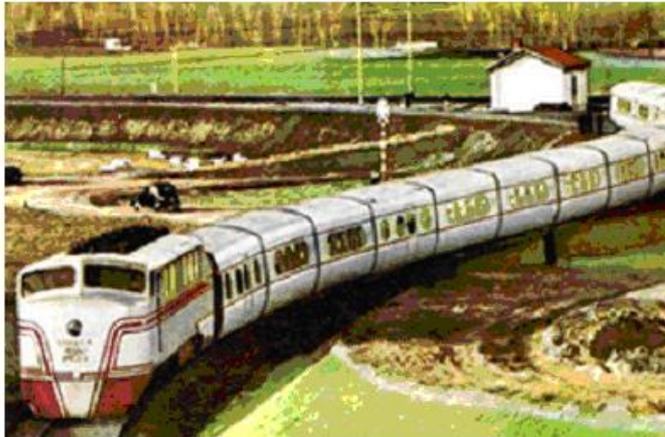


Foto: Talgo (hacia 1958)

El tren Talgo II, por ser unidireccional, debía ser invertido al final de cada viaje. En la foto, se observa realizando esta operación a un tren de este tipo en el triángulo construido en Aravaca expresamente para este fin.

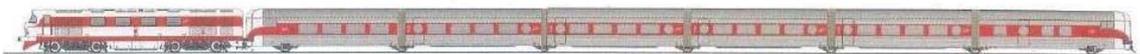
Los problemas que impedían a un tren circular en ambos sentidos han desaparecido ya en la práctica. Sólo se debe recordar que estos trenes exigían la reversión completa en el final del recorrido, lo que debía hacerse en un conjunto de vías con planta triangular.

Cabina única

También cabe considerar como vehículo (no reversible) a las locomotoras y las cabezas motrices que sólo tienen cabina de conducción en uno de sus extremos, por lo que al no poder circular en condiciones normales con el extremo sin cabina en cabeza (caso muy frecuente en las locomotoras de vapor y en algunas diésel), la locomotora debe ser invertida en los extremos del recorrido, y para ello se precisa de una placa giratoria o triángulo.

En España los únicos vehículos motores no reversibles (además de las máquinas de vapor con tender separado), han sido la locomotora prototipo diésel 1.615, las locomotoras de la serie 352 para el remolque de los trenes Talgo; y, más modernamente, las cabezas motrices de los trenes de la serie 130, que pueden circular aisladas, pero sólo tienen cabina de conducción en un extremo.

Figura 4. Talgo III con locomotora de cabina única



Dibujo: Manuel Galán Eruste

Las máquinas 2000T (352) para el remolque de los trenes Talgo III, tenían una única cabina de conducción por lo que debían ser invertidas al final del recorrido

Inconvenientes de la no reversibilidad

Los inconvenientes de emplear un material no reversible se derivan de la necesidad de realizar maniobras cuando el tren llega a un punto en que no es posible (por la topología de las vías) continuar en el mismo sentido en el que llegó: al no disponer de puesto de conducción en el extremo de cola, es preciso realizar una maniobra que reviste generalmente una de las tres formas siguientes:

- Pasar la locomotora de cabeza a cola (para salir remolcado por la misma locomotora en sentido contrario),
- Disponer de una segunda locomotora que se acople por cola para salir en cabeza,
- Invertir el sentido del tren completo (triangulando) para continuar con la misma locomotora.

Cada una de estas posibilidades tiene sus ventajas e inconvenientes relativos. La primera y la tercera presentan el inconveniente de que se emplea mucho tiempo en ellas (lo que suele ser especialmente negativo en el caso en que la maniobra haya que realizarla con viajeros dentro del tren); mientras que la segunda (que es la más rápida), tiene el inconveniente de su mayor coste al precisar de una segunda locomotora y de otro agente de conducción para continuar el tren.

La necesidad de la inversión del sentido de la marcha se puede producir por dos causas:

- En una estación intermedia del recorrido de un tren, cuando el tren llega a un punto en la que por la disposición de vías, no puede continuar en el mismo sentido. Ello puede ocurrir en dos casos:
 - En estación en fondo de saco (Zúrich, Valencia Término, etc.) que puede tener un número importante de trenes pasantes por ella pero cuya topología les exige siempre una reversión.
 - En una estación de enlace entre dos líneas, cuando el ángulo que forman las vías por las que el tren debe entrar y salir es agudo, de forma que debe partir en sentido contrario al que llegó para tomar la nueva dirección.
- En la estación de destino si el próximo viaje que debe realizar el tren, como es lo habitual, es en el sentido contrario al viaje anterior. En este caso, debe realizarse algún tipo de maniobra, pero con la ventaja de que no tiene viajeros dentro mientras se lleva a cabo dicha operación. Estas maniobras no son especialmente problemáticas, salvo en el caso de servicios de alta frecuencia que obligue a tiempos de rotación bajos para evitar tener que emplear un vehículo más.

Figura 5. Maniobras en estaciones en "fondo de saco"



Foto: Alfonso Taboada, Tranvía Portal

En las estaciones en "fondo de saco" el tren debe invertir el sentido de marcha. Suele haber escapes entre las vías para que la máquina de los trenes convencionales pueda cambiar de posición, como puede verse en el curioso tren (con dos máquinas y un coche) en la estación de Vigo.

2.2.2 Flexibilidad

La *flexibilidad* hace alusión a la posibilidad de un tren de adaptarse a las necesidades de la demanda, a las características de la infraestructura y al tipo de servicio:

- En cuanto a la *flexibilidad en capacidad*, los trenes de material remolcado son más flexibles, puesto que una única locomotora puede remolcar un número variable de vehículos, y por tanto adaptarse mejor a las variaciones de la demanda. Las prestaciones (como la velocidad media) varían en función del número de vehículos, puesto que la tracción no aumenta proporcionalmente, pero la existencia de elevadas potencias en las locomotoras hace que, hasta un determinado nivel, la velocidad media sea bastante insensible a la composición del tren.
- La *flexibilidad* también puede analizarse desde el punto de vista de la *interoperabilidad*, en el sentido de que un tren interoperable puede recorrer más líneas y reducir las necesidades globales de parque, aunque coste podría ser mayor, siendo preciso llegar a un equilibrio entre ambos objetivos.
- La *universalidad* (capacidad de remolcar todo tipo de trenes como viajeros y mercancías por ejemplo) es también una característica operativa relacionada con la arquitectura del tren, pero con especial incidencia en las formas operativas.

Figura 6. Material remolcado



Foto: Alberto García (2007)

Notas: Los trenes de material remolcado son más flexibles, como se puede apreciar en esta foto, en la que una máquina 252 remolca tres coches convencionales a los que sigue un furgón Talgo y dos composiciones de Talgo III en el servicio “Miguel de Unamuno” de Irún, Salamanca y Bilbao a Barcelona.

- La flexibilidad en capacidad es relevante para caracterizar el consumo de energía de un tren, pues permite adaptar la oferta de plazas a la demanda, evitando el innecesario consumo energético del movimiento y climatización de los vehículos vacíos.

Al referirnos en este trabajo a la *flexibilidad* haremos referencia fundamentalmente al primer aspecto, ya que el segundo (que podrían también denominarse *interoperabilidad*) tiene más relación con aspectos ligados a la infraestructura y el tercero con la gestión de parque. Debe retenerse, no obstante, la idea de que una ventaja adicional desde el punto de vista energético de los trenes de composición flexible es que pueden circular por diferentes tipos de línea (electrificadas y no electrificadas, por ejemplo) con cambio de la máquina.

Formas de lograr la flexibilidad

La flexibilidad para adaptarse en capacidad a las distintas necesidades de la explotación, se puede conseguir, desde luego, acoplando entre sí dos trenes.

El material menos flexible sería un tren autopropulsado, que no pudiera acoplarse a ningún otro, ni tuviera posibilidad de que se le quitaran o añadieran coches en

ningún momento. Ello supondría un tren absolutamente rígido. Sin embargo no es lo normal, ya que hasta los trenes más rígidos tienen posibilidad de acoplarse, al menos, con otro tren. En todo caso, los incrementos de oferta que se puede lograr con dos trenes acoplados, son del 100% sobre la situación inicial (si se pueden acoplar más de dos, los incrementos sucesivos son del 50%, 33%, 25%, etc.)

Cuando los trenes acoplados no tienen paso entre sí, al juntar trenes completos, la reducción de costes que se puede obtener es muy pequeña: tan sólo si lleva “mando múltiple” se evita un segundo agente de conducción, y una parte de la resistencia al avance debido a tener solamente un frente de resistencia aerodinámica.

La flexibilidad real en cuanto a la capacidad, viene por dos posibilidades:

- Utilizar composiciones de desigual capacidad.
- Variar la capacidad de cada una de las composiciones. Esta variación de capacidad de cada composición puede concretarse de dos formas:
 - Agregando composiciones o bloques de coches completos, sin necesidad de agregar elementos tractores adicionales.
 - Agregando coches aislados a un tren.

En cada uno de los dos casos, la agregación o segregación de coches puede realizarse de dos formas:

- En ruta, o en una estación, por el propio personal de operación, sin tener que intervenir el personal de mantenimiento. Cuando se realiza la variación de composición en ruta, es muy importante la automatización que puede lograrse para asegurar que esta maniobra se realice en poco tiempo, y con una elevada fiabilidad y reducida necesidad de recursos. En Japón el desacoplamiento de trenes de alta velocidad se realiza en 1,5 minutos desde la llegada del tren hasta la salida del primero de los dos, de los cuales casi un minuto se emplea en subir y bajar viajeros (Mathieu, 1997). Evidentemente, la mayor necesidad de recursos, la baja fiabilidad y el elevado tiempo, restan eficacia a la flexibilidad ofertada por la configuración del tren.
- En taller, y por el personal de mantenimiento.

Las necesidades de cada operador dependerán, lógicamente, del tipo de operación que diseñe, pero las ventajas que tiene la flexibilidad (que deben ponderarse en cada caso para escoger el tipo de material más adecuado), son las siguientes:

- Evitar la realización de recorridos (coches.km y/o composiciones.km), que no son necesarios por falta de demanda en ciertos periodos. Para que sea interesante adquirir los coches que circulan en los periodos de mayor demanda, su amortización y costes de capital asociados, deben compensar la utilización marginal que se realiza de los mismos. Esto ocurre en numerosos servicios, en los cuales en ciertas horas del día o numerosos días al año, hay más demanda que durante el resto de los periodos. El hecho de que los costes de amortización del material adicional y de capital asociados se compensen con los ingresos marginales que genera la atención a tales periodos de alto tráfico, no significa que si tales coches pueden dejar de circular en los periodos de bajo tráfico, no se produzca una reducción importante de coste y del consumo energético
- Cuando existe material excedente a ciertas horas del día, pueden aprovecharse estos periodos para realizar labores de mantenimiento y de conservación.
- Si se pueden segregar coches en los periodos de menor tráfico, se evita el desgaste del material cuando no circula por falta de demanda.

2.3. La tracción y su posición en el tren

Vehículos con tracción

Los vehículos motores pueden ser *locomotoras* o *coches motores*. La *locomotora* es un vehículo destinado exclusivamente a efectuar la tracción del tren², mientras que el *coche motor* es normalmente parte de un automotor o tren autopropulsado, y lleva tanto los elementos de tracción, como plazas para los viajeros y espacio para equipajes.

Figura 7. Posición de la tracción en un tren



Foto: Gonzalo Rubio (2006)

Dos locomotoras de diferentes series (252 y 269) en cabeza de un tren de viajeros. El número de máquinas en cabeza está limitado por la fuerza que pueden transmitir los ganchos de tracción.

Recientemente ha aparecido, como ya se ha señalado, el concepto de “*cabeza motriz*” (o “*tractora*”) que es en realidad una locomotora, pero que forma parte de un tren autopropulsado, y por lo tanto está destinada a circular en un tren de este tipo. Es más semejante a una locomotora que a un coche motor.

Independientemente de dónde vayan ubicados los vehículos que aportan tracción a lo largo del tren, la utilización de una u otra forma de tracción, depende de los siguientes factores:

- En el caso de que la explotación se realice con *trenes remolcados*, deben utilizarse locomotoras, que ofrecen la versatilidad de poder utilizar máquinas de varios tipos (diésel o eléctricas, etc.), o emplear diferentes máquinas (o diferente número de ellas) según la velocidad que se desee alcanzar o las cargas que se precise remolcar. Además, el parque de locomotoras puede dimensionarse de forma diferente al parque de composiciones de coches remolcados.
- En el caso de los *trenes autopropulsados*, puede optarse entre las “*cabezas motrices*” (propias de la “*tracción concentrada*”) o los “*coches motores*” (de la “*tracción distribuida*”):
- Si la potencia requerida no es muy grande, normalmente un vehículo entero dedicado a vehículo motriz es excesivo, y por tanto, suelen utilizarse “*coches motores*” (tracción distribuida).

² Cuando en esta parte del trabajo nos referimos a la “tracción”, entendemos la tanto la tracción propiamente dicha, como otras funciones técnicas (conducción, freno, control de equipos etc.) diferentes del transporte de viajeros o mercancías.

- A partir de ciertas potencias (normalmente más de 2.000 kW por vehículo), los elementos tractores tienen gran volumen y masa, con lo cual el vehículo queda inhabilitado para otras funciones tales como transportar viajeros. Por tanto, suelen utilizarse una o varias cabezas motrices.
- En el caso de potencias muy grandes, es frecuente que exista una limitación adicional, no solamente por el volumen de equipos que puede ubicarse dentro de un vehículo, sino y sobre todo, por el peso del mismo, ya que normalmente las líneas de alta velocidad para circular a las velocidades de 300 km/h, admiten una carga máxima por eje de 17 t (19 t para 250 km/h), lo cual, en vehículos de 4 ejes, limita el peso total del vehículo a 68 t. Por ello, en muchas ocasiones los equipos auxiliares del tren (baterías, onduladores, etc.) no están ubicados en la locomotora o cabeza motriz, sino en algunos coches. Ello reduce el peso de la cabeza motriz, pero a costa de dificultar la flexibilidad del tren, ya que es imprescindible que los coches en los que se incluyen estos equipos formen parte de las composiciones.

La tracción distribuida en los trenes de alta velocidad fue introducida en Japón y en Alemania en los ICE 2.2. e ICE3. De este tren ha llegado a España en el AVE serie 103; aunque también presentan este esquema los trenes de alta velocidad de las series 104, 120 y sus derivados, pero por su menor potencia (4.000 kW), tamaño (110 m) y velocidad (250 km/h) pueden considerarse como evolución de electrotrenes para largas distancias en los que carecería de sentido instalar cabezas motrices. Más recientemente, también Alstom ha lanzado el tren AGV, tren de tracción distribuida para alta velocidad, y Talgo en su futura plataforma "Avril" introduce un concepto híbrido entre la tracción concentrada y la distribuida

Ventajas e inconvenientes de la tracción concentrada y de la tracción distribuida

Figura 8. Tracción concentrada vs. Tracción distribuida



Esquemas: Renfe-Operadora

Los dos más modernos y rápidos trenes de alta velocidad españoles frente a frente. En la comparación entre el tren Talgo 350 (serie 102 de Renfe, a la izquierda) y el ICE3 de Siemens (serie 103 de Renfe, a la derecha) permiten conocer las ventajas e inconvenientes de la tracción concentrada y distribuida.

La posibilidad de aplicar tracción distribuida (en los coches) en lugar de la tracción concentrada (en motrices o locomotoras) en cabezas motrices en trenes de alta velocidad ha despertado una fuerte polémica técnica entre los partidarios de una u otra tecnología, que se ha traducido en un análisis muy rico y útil sobre las ventajas e inconvenientes de uno y otro sistema.

Seguidamente se analizan, desde el punto de vista de la eficiencia del tren (que es el relevante en este trabajo), estas ventajas e inconvenientes, empleando los argumentos de diversas fuentes. Entre ellas, Ribera (2007a), Alstom (2007), Lorenzo (2005) y López Gómez (2005). Se exponen las ventajas de cada una de las configuraciones, entendiendo que, al tratarse de ventajas relativas, y siempre referidas exclusivamente a las diferencias entre la tracción concentrada y la distribuida, las ventajas de una opción son, correlativamente, inconvenientes de la otra y viceversa.

Debe señalarse, sin embargo, que al igual que en otras opciones, la solución idónea dependerá de las circunstancias de cada caso concreto; y, sobre todo, que no deben descartarse soluciones intermedias, que tengan ventajas de uno y otro sistema, aunque lógicamente asumiendo también algunos de los inconvenientes de cada uno.

Ventajas de la tracción concentrada

Como ventajas de la tracción concentrada se citan las siguientes:

- Desde el punto de vista del consumo energético, la principal ventaja es que el rendimiento de los motores (para la misma tecnología) es mayor que en los trenes de tracción distribuida por ser de mayor tamaño los motores de tracción.
- Tener agrupados todos los elementos de tracción en dos vehículos y facilitar así la disponibilidad de espacio en los coches de viajeros.
- Posibilita una mejor organización del mantenimiento (la tracción está sólo en dos sitios y hay muchos menos motores de tracción); aunque es discutida esta ventaja en el mantenimiento.
- Es mejor la protección contra impactos frontales en lo que se refiere a los viajeros.

Figura 9. Comparación entre tracción concentrada y distribuida

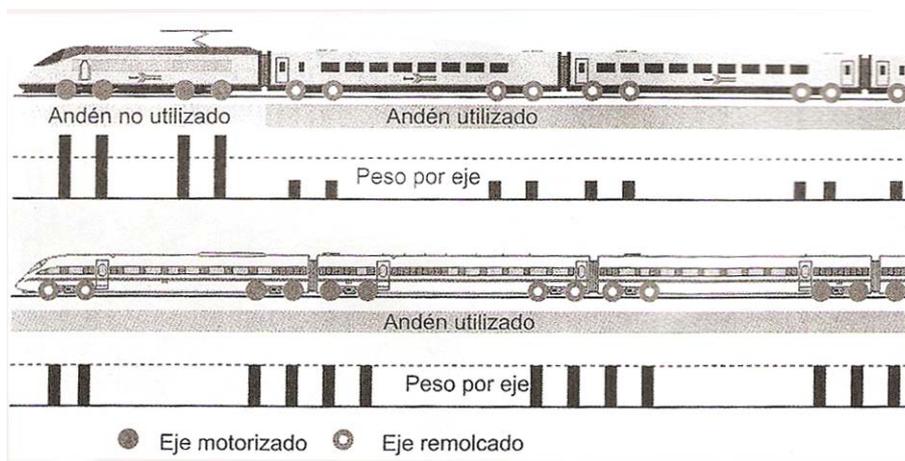


Figura tomada de Lorenzo (2005)

Entre la ventajas de la tracción distribuida se citan un mejor uso de la longitud de andén y el mejor reparto de la masa por eje

•

Ventajas de la tracción distribuida

En cuanto a las ventajas relativas de la tracción distribuida (con respecto a la tracción concentrada), puede citarse las siguientes:

- Los trenes de tracción distribuida disponen de más peso adherente y posibilitan mayor aceleración y teóricamente velocidades altas y una mayor posibilidad de frenado eléctrico. Esta característica admite diversos grados y puede medirse fácilmente a través del cociente entre la masa adherente y la masa total del tren. Cuando mayor sea este cociente, más aceleración en bajas velocidades y capacidad de freno eléctrico será capaz de tener el tren. [Sin embargo, debe observarse el índice de motorización real en cada caso, ya que como señala López Gómez (2005) al referirse al tren de alta velocidad de la serie 102, este tren tiene el 38,1% de los ejes motores, lo que pese a ser de tracción concentrada, le sitúa en este campo cerca de los valores de los trenes de tracción distribuida].
- El tren es más homogéneo, y los pesos por eje pueden ser menores que con la tracción concentrada. Esto último aparentemente es una ventaja, pero en alta velocidad pueden aparecer problemas aerodinámicos por el viento lateral.

- Quizá la ventaja mayor desde el punto de vista energético de la *tracción distribuida* es aprovechar mejor el espacio útil de andén. La medida de esta ventaja obtener de la división de las unidades de capacidad por longitud del tren. La tracción distribuida también posibilita el acceso a los trenes desde todo el andén, al contrario de lo que ocurre en los trenes tradicionales, en los que los extremos del andén, e incluso el centro en caso de composiciones dobles, están ocupados por las motrices.

La tabla muestra el carácter de tren de tracción concentrada o distribuida (incluyendo en los primeros a los trenes remolcados) de algunos trenes de alta velocidad. También se incluyen los indicadores inducidos por esta configuración (porcentaje de masa adherente, relación entre la longitud útil para los viajeros y la longitud total del tren) y factor del rendimiento estimado de los motores por el tamaño (hecha abstracción de la tecnología que no tiene que ver con e que sea tracción concentrada o distribuida).

Tabla 1. Indicadores de los efectos de tracción concentrada y distribuida en los trenes de alta velocidad

Tren	País	Arquitectura / tracción	Masa adherente / masa total	Masa por eje máxima / media	Longitud para viajeros / longitud de tren?	Fact. de rend. estim. motores por tamaño
AVE s/100	España	Concentrada	0,347	1,1	0,75	0,945
AVE s/102	España	Concentrada	0,422	1,1	0,75	0,95
AVE s/103	España	Distribuida	0,640	1,3	0,95	0,94
Avant s / 104	España	Distribuida	0,589	1,1	0,88	0,94
Alvia s / 120	España	Distribuida	0,502	1,0	0,92	0,94
Alvia s / 130	España	Concentrada.	0,449	1,1	0,78	0,94
Alta 252 +Talgo7	España	Concentrada.	0,354	1,4	0,87	0,95
Alaris s / 490	España	Distribuida.	0,392	1,2	0,87	0,94
TGV Dúplex	Francia	Concentrada.	0,349	1,1	1,4	0,945
Eurostar	Fr-Gb-Be	Concentrada.	0,257	1,0	0,83	0,95
Max 4	Japón	Distribuida.	0,6	1,1	1,5	0,94
ICE-2	Alemania	Concentrada	0,191	1,4	0,87	0,95

Elaboración propia

Ubicación de la tracción en el tren convencional

Las locomotoras normalmente van ubicadas en cabeza del tren. En el caso de que sean necesarias varias, la práctica tradicional ferroviaria había consistido en colocar una o dos locomotoras en cabeza del tren, y solamente en algunos casos se empleaba la “doble tracción por cola hasta un punto kilométrico”, cuando la locomotora de cola no tenía que circular acoplada todo el trayecto, sino solamente hasta llegar a un punto más alto del recorrido empujando el tren, y luego podía retroceder. Así esta locomotora, no enganchada al tren, hacía menos recorridos y se podía aumentar su utilización.

Sin embargo, el aumento de la potencia y la fuerza de tracción han provocado que, en algunas ocasiones, el aumento de la tracción no pueda realizarse por cabeza. Supongamos, por ejemplo, que un tren de mercancías necesita cuatro locomotoras.

Tiene que desarrollar unas potencias muy altas y por tanto, si todas van en cabeza, la fuerza de tracción es muy importante entre la última locomotora y el primer vehículo. Estas fuerzas de tracción tan elevadas pueden comprometer la integridad de los ganchos de tracción de los vehículos, y por lo tanto, a partir de un cierto número de locomotoras, se opta por repartirlas entre cabeza y cola de los trenes.

En Estados Unidos, donde los trenes de mercancías tienen unas longitudes y masas mucho más grandes que en España (frecuentemente llegan a trenes de 3 y 4 kilómetros de longitud y con 300 ó 400 vagones), incluso la fuerza necesaria para remolcar “medio tren” por un grupo de locomotoras en cabeza (hasta 3 ó 4) puede ser tan elevada que sea necesario intercalar (y así se hace algunas veces) un bloque de locomotoras en el centro de la composición, de manera que los trenes más pesados circulan con un grupo de locomotoras en cabeza, otras intercaladas en la composición y otras en cola.

Figura 10. Ubicación de la tracción condicionada por la resistencia de los ganchos



Foto: Cubero González, archivo Juan José Romero.

La explotación con máquinas en cabeza y cola se ha empleado más en Estados Unidos y para trenes de mercancías donde son necesarias grandísimas potencias, también se han dado casos en España. Así, por ejemplo, en la línea de Valencia a Zaragoza, eran frecuentes las cuádruples tracciones (doble por cabeza y por cola) en el Puerto de Escandón; en la línea del transporte de mineral de Minas del Marquesado-Almería, entre Doña María y Nacimiento (en la foto), donde se empleaban cuádruples tracciones con locomotoras diésel: dos locomotoras en cabeza hacían todo el recorrido, y adicionalmente dos en cola en el tramo entre estas dos estaciones, que era especialmente dificultoso.

Esta distribución de la tracción a lo largo del tren en distintos vehículos por razón de la fuerza de tracción que es capaz de transmitir el gancho, no tiene aplicación normalmente en los trenes de viajeros, ya que las fuerzas en este tipo de trenes, dada su reducida masa, no suelen llegar a los valores que hacen aconsejable esta distribución de la potencia. La distribución de vehículos motores en cabeza y cola (normalmente cabezas motrices o coches motores), responde en trenes autopropulsados a la conveniencia de favorecer la reversibilidad de las composiciones.

2.4. Trenes articulados y no articulados

Dos coches están *articulados* entre si cuando comparten un eje rodal o bogie en el que se apoyan ambos, pudiendo los coches tener un giro relativo entre ellos en el plano paralelo a la vía. Llamamos *trenes articulados* a aquellos que en los que los coches (con la excepción de los extremos) tienen tal carácter.

Los primeros trenes articulados a gran escala han sido los trenes Talgo. Desde el prototipo de 1942 hasta el tren *Talgo 350* de Alta Velocidad (serie102 de Renfe) todos los trenes Talgo han sido de coches articulados.

Posteriormente, ya desde los primeros años 80 del siglo XX, los trenes franceses de alta velocidad, adoptaron la técnica de los coches articulados (en este caso compartiendo bogies en lugar de rodales). Mientras que los trenes alemanes y japoneses de alta velocidad se han mantenido al margen de la articulación, modernamente muchos trenes de cercanías y tranvías en el mundo han adoptado también esta forma de unión.

Figura 11. Tren articulado de bogies



Foto: Gonzalo Rubio

Tren Euromed articulado con bogies entre los coches y motriz no articulada

Debe destacarse como una importante implicación operativa de los coches articulados, el que éstos son más cortos que los convencionales, ya que al estar los puntos de apoyo (pivotes de los bogies o rodales) en los extremos del coche, esta distancia no puede aumentarse (para un mismo ancho de caja) sin interferir el galibo en las curvas cerradas. En efecto, la caja invade la parte interior de la curva con una flecha que depende de la distancia entre estos pivotes o rodales. Por ello, en la práctica, esta condición se traduce en la desaparición de la longitud de los voladizos. Por ello, frente a la longitud típica de 25-26 metros de un coche de 2.950 milímetros de ancho exterior, en los trenes articulados la longitud de cada coche se reduce a unos 17-18 m (es decir, un 30% menos). Ello minimiza el efecto del aumento de peso por eje que suponen los trenes articulados, ya que típicamente tiene la mitad de ejes, pero la caja pesa alrededor de un 30 % menos.

Figura 12. Incidencia de la articulación en la longitud del coche

<p>Coche Convencional no articulado: 26,4 m longitud, 18,4 m entre pivotes de bogies</p>	<p>El coche extremo del tren Civia (articulado en un único extremo) mide 22,4 m y 17,75 entre pivotes</p>	<p>Coche intermedio de un tren Civia. Tiene 17,40 m entre pivotes, que es la también la longitud del coche por ser articulado.</p>

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se analizan las ventajas de uno y de otro tipo de unión entre coches.

Ventajas de los trenes de coches articulados

Entre las ventajas de los trenes integrados por coches articulados, frente a los de coches no articulados, pueden destacarse las siguientes:

- Mayor ligereza, ya que reduce el número de rodales o bogies (típicamente, un tren de V coches no articulados, tiene $V \times 2$ rodales o bogies, mientras que si es articulado tiene solo $V + 1$ rodales o bogies). Por ello se reducen tanto la masa, como las resistencias mecánicas asociadas a la rodadura y en consecuencia, el consumo de energía.
- En un tren autopropulsado, la masa de los bogies pueden ser de alrededor del 25% de la masa total del tren, por lo que puede suponerse que, a igualdad de los demás factores, para un tren de 8 coches la reducción de masa del tren articulado frente al no articulado puede ser del orden del 15%.
- El tren Cercanías Civia de 4 coches articulados (464), de capacidad casi idéntica al tren de tres coches no articulados de la serie 447, tiene 5 bogies en lugar de 8, y su masa es inferior en un 25% (una parte se debe al menor cableado -5t menos de cables y al menor peso de los motores y equipos-, pero alrededor del 18% es atribuible al carácter articulado del tren).
- Más confort y menos ruido, ya que los bogies, ejes, ruedas y rodales en los trenes no articulados se sitúan bajo los coches -y, por tanto, bajo los asientos de los viajeros-; mientras que en los trenes articulados están ubicados entre los coches, y esta disposición elimina la mayor parte del ruido y vibraciones en la zona de viajeros y amortigua los movimientos entre coches, gracias a la forma de unión entre cajas.
- Aumento de la rigidez y la seguridad pasiva ya que al ser los coches interdependientes aumenta la rigidez al tren. De este modo, en caso de descarrilamiento, el tren tiende a mantenerse como una única pieza y no se deforma su composición; al contrario que en los trenes no articulados que sufren el llamado efecto “acordeón”.
- Mayor estanqueidad. Puesto que los coches están unidos, existe un menor movimiento entre ellos. Por ello, es posible envolverlos en una carcasa resistente a las ondas de presión a fin de limitar los efectos de la presión del aire en los oídos durante el paso a alta velocidad por los túneles.
- Al reducirse el número de bogies o rodales, se reduce la resistencia aerodinámica. Esto es más relevante en los trenes de bogies, ya que la estructura compleja de los bogies crea remolinos de aire que aumentan la resistencia aerodinámica del tren. Por ello, a menor número de bogies, menor cantidad de turbulencias y menor resistencia al avance.
- Menor consumo energético. En el caso de los trenes urbanos y de cercanías y con frecuentes paradas, la reducción del consumo procede de la menor masa y menores resistencias mecánicas; y en el caso de servicios de alta velocidad, la reducción del consumo que es algo menor (aunque también apreciable) procede de la menor resistencia aerodinámica.

Puede estimarse que en servicios de frecuentes paradas, la reducción del consumo energético bruto (energía importada en pantógrafo) es de aproximadamente un 6-8%.

- Se reduce el coste de mantenimiento. Según señala Alstom (2007), los bogies representan entre el 35 y el 40% del coste de mantenimiento de los coches, dado que contienen las piezas que están más sometidas a desgaste

(como las ruedas, ejes, frenos y amortiguadores). Por ello, a menor número de bogies, menores costes de mantenimiento.

Ventajas de los trenes de coches no articulados

Como ventajas relativas de los coches no articulados pueden mencionarse las siguientes:

- Menor masa por eje, como consecuencia de disponer, para el mismo tren, de un mayor número de ejes. En la práctica, la condición de no rebasar la masa por eje admitida (especialmente en las líneas de alta velocidad) podría limitar en algunos casos la aplicabilidad de los vehículos articulados.
- Los trenes no articulados ofrecen más flexibilidad para las variaciones de la capacidad del tren al ser los enganches entre coches “convencionales”, y se pueden hacer acoplamientos en la vía, mientras que los trenes articulados sólo se pueden hacer en taller (o por grupos de coches como en el caso de los trenes Talgo). La tabla muestra qué trenes de entre los de alta velocidad analizados, tienen coches articulados y cuales no; así como algunos indicadores de los efectos de esta configuración como la masa por metro lineal de tren, y el número de ejes por metro lineal. Puede observarse que en todos los trenes articulados (excepto el Eurostar) la masa está por debajo de 2 toneladas por metro de tren y en todos los no articulados está por encima de esa cifra.

Tabla 2. Indicadores de los efectos de los coches articulados

Tren	País	Arquitectura / tracción	Coches Articul. (Sí/No)	Masa/ longitud tren	Ejes (o rod.) / longitud tren
AVE s/100	España	Concentrada	Sí	1,980	0,130
AVE s/102	España	Concentrada	Sí	1,608	0,105
AVE s/103	España	Distribuida	No	2,122	0,160
Avant s / 104	España	Distribuida	No	2,068	0,075
Alvia s / 120	España	Distribuida	No	2,524	0,149
Alvia s / 130	España	Concentrada.	Sí	1,694	0,109
Alta 252 +Talgo7	España	Concentrada.	Sí	1,558	0,098
Alaris s / 490	España	Distribuida.	No	2,003	0,151
TGV Dúplex	Francia	Concentrada.	Sí	1,950	0,130
Eurostar	Fr-Gb-Be	Concentrada.	Sí	2,013	0,117
ICE-2	Alemania	Concentrada	No	2,035	0,078

Fuente: Fabricantes y operadores. Elaboración propia

2.5. Trenes de dos niveles y de caja ancha

Los trenes cuyos coches de viajeros tienen dos niveles (“dos pisos”) y/o caja ancha presentan ciertas diferencias operativas con relevantes implicaciones en las prestaciones y en la eficiencia energética con respecto a los coches convencionales.

Trenes de dos niveles

Los trenes de dos niveles se diseñaron para ciertos servicios de Cercanías en los que era imposible aumentar la longitud de los andenes o la frecuencia de paso, por lo que la única manera de aumentar la capacidad de transporte era el incremento de plazas por metro lineal de tren.

Posteriormente, este problema se planteó también en las líneas de alta velocidad más frecuentadas, como las de Japón o, en Francia, ya que los trenes TGV están concebidos para funcionar como máximo en doble composición, y los andenes están dimensionados para la longitud de 400 m (este fue el caso de la línea de París a Lyon, donde comenzaron a circular los TGV Duplex en diciembre de 1996).

Figura 13. Serie 450 de Renfe Cercanías, dos niveles



Foto: Alberto García (2006)

Tras muchos años de explotación de trenes de dos niveles, se ha comprobado que a las ventajas de la mayor capacidad se ha unido la de un menor coste de adquisición y menor coste operativo y energético por plaza aunque en ocasiones requiere unos tiempos de parada elevados.

Ventajas de los coches de dos niveles

El tren de dos niveles tiene como ventaja principal un coste de adquisición, de operación por plaza (o por plaza equivalente) y consumo energético muy inferior al tren de un nivel.

La SNCF en su documentación sobre el TGV Duplex (1995) señala que (además de otras ventajas tales como un nivel de confort equivalente a los TGV más modernos), se consigue una oferta de plazas superior en un 45%, y una reducción de la inversión por plaza del 15%, así como menores costes de energía, conducción y mantenimiento.

Ventajas de los coches de un nivel frente a los de dos niveles

El tren de un nivel tiene un mayor confort y habitabilidad que el de dos niveles por disponer de una mayor superficie transversal, y especialmente una mayor altura en el nivel superior en las partes laterales.

Otra ventaja de tren de un nivel es que se evita el inconveniente de las escaleras para subir y bajar, que resultan incómodas, potencialmente peligrosas y, sobre todo, suponen una barrera para las personas de movilidad reducida que deben emplear un elevador por el interior del tren.

Además, trenes de un nivel al tener normalmente menos plazas o viajeros por cada puerta, requieren menos tiempo de parada en las estaciones. Pueden disponerse en cada costado del tren tantas puertas como sea necesario (en servicios de mucha rotación de viajeros son frecuentes tres puertas dobles); mientras que en los de dos niveles, están normalmente limitadas a dos puertas por costado.

Coches de caja ancha

Otro tipo de coche que ofrece prestaciones muy diferentes de los convencionales son los llamados *coches de caja ancha*, entendiéndose por tales aquellos que exceden en anchura los gálibos convencionales, tanto los normalizados UIC como, en España, el llamado “gálibo Renfe”.

En general, esos gálibos permiten una anchura exterior de coches del orden de 2,950 metros para los trenes convencionales (coche con máximo de 26 m de longitud y distancia entre pivotes de bogies del orden de 18 m), y también para coches articulados con distancias entre articulaciones del orden de 18 metros. En el caso del gálibo Renfe, y en los coches Talgo con distancias entre articulaciones de 13,1 m, el ancho exterior puede estar en el orden de los 3 metros si se da una sola de las dos circunstancias anteriores y de hasta 3,2 metros si se dan las dos simultáneamente (en el caso del Talgo III, el ancho exterior es de 3,250 m, pero no ha podido ser continuado en el Talgo pendular por la pérdida de anchura que en la parte baja de la caja induce la pendulación y la necesidad de adaptarse al gálibo UIC frente al gálibo Renfe del Talgo III).

Pues bien, en estos coches con ancho exterior entre 2,940 y 3,250 metros se obtienen anchuras interiores entre 2,700 y 3,100 metros, que permiten cumpliendo con las normas recomendadas de la ficha UIC para asientos de segunda clase, la instalación de 4 asientos por fila (podrían instalarse más asientos, pero con un confort inferior, más adecuado a los desplazamientos más cortos).

Existen, sin embargo, otros coches cuya anchura es superior a la permitida por los gálibos convencionales. Pueden citarse todos los trenes japoneses de alta velocidad que con ancho de vía estándar (1.435 mm), tienen una anchura exterior de caja de 3.450 mm, así como los trenes finlandeses y algunos alemanes. En todos ellos es posible instalar ofreciendo total comodidad cinco asientos de segunda clase por fila (incluso seis con menor confort), por lo que a estos trenes con una mayor capacidad por metro lineal de tren los llamaremos “coches de caja ancha”.

Figura 14. Tren Max E4 de dos niveles y caja ancha. El tren de alta velocidad de mayor capacidad del mundo



Foto: UIC

Ventajas de los coches de caja ancha

Los coches de caja ancha presentan como ventaja mayor su mayor capacidad, sin que el coste de adquisición de incremento en la misma proporción que la capacidad. Por ello, los coches de caja ancha presentan una mayor eficiencia económica y operativa que los convencionales. Andersson et al. (2001) señalan que un tren de caja ancha reduce los costes por viajero entre un 5 y un 10%. García Álvarez (2005) aporta una comparación entre un tren de caja normal y un piso y un tren de caja ancha de dos pisos con el siguiente resultado.

Tabla 3. Trenes de caja ancha vs. caja normal

Tren de alta velocidad 300 km/h 380 plazas	Caja normal 1 nivel	Caja ancha 2 niveles	Dif (%)
Longitud (m)	200	90	-55%
Masa (t)	400	183	-54%
Potencia (kW)	8800	4660	-47%
Coste	100	71	-29%
Consumo de energía (kWh/km)	18	11,6	-38%
Coste op. (€/km)	6,7	4,66	-31%

Fuente: García Álvarez (2005)

Frente a los coches de dos pisos (cuyas ventajas son cualitativamente semejantes), los de caja ancha tienen la ventaja de que se evitan las pérdidas de espacio de las escaleras (que afectan a los de dos niveles), una mayor accesibilidad, una mayor capacidad de entrada y salida de viajeros.

Ambas opciones arquitectónicas son compatibles, como ocurre con el tren japonés de alta velocidad Max E4, que tiene caja ancha y dos pisos, lo que le permite con su tracción distribuida, dar asiento a más de 700 personas en los coches del tren sencillo de 200 metros.

Figura 15. Comparación del interior de trenes de dos pisos



Foto: Alberto García (2007)

La caja ancha y alta permite dar más habitabilidad a los coches. A la izquierda, el nivel superior de un tren español de cercanías de la serie 451 con altura libre en el asiento lateral de 1.550 m. A la derecha, el nivel superior del tren Max E4 japonés, que consigue una altura mínima libre en el centro del asiento de 1.750 mm, y mayor anchura de asientos (aquí llevan 6 por fila) ya que el tren es 450 mm más ancho y 500 mm más alto.

2.6. Trenes de cajas inclinables

Desde mediados de los años 60 del siglo XX se ha venido investigando sobre la posibilidad de utilizar trenes de cajas inclinables que puedan circular por las curvas a mayor velocidad.

El principio de los trenes de cajas inclinables se apoya en el hecho de que las limitaciones de velocidad en las curvas generalmente no proceden de la seguridad (es decir, no es que el tren descarrile o vuelque en la curva si la negocia a una velocidad más alta), sino que lo que limita la velocidad es confort del viajero, puesto que éste tiene la sensación molesta de “salirse” de la curva aunque exista un cierto peralte en ella (cuyo valor viene limitado por los trenes más lentos y por otro tipo de parámetros); pero el peralte resulta insuficiente para compensar totalmente la fuerza provocada por la aceleración centrífuga.

En la medida en que la caja del tren, al paso por la curva, se incline hacia el interior de ésta, se compensa el efecto molesto percibido por el viajero. Por lo tanto:

- Con mayor inclinación del tren en la curva, para un peralte determinado, se consigue el mismo grado de confort del viajero a mayor velocidad.
- Y para el mismo peralte y confort del viajero, cuando más se inclina la caja, puede negociarse la curva a mayor velocidad. Se trata, por ello, de que el tren se incline en una curva hacia dentro, en proporción al radio de la curva y a la velocidad con la que el tren circula por ella.

Sin embargo este principio teórico debe ser matizado, porque como señala Lopez Pita (1998b), “el planteamiento preliminar realizado habitualmente, en base a determinar el incremento de velocidad posible por aplicación del criterio de confort, y su repercusión en el tiempo de viaje, no tiene en cuenta otros múltiples factores que en la práctica determinarían el impacto real de este tipo de vehículos. A título indicativo pueden mencionarse los dos siguientes:

a) La factibilidad o no de superar la velocidad máxima de la línea. Es decir si por un tramo dado la prestación autorizada es de 140 km/h por cuestiones de seguridad (existencia de pasos a nivel, estado de la catenaria, etc.) el hecho de que un material de caja inclinable pudiera sobrepasar esa velocidad por criterio de confort, no implicaría que realmente en la práctica se le autorizase a una prestación mayor.

b) La concatenación de alineaciones curvas y posibilidad de disponer de aceleración suficiente para adaptarse a las exigencias del trazado”.

Como se expondrá más adelante, en efecto, la realidad muestra que la velocidad autorizada no se incrementa en proporción a la raíz cuadrada de la aceleración aceptada para el tren, y la diferencia es mayor cuanto mayor es la aceleración lateral aceptada para el tren.

En los primeros años 70 se realizaron diversos ensayos de trenes basculantes, pero en general no tuvieron gran éxito ya que los sistemas de basculación asistida resultaban caros de diseño, fabricación, de mantenimiento, y de dudosa utilidad, ya que ciertos desfases en la inclinación de las cajas producían incomodidades para los viajeros. Por todo ello, no tuvieron gran impulso en esa época, cuando sí se desarrolló el Talgo Pendular que ha conseguido resolver el problema de forma muy económica y eficaz. Muchos de estos inconvenientes también se resuelven con el sistema “SIBI” de basculación activa accionada por localización, desarrollado por CAF,

También ha evolucionado el sistema aplicado para la basculación, como señala Ribera (2007b):

- Inicialmente, en el caso de los primeros “pendolinos” italianos de los años 70, entre el bogie y la caja había unos actuadores verticales que disminuían la sección útil de la zona de viajeros con una merma de la capacidad de los coches. Tanto los trenes suecos X 2000, como las nuevas versiones italianas y alemanas consiguieron colocar los actuadores casi horizontalmente dentro del bogie y así evitar este inconveniente de la reducción de espacio.
- También los primeros desarrollos comerciales los actuadores eran hidráulicos por lo que necesitaban una central hidráulica y las correspondientes servoválvulas para una actuación muy rápida. Posteriormente se han generalizado los actuadores eléctricos que tienen un menor tamaño y una velocidad de respuesta más rápida.
- La mejora evolutiva de los trenes basculantes se complementa con el sistema “SIBI” (Sistema Inteligente de Basculación Integral) desarrollado en España por CAF y aplicado con éxito en los trenes diésel de las series 594.200 y 598, que están autorizados a circular con aceleración lateral de $1,8 \text{ m/s}^2$. En este sistema (descrito en detalle en Alonso Mostaza, 2005) la orden de inclinación es por la posición del tren, que conoce la línea (ayudado por GPS), y con ello se evitan los costosos sistemas de detección de la curva que equipan los trenes basculantes no inteligentes.

López Pita (1998b) señala que “por lo que respecta al binomio nuevas líneas-vehículos de caja inclinable, la conclusión es que si bien la inversión necesaria en el primer caso puede llegar a ser el doble de la que requiere el ejemplo de material pendular o basculante, la captación de tráfico referida al mismo sentido de comparación, puede representar más de tres veces la que se obtendría con la utilización de material especializado”.

Ventajas de los trenes de cajas inclinables

Las principales ventajas operativas de los trenes de cajas inclinables son dos: la posibilidad de circular por las curvas a una mayor velocidad y la posibilidad de reducir, en ciertas condiciones, el consumo energético del tren para la misma velocidad media.

Posibilidad de circular por las curvas a una mayor velocidad

La posibilidad de circular por las curvas a una mayor velocidad y, por ello, conseguir una mayor *velocidad media operativa*, supone las ventajas inherentes a la mejora de

este indicador. La mejora de la velocidad media depende del tipo de servicio y más en concreto, del itinerario recorrido.

Ribera (2007a) señala se puede considerar una mejora del orden de un 10%. Aunque subraya que es difícil evaluar la reducción atribuible a la inclinación ya que suele venir asociada a unas prestaciones mayores de los vehículos, y a una mejora de la vía (no del trazado), lo que permite aumentar las velocidades máximas. Entonces es casi imposible separar cuál ha sido la disminución por cada uno de dichos conceptos.

Fiat, que ha impulsado los trenes basculantes en los 90, indica que en ciertas relaciones con este tipo de trenes se consiguen reducciones de tiempo de viaje de cerca del 30%. Cita el caso de Roma a Milán, donde al introducirse los ETR 450 en 1988 se pasó de 4h, 55' a 3h, 50' (-28%). En Alemania la introducción desde 1992 de los trenes diésel pendulares VT 610 redujo el tiempo de viaje de Nürenberg a Hof de 2h, 10' a 1h, 40' (-29%), y en 1998 los servicios pendulares en Finlandia (de Helsinki a Turku) permitirán pasar el mejor tiempo de 2h a 1h, 26' (-28,3%). Se trata de casos extremos que incluyen otras mejoras derivadas del nuevo material (junto a la pendulación), pero sí parece que pueden situar el techo de la reducción de tiempos de viaje en relaciones con especial complejidad del trazado.

López Pita (1998a) señala que el intervalo práctico de reducciones de tiempos de viaje que se deduce de la utilización de vehículos de caja inclinable se sitúa en el entorno del 15%.

La ventaja de la mayor velocidad (o el menor tiempo de viaje) es potencialmente mayor en los trenes basculantes que en los pendulares, pues el ángulo de inclinación de la caja puede ser mayor en los basculantes.

Para comprobar, en la práctica, el alcance de la mejora de velocidad, en (García Álvarez et al, 2008) se ha realizado un análisis sobre el caso español, cuyos resultados se recogen en la tabla.

En ella se comparan, en diversas condiciones, las velocidades que se pueden alcanzar para distintos tipos trenes caracterizados por la posibilidad de inclinarse en las curvas según recoge la reglamentación de circulación de Adif. El tipo "N" es el normal que permite circular con una aceleración sin compensar en el plano de la vía de $0,65 \text{ m/s}^2$ (se aplica en la práctica a trenes antiguos y de mercancías); el tipo "A" admite una aceleración de 1 m/s^2 y corresponde a trenes modernos de cajas no inclinables, pero con una buena suspensión; el tipo "B" admite en las curvas $1,2 \text{ m/s}^2$ y se aplica a trenes pendulares (Talgo); y el tipo "D" permite en las curvas $1,8 \text{ m/s}^2$ y se aplica a tres basculantes (series Renfe 594-598). Como se puede observar, y tomando siempre como referencia el tipo A, los trenes normales tendrían teóricamente una velocidad en curva inferior en un 20%; los trenes pendulares superior en un 10% al A (+19,5% sobre el tipo normal); y los basculantes superior en un 34% (45,6% sobre el normal). Sin embargo, en la realidad, la comparación de las velocidades admitidas en diversas curvas en los cuadros de velocidades máximas son algo inferiores, probablemente por las causas apuntadas en López Pita (1998b). En concreto, las reducciones son de 2, 5 y hasta 19 puntos porcentuales en el caso del tren basculante cuyas posibilidades teóricas del 34% sobre el tipo A quedan reducidas, en las curvas, según se desprende del cuadro, a un 15%.

Figura 16. Efectos en la velocidad media de la posibilidad de inclinación en las curvas

	Ud.	Tipo N Normal	Tipo A Mejorado	Tipo B Pendular	Tipo D Basculante
Cálculos teóricos					
Aceleración lateral admitida por el tipo	m/s^2	0,85	1,00	1,20	1,80
Raíz aceleración (proporción teórica velocidad)		0,92	1,00	1,10	1,34
Promedio de velocidades en la muestra sobre CVM	km/h	106,25	118,44	124,38	136,25
Proporción de velocidades reales en curva CVM		0,90	1,00	1,05	1,15
<i>Diferencia real en curvas CVM sobre posibilidad teórica</i>	<i>p.p.</i>	<i>-0,02</i>		<i>-0,05</i>	<i>-0,19</i>
Velocidades máximas (CVM) medias del recorrido					
Madrid-Avila		0,90	1,00	1,04	1,14
Madrid-Ponferrada		0,91	1,00	1,03	
Madrid-Albacete		0,91	1,00	1,03	
Madrid-Murcia		0,92	1,00	1,04	
Media cuatro recorridos		0,91	1,00	1,03	1,14
<i>Diferencia real en recorrido CVM sobre posibilidad teórica</i>		<i>-0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,06</i>	<i>-0,20</i>

Fuente: García Álvarez et al, 2008

Reducción del consumo de energía

En ciertas condiciones se consigue una reducción del consumo energético compatible con la reducción del tiempo de viaje. Debe analizarse en cada caso concreto el balance entre la energía necesaria para la inclinación de la caja (que es nula en el caso de los trenes inclinables pero positiva en el caso de los basculantes), y la menor energía que se consume al tener un perfil de velocidades más homogéneo. Aquí la ventaja es para los basculantes pues es mayor la velocidad en las curvas y por ello, menor el frenado que debe realizarse desde la velocidad máxima.

Por otra parte, en el caso de los trenes basculantes, la masa del tren es mayor. Alonso Mostaza (2005) subraya cómo el tren diésel serie 594.1 pesa 10 toneladas más que su tren gemelo 594.0 que no bascula. Ello también incide desfavorablemente en lo que se refiere al consumo energético de este tipo de trenes.

Inconvenientes los trenes de cajas inclinables

Como inconvenientes de los trenes de cajas inclinables, además del aumento en la masa, pueden mencionarse los siguientes:

1. Consumo de energía del sistema de basculación para mover la caja de forma forzada. En este campo también hay una diferencia evidente entre los trenes basculantes y los pendulares, ya que en estos la energía necesaria para la pendulación es nula, ya que no hay mecanismos adicionales. Por otro lado, la inversión inicial para la pendulación es muy baja ya que los únicos dispositivos adicionales son los mecanismos de inhibición.
2. Mayor coste de adquisición y de mantenimiento de los trenes basculantes, con respecto a los de cajas no inclinables, si bien este inconveniente no se presenta en los pendulares, pues el incremento de coste no es significativo.
3. El hecho de peraltarse en las curvas, sobre todo en el caso de basculación produce un "aumento" de peso en el viajero. Si se fuerza el ángulo la sensación final en un viaje puede resultar de una sensación de mayor cansancio. Aquí intervienen muchos aspectos subjetivos como por ejemplo el de un horizonte que se "mueve" más que en los trenes convencionales (Ribera 2007b).
4. Otro inconveniente de los sistemas de inclinación de cajas, mucho más destacado en la basculación, es que hay que disminuir la sección de las cajas de los vehículos para que entren dentro del gálibo (a mayor grado de

inclinación esa disminución es mayor) por lo que esta disminución es mayor en los basculantes que en los pendulares.

5. Por último, se puede destacar (Ribera 2007b) que es habitual en autopropulsados de tracción concentrada que las motrices no basculen o pendulen, como el caso X 2000 sueco o del español serie 130. Esto tiene el inconveniente que el maquinista se ve sometido a una mayor aceleración no compensada.

2.7. Tipos de vehículos empleados en el transporte de viajeros por tipo de transporte/distancia

2.7.1 Tranvías

Conceptos generales

Los tranvías son vehículos de tracción eléctrica alimentados entre 600 y 750 V, diseñados para integrarse en el tráfico por superficie de las ciudades, su longitud oscila entre 16 y 30 metros y su ancho entre 2,4 y 2,6 metros.

Se trata de unidades compuestas por pequeños módulos lo que permite una mejor inscripción de los vehículos en las curvas y la adaptación progresiva a la demanda.

Cada vez son más las administraciones públicas que solicitan que estas unidades tengan piso bajo (alrededor de 350 mm sobre el carril en toda o en parte de la longitud del tranvía), para de este modo facilitar el acceso de personas de movilidad reducida. Esta condición obliga a una nueva concepción de los bogies, que permite la circulación de los viajeros entre los largueros y normalmente carecen de ejes. Los bogies son solidarios a los módulos de las cajas.

La velocidad máxima alcanzada por estos vehículos es 70 km/h, aunque en tramos urbanos de plataforma compartida suele estar limitada a 50 km/h.

2.7.2 Metros ligeros

Conceptos generales

En apariencia son similares a los tranvías y de hecho un mismo vehículo se emplea bajo la denominación de “metro ligero” o “tranvía” dependiendo de las administraciones. La principal característica diferenciadora (Melis y Gonzalez, 2008) es que los “metros ligeros” disponen de sistemas de protección del tren (ATP).

Al igual que los tranvías, las unidades son modulares y suelen tener piso bajo (35 cm sobre la cabeza del carril) en su totalidad o al menos en una zona del vehículo.

Figura 17. Unidades del Metro Ligerero de Madrid



Foto: Fernando Puente

2.7.3 Metros convencionales

Conceptos generales

Se trata de trenes de cuatro a seis coches sobre bogies, que circulan por una infraestructura específica. Están pensados para recorridos urbanos y cortos por lo que la mayoría del espacio se destina a viajeros de pie, aunque cuentan con alrededor de 30 plazas sentadas por coche, que en algunos casos se complementan con la presencia de trasportines y apoyos isquiáticos, así como zonas especialmente diseñadas para personas con movilidad reducida.

Son siempre unidades eléctricas, puesto que sería imposible una explotación en tracción diesel, ya que la mayor parte de las redes son subterráneas.

Las velocidades máximas suele ser de 70 km/h aunque algunas unidades modernas alcanzan 110 km/h. Para ofrecer velocidades comerciales aceptables y dada la proximidad entre las estaciones, estos vehículos han de ser capaces de alcanzar aceleraciones y deceleraciones de 1-1,2 m/s², lo que obliga a contar con potentes motorizaciones específicas.

La rodadura generalmente es sobre ruedas clásicas ferroviarias, aunque en algunas explotaciones para reducir el ruido y aumentar la adherencia se emplean neumáticos de caucho aunque el guiado se realiza con ruedas clásicas.

Es común que este material esté equipado con sistemas de conducción automática que permiten desde optimizar las marchas manteniendo el personal de conducción hasta prescindir de dicho personal y controlar la explotación desde el puesto de control.

Figura 18. Unidades s8000 de Metro de Madrid

Foto: M^a del Pilar Martín

2.7.4 Trenes de cercanías eléctricos

Conceptos generales

Estos trenes están pensados para el transporte masivo entre núcleos relativamente próximos, por ello disponen de una distribución interior que ofrece alrededor de 700 plazas entre sentadas y de pie, calculándose estas últimas para una densidad de hasta 6 viajeros/m².

La velocidad máxima alcanzada por estas unidades es de 100 a 140 km/h. Dadas las múltiples y próximas paradas comerciales que han de realizar deben alcanzar aceleraciones y deceleraciones en torno a 1 m/s². La accesibilidad es otro de los aspectos fundamentales; para lograrla disponen de varias puertas dobles por costado y la tendencia actual es contar con zonas de piso bajo para facilitar el acceso de personas en sillas de ruedas.

Para adaptarse a la demanda de cada línea y cada red en los últimos años se conciben como plataformas modulares de un número variable de coches, siendo un ejemplo el tren de Cercanías Renfe Civia.

Figura 19. Tren Civia de Renfe Cercanías



Foto: Renfe

Existen algunas unidades de cercanías de dos pisos que se emplean en líneas con una fuerte demanda y que cuentan con unas 2000 plazas (sentadas + de pie).

2.7.5 Trenes de media distancia

Conceptos generales

Utilizados generalmente para viajes entre localidades de una misma comunidad autónoma. Hasta hace poco se empleaba de material de larga distancia que se transformaba y reutilizaba. Actualmente se trata de unidades concebidas especialmente concebidas para estos servicios.

Son unidades autopropulsadas de entre 1 y 4 coches que ofrecen una media de 60 a 70 plazas por coche, todas ellas de clase turista. Pueden ser eléctricas o diésel, dependiendo de las líneas a las que vayan destinadas, con una potencia alrededor de los 1.150 kW. La velocidad máxima alcanzada está entre 120 y 160 km/h.

Como servicios complementarios al viajero cuentan con máquinas expendedoras de comida y bebida en lugar de cafetería; y las unidades más modernas, con equipos de entretenimiento a bordo y zonas especialmente habilitadas para personas de movilidad reducida y transporte de bicicletas.

Para facilitar la entrada y salida de los viajeros suelen disponer de varias puertas por costado, simples o dobles.

Figura 20. Unidades de media distancia s/598 (diésel) y s/470 (eléctrico)



Fotos: Renfe

2.7.6 Trenes de larga distancia

Conceptos generales

Pueden ser ramas autopropulsadas o un número variable de coches de viajeros remolcados por una locomotora diésel o eléctrica. La velocidad máxima alcanzada está entre 140 y 220 km/h.

Figura 21. Tren autopropulsado de larga distancia, s/490 (Alaris)



Foto: Patier

En general, los coches de viajeros pueden clasificarse en coches clásicos con bogies y una longitud en torno a los 25,5 metros y los coches Talgo de ejes independientes y compartidos entre coches contiguos y menor longitud (13 metros). Todo el espacio destinado a los viajeros se utiliza para plazas sentadas, que suelen ser en clase turista unas 80 en los coches clásicos y 36 en coches Talgo.

Figura 22. Coches convencionales (s/9000) y coches Talgo (s6)



Foto: TranviaPortal y Juan José Romero Rioja

Concebidos para viajes largos, ofrecen altos niveles de confort a los viajeros y servicios como cafetería y entretenimiento a bordo.

La alimentación de los servicios auxiliares puede hacerse a partir de un generador alimentado por un motor diésel o en el caso de tracción eléctrica desde la catenaria a través de equipos en las propias locomotoras.

Algunos vehículos cuentan con sistemas de cambio de ancho, lo que les permite circular por redes de países con distintos anchos de vía o como en el caso de España por vías de ancho ibérico (1.668 mm) e internacional (líneas de alta velocidad 1.434 mm)

2.7.7 Trenes de alta velocidad

Conceptos generales

Los trenes de alta velocidad tienen características comunes a los de larga distancia convencionales. Sin embargo, cabe reseñar algunas peculiaridades que los diferencian de éstos. Se trata de conjuntos autopropulsados traccionados por cabezas motrices (tracción concentrada) o en los que la tracción se distribuye a lo largo de todo el tren (tracción distribuida).

Emplean siempre tracción eléctrica y corriente alterna en alta tensión (25 kV 50 Hz). Presentan una potencia elevada, en torno a los 8.000 kW para trenes de 200 metros de longitud.

Figura 23. Trenes de alta velocidad



Foto: Patier

Notas: tren de alta velocidad s102 (tracción concentrada) entre dos trenes s103 (tracción distribuida)

Tienen un reducido peso por eje, siendo el máximo autorizado de 17 toneladas por eje. Su masa total en vacío está entre 250 y 450 toneladas, aunque se tiende a reducir, especialmente las masas no suspendidas, para hacerlos menos agresivos a la vía. La rodadura puede ser de bogies compartidos (trenes articulados) o no compartidos y de rodales como en el caso del serie Renfe 102.

Inicialmente fueron pensados para servicios diurnos y por tanto de plazas sentadas, sin embargo en los próximos años China incorporará a su flota trenes de alta velocidad equipados con literas para realizar servicios nocturnos.

Presentan una baja densidad de plazas (alrededor de 60 plazas por coche de clase turista) para poder competir con el avión y al mismo tiempo ser más cómodos. Las plazas se distribuyen en diferentes clases, (en España Turista, Preferente y Club), que ofrecen diferentes servicios complementarios a los viajeros.

Existen en la actualidad dos gálibos de anchuras diferentes: el europeo de 2,9 m y el empleado en Japón, China y Rusia más ancho, de 3,4 metros. En líneas con una fuerte demanda de viajeros se emplean trenes de dos pisos, como es el caso de algunos Shinkansen japoneses y del TGV Duplex francés.

En su concepción se cuidan especialmente los aspectos aerodinámicos, de gran relevancia en el consumo a altas velocidades. Para reducir las variaciones de presión sufridas por los viajeros especialmente en los túneles, disponen entre otras medidas de juntas hinchables en las puertas y cierre automático de las trampillas de aire acondicionado.

2.7.8 Trenhotel

Conceptos generales

Los llamados trenhotel son trenes pensados para servicios nocturnos que se utilizan en distancias, típicamente aquellas que precisan más de 8 horas para ser recorridas, es decir, distancias por encima de los 700 kilómetros.

Figura 24. Interior de un compartimento de trenhotel



Foto: Renfe

2.7.9 Resumen de las características de los trenes de viajeros

Como síntesis de lo expuesto, en la tabla se han resumido las características más relevantes de los diversos tipos de trenes que se emplean en cada uno de los servicios tipo.

Ya que las características varían notablemente en función de la capacidad, todas ellas se expresan en función del número de plazas estándar que tiene (P_e)

Se adopta como vehículo de referencia el de una capacidad típica, más próxima los empleados actualmente y como alternativos, para medir la sensibilidad a la capacidad trenes con capacidades de -40% a -20%, +20% a +40%.

En el caso de que haya configuraciones alternativas (por ejemplo en larga distancia trenes convencionales o autopropulsados o en alta velocidad tracción concentrada o distribuida) se analizan ambos.

2.7.10 Mercancías

Los trenes de mercancías están normalmente compuestos por una o varias locomotoras en cabeza que arrastran un número variable de vagones, algunos de ellos cargados y otros vacíos. Las locomotoras pueden ser eléctricas o diésel y los vagones son normalmente especializados por el tipo de mercancías a transportar.

Circulan a velocidades máximas comprendidas entre 90 y 120 km/h obteniendo velocidades medias entre 50 y 60 km/h.

Una peculiaridad relevante de estos trenes es que cerca del 50% de los vagones se mueven vacíos, dado que se trata de vagones especializados en carga de tráficos asimétricos.

La carga máxima de un tren (número de vagones) está limitada por la potencia de la locomotora, la adherencia, la fuerza de los enganches y la longitud del tren.

3. OPERACIÓN DE LOS SERVICIOS DE TRANSPORTE

3.1. Tipos de servicios para transporte de viajeros

Los servicios tipo que dan respuesta a las diferentes necesidades de movilidad de los viajeros en el caso del ferrocarril pueden clasificarse, de acuerdo con el criterio establecido en Monografía EnerTrans 7 “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”³ en:

- Urbano 1: servicios tranviarios.
- Urbano 2: servicios de metro convencional
- Metropolitano 1: servicios de metro ligero
- Metropolitano 2: servicios de cercanías cortos
- Metropolitano 3: servicios de cercanías largos
- Interurbano 1: servicios de media distancia
- Interurbano 2, 3, 4 y 5: servicios de larga distancia
- A continuación se detallan las características de cada uno de dichos tipos de servicios.

3.1.1 Urbano 1: servicios tranviarios

Se asocian a desplazamientos de menos de 4 km, aunque en algunos casos pueden llegar a ser de 8 km.

La respuesta típica del ferrocarril a este tipo de demanda se puede concretar en los tranvías, ferrocarriles urbanos eléctricos, que circulan por superficie, por plataforma reservada (0-40%) o compartiendo viario con el resto de vehículos, por lo que se emplean carriles de garganta. La conducción del vehículo es manual, circulando en “marcha a la vista”. Pueden contar con prioridad semafórica, lo que redundará en una reducción del tiempo de viaje, mejora de la regularidad y frecuencia.

La velocidad máxima en servicio comercial suele estar en torno a 75 km/h en áreas urbanas y a 30 km/h en áreas peatonales, las velocidades medias se sitúan entre 12 y 20 km/h.

Se electrifican en corriente continua a 600 V y, modernamente, a 750 V. La toma de energía se realiza generalmente de catenaria, aunque existen algunas experiencias de sistemas de alimentación por suelo y acumulación embarcada. El ancho de vía empleado depende de las explotaciones, generalmente se trata de ancho

³ Monografía Enertrans 7: “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

internacional (1.435 mm) aunque en otros casos es vía métrica (1.000 mm), en Madrid es de 1.445 mm.

La distancia entre paradas comerciales es de 250-1.000 metros, siendo la longitud de los andenes de las paradas de 40 a 60 metros.

3.1.2 Urbano 2: servicios de metro convencional

Se asocian a desplazamientos de entre 4 y 8 km.

Se trata de ferrocarriles eléctricos urbanos, totalmente segregados del resto de modos de transporte y que suelen circular bajo superficie, lo que les permite alcanzar velocidades máximas de hasta 110 km/h y medias entre 25 y 40 km/h. Disponen de sistemas de protección del tren (ATP) y en algunas explotaciones conducción automática (ATO)

Están electrificados en corriente continua, siendo las tensiones de alimentación más frecuentes de 600, 750, 900, 1.200, 1.500 y 3.000 V. La toma de corriente se realiza por catenaria o tercer carril. Algunos de los anchos de vía utilizados son 1.674 mm (L1 de Metro de Barcelona), 1.445 mm (Metro de Madrid), internacional (1.435 mm), o métrico (1.000 mm). Los trazados se caracterizan por radios de curva pequeños y pendientes fuertes (de hasta 40 mm/m). Generalmente se ha empleado vía sobre balasto aunque en los últimos años algunas explotaciones están apostando por la vía en placa.

La distancia media entre estaciones varía entre 500 y 2.000 metros, con longitudes de andenes por lo general entre 60 y 160 metros. Los radios mínimos de curva son de 250 metros y en las estaciones de 400 metros para reducir la distancia entre los coches y el andén.

Se prestan con vehículos de tipo metro pesado, con composiciones de 2 a 10 coches, con longitudes entre 32 y 150 metros y ancho entre 2,3 y 2,8 metros. El número de plazas sentadas suele rondar las 30, siendo la capacidad total por coche muy variable dependiendo del gálibo del tren. Una de las principales características de estos trenes son las elevadas aceleraciones máximas que deben alcanzar (1 m/s^2), las velocidades máximas se encuentran en el rango 70-110 km/h.

3.1.3 Metropolitano 1: servicios de metro ligero

Estos servicios discurren tanto por superficie como por túnel o viaducto, con un porcentaje de plataforma reservada entre el 40 y 90%, se emplea carril tipo Phoenix. Pueden alcanzar velocidades máximas de 90 km/h. Se prestan con vehículos de tipo tranvía - metro ligero, equipados con sistemas de protección automática del tren.

El recorrido medio del viajero se encuentra entre 10 y 20 km, en línea recta entre 8 y 15 km.

3.1.4 Metropolitano 2: servicios de cercanías cortos

Estos servicios permiten la movilidad entre núcleos poblacionales que disten en línea recta como máximo entre 15 y 30 km. El recorrido medio del viajero es inferior a 40 km y mayor de 20 km. Estos servicios se prestan con trenes de cercanías que llegan a alcanzar 120 km/h con medias del orden de 50-60 km/h.

3.1.5 Metropolitano 3: servicios de cercanías largos

Permiten la movilidad entre núcleos poblacionales que se encuentre como máximo a 30-45 km en línea recta. En ellos el recorrido medio del viajero se sitúa entre 40 y 60 km. La velocidad media de estos servicios es de 60-70 km/h.

Al igual que los servicios de cercanías cortos, se prestan con trenes de cercanías.

3.1.6 Interurbano 1: servicios de media distancia

La distancia en línea recta para estos servicios se encuentra entre 45 y 190 km. Sus viajeros recorren menos de 300 km. Se distinguen dos tipos:

Media distancia convencional, con velocidad media menor de 150 km/h. Estos servicios se prestan con material de media distancia convencional.

En España, los servicios de media distancia convencional tienen una velocidad media de 75 km/h, un recorrido medio del viajero de 99,5 km y un tiempo medio de viaje de 1 hora y 20 minutos.

Media distancia de alta velocidad, con velocidad media mayor de 150 km/h. Estos servicios se prestan con trenes de alta velocidad media distancia que alcanza velocidades máximas de 250 km/h.

Para los servicios de Media Distancia en Alta Velocidad de Renfe en el año 2006 (Madrid-Puertollano, Madrid-Toledo y Córdoba-Sevilla), el recorrido medio fue de 128 km, la velocidad media de 166 km/h y el tiempo medio de viaje de 46 minutos.

3.1.7 Interurbano 2, 3, 4 y 5: servicios de larga distancia

Los servicios de larga distancia se asocian a trayectorias de más de 190 km, siendo el recorrido medio del viajero de más de 300 km. Se distinguen dos tipos

Larga distancia convencional, la velocidad media es inferior a 150 km/h. Se prestan con material de larga distancia.

Según datos de Renfe de 2005, los servicios de larga distancia convencional tuvieron una velocidad media de 91 km/h y el recorrido medio del viajero fue de 502 km, lo que significa que el tiempo medio de viaje fue de 5:32.

Larga distancia de alta velocidad, se definen como aquellos que tienen una velocidad media de más de 150 km/h y un recorrido medio del viajero de más de 300 km. Estos servicios se prestan con trenes de alta velocidad capaces de alcanzar hasta 350 km/h en servicio comercial. En ellos en 2008 el recorrido medio del viajero es de 426,5 km

Como referencia, en las rutas que operaba Renfe en 2006 en este segmento (Madrid a Lleida, Madrid a Huesca y Madrid a Sevilla) la velocidad media era del orden de 198 km/h, el recorrido medio de los viajeros en estos trenes de 385 km, y el tiempo de viaje medio de 1:56; aunque con tendencia a crecer, tanto en velocidad como en distancia, al entrar en servicios las nuevas líneas de alta velocidad hasta Barcelona y Málaga, por lo que cabe esperar en los próximos años velocidades medias en el entorno de los 210 km/h, recorridos medios del orden de 465 km y tiempos medios de recorrido de 2:12.

Aquellos servicios que superan los 700 km en línea recta se prestan con trenes nocturnos equipados con coches cama.

3.2. Explotación y ciclos operativos

En el caso del ferrocarril y con las peculiaridades propias de cada tipo de servicio, pueden distinguirse dos grandes fases en los ciclos operativos según puedan asociarse directamente al servicio comercial o no

En el servicio comercial puede distinguirse la fase de movimiento en el recorrido comercial y varias fases con el tren parado que incluyen el tiempo previo al viaje en el que el tren está a disposición de los viajeros en la estación y el tiempo de detención por paradas técnicas o comerciales.

Bajo la denominación de movimientos no comerciales se engloban todos aquellos desplazamientos del material móvil que no se pueden asociar directamente a un servicio concreto como las maniobras en estaciones y los desplazamientos a talleres. Pueden englobarse también en este concepto los tiempos de rotación, limpieza, mantenimiento e hibernación.

4. SISTEMAS DE PROPULSIÓN EN EL FERROCARRIL

4.1. Clasificación general de los sistemas de tracción

Los tipos de tracción que se emplean de forma intensiva en la actualidad en el ferrocarril son la tracción eléctrica y la tracción diésel, pero existen o han existido otros sistemas con poco uso en la actualidad (la tracción vapor y tracción por turbina de gas).

4.1.1 Tracción vapor

Para que naciese el ferrocarril fue requisito previo el invento de una máquina que crease su propio movimiento, a partir de la recepción de energía del exterior. La primera máquina o locomotora conocida (y con la que comenzó la andadura del ferrocarril) es la de vapor.

En esencia, la máquina de vapor es un vehículo con un depósito (caldera) lleno de agua que se calienta al quemar un combustible (al principio era carbón o madera, pero posteriormente se evolucionó también hacia el *fuelóleo*). Al calentarse el agua, se produce vapor de agua, y al expandirse éste, se mueven unos pistones situados en cilindros y se traslada el movimiento a las ruedas a través de un sistema de bielas-manivelas. Este principio básico constituyó la única máquina conocida hasta bien entrado el siglo XIX, y evolucionó fuertemente para conseguir mayores potencias y velocidades.

Ventajas e inconvenientes

Uno de los principales obstáculos al desarrollo de la locomotora de vapor hay que buscarlo en el inconveniente que supone la gran cantidad de carbón que quema una locomotora y la subsiguiente necesidad de aprovisionar permanentemente la máquina de combustible. También, al evaporarse el agua de la caldera, las locomotoras de vapor necesitan frecuentes aprovisionamientos de agua; por lo tanto era habitual ver unas *grúas hidráulicas* (con sus depósitos de agua) junto a la vía en lugares estratégicamente situados en los cuales las locomotoras reponían el agua que habían consumido. En algunos países (como Inglaterra o Francia) se instalaban canales de agua entre los dos carriles de la vía, y al pasar por ellos la locomotora (con una pala especial) recogía agua en marcha, evitando la parada para el aprovisionamiento.

Las locomotoras de vapor fueron evolucionando al incrementar el tamaño de la caldera, el número de ruedas y su tamaño, y posteriormente se introdujeron mejoras tales como aumentar el número de cilindros (unos trabajando en alta y otros en baja presión) o dividir la locomotora en dos partes articuladas entre sí.

La locomotora de vapor dejó de ser hegemónica ya bien entrado el siglo XX y los últimos ejemplares que se fabricaron lo fueron poco después de la mitad de ese siglo. En España, las postreras locomotoras de vapor se construyeron en 1960, y la tracción vapor desapareció en servicio regular en la red de ancho normal en 1975.

En los últimos años, uno de los problemas básicos, que era el suministro de carbón, se había solucionado con la utilización del *fuelóleo* como combustible. La *fuelización*

en España se realizó desde los años 50 y afectó a la mayor parte de las grandes locomotoras de vapor.

Además de las limitaciones de suministro ya descritas, la locomotora de vapor presentaba el problema de la enorme dificultad para aumentar la potencia por encima de unos ciertos valores, y sobre todo un bajísimo rendimiento energético. En efecto, el motor de vapor necesita grandes cantidades de combustible para producir el movimiento; motivo por el cual fue desechado y sustituido por máquinas con mayor productividad.

Por otra parte, para la conducción y aprovisionamiento de la máquina de vapor se necesitaba gran cantidad de personal sometido a condiciones de trabajo inhumanas: normalmente la dotación de una locomotora la componían el maquinista y el fogonero, este último se dedicaba a alimentar el fuego paleando carbón.

La tracción vapor desapareció del servicio regular de transporte en los primeros años del siglo XX, siendo en Cuba y China los últimos países en los que se empleó. Existen en el mundo, sin embargo, numerosos ferrocarriles turísticos que utilizan este tipo de máquinas, y también parques de ocio en los que circulan nuevas locomotoras de vapor alimentadas por gasóleo.

Oportunidades de futuro

Es preciso anotar algunas posibilidades de la tracción vapor que sugieren que su utilización futura pueda ser considerada en ciertos casos.

En primer lugar, la máquina de vapor puede emplear una gama muy amplia de combustibles, incluyendo los de la biomasa, por lo que en ciertos entornos puede sustituir con ventaja al motor diésel.

En segundo lugar, y algunos desarrollos realizados en Argentina y Suiza recientemente han elevado de forma importante su rendimiento. Sobre la experiencia Suiza, concretada en la mejora y modernización de una antigua locomotora, señala Ángel Maestro (2003): *“Las pruebas efectuadas en diversos tramos de la red suiza, entre Winterthur y Frauenfeld y remolcando el Orient Express han resultado apabullantes en relación con la locomotora original. Se ha conseguido aumentar su potencia en un 30%, pasando de 2.200 CV a 3.000 CV, obteniendo una disminución del consumo de combustible de un 40 %, aumentando la velocidad de 80 km/h a 100 km/h. (...) Los rendimientos son también sensacionales, lejanos de ese 5% esgrimido por los detractores de la máquina de vapor, demostrando sus enormes posibilidades sin explotar, que no es “un extravagante consumidor de carbón”, como diría un cierto personaje a principios de los años 50. Se ha pasado del rendimiento del 13% logrado por Porta en anteriores realizaciones, al 15 % de Wardale -en servicio normal un 13%-, ahora al 16’5-17 %. En la relación peso/potencia Porta diseñó hace años máquinas avanzadas, pero no correspondientes a la ultimísima tecnología, disponiendo de una relación 44 CV/t”.*

También en Cuba, en el año 2003, se terminó la reconstrucción de una locomotora de vapor con nuevas técnicas, de alto rendimiento, baja contaminación y, lo que es más importante, que permite la independencia del petróleo. En esta línea, cabe prever que en entornos locales (lo que limita los inconvenientes del aprovisionamiento de agua) y en ciertas condiciones, pequeñas máquinas de vapor pueden realizar un servicio energéticamente eficiente.

4.1.2 La tracción eléctrica

Las locomotoras eléctricas se desarrollan desde finales del siglo XIX por un doble impulso. Por una parte, por la necesidad de resolver en los ferrocarriles subterráneos (fundamentalmente urbanos) el problema de la contaminación que producían las

máquinas de vapor; por otro lado, por la conveniencia de aumentar la potencia en las líneas con fuertes rampas y pendientes, en las cuales las máquinas de vapor tenían un rendimiento muy bajo (lo que obligaba a emplear dos o tres máquinas) y poca velocidad.

La tracción eléctrica ofrece enormes ventajas en cuanto a limpieza, potencia, rendimiento, etc., frente al vapor, pero presenta el inconveniente de la necesidad del suministro continuo de energía. Este inconveniente ha impedido el desarrollo a gran escala de vehículos de carretera de tracción eléctrica porque requieren acumuladores de energía muy pesados. Sin embargo, al circular el ferrocarril sobre una vía con un único grado de libertad, se aprovecha la posibilidad de suministrar la energía eléctrica al tren en el momento que la va necesitando, con un conductor paralelo a la misma vía (cables aéreos o tercer carril).

En ocasiones se ha empleado un tercer carril para suministro de energía al tren, pero ha sido frecuentemente desechado por dificultades técnicas y sobre todo por motivos de seguridad, ya que cualquier viandante puede resultar electrocutado al tocar simultáneamente uno de los dos carriles sobre los que circula el tren y el que le alimenta de energía eléctrica.

Más utilizada es la alimentación al tren con conductores aéreos situados sobre la vía. Estos conductores empezaron siendo cables muy sencillos, pero posteriormente se fue mejorando la instalación para mantener perfectamente la horizontalidad, surgiendo así la *catenaria* o conjunto de cables que aseguran el suministro de energía a los trenes. A su vez, las máquinas eléctricas tienen en su parte superior un *pantógrafo* de altura variable que se va adaptando a la posición de la catenaria para la captación de corriente.

Desde el primer momento, se comprobaron las ventajas de la tracción eléctrica frente a la tracción vapor. Sin embargo, al requerirse unos mayores gastos iniciales de instalación (catenaria, subestaciones que reciben la energía de la red, adquisición de material motor más sofisticado) solamente es económicamente interesante la electrificación a partir de un cierto nivel de tráfico.

Como ya se ha señalado, primero se electrificaron las líneas urbanas y las que tienen mayores pendientes, pero posteriormente (a partir de mediados del siglo XX) se lanzó una campaña de electrificación más extensiva para dar continuidad a las existentes, y así lograr una tracción homogénea de los trenes a lo largo de su recorrido.

Modernamente, la tracción eléctrica (que ha entrado en competencia con la tracción diésel) se ha revelado como la única capaz de desarrollar muy altas velocidades, por lo cual, a las ventajas tradicionales se ha añadido su exclusividad en el campo de la alta velocidad. En efecto, para explotación regular por encima de 220-240 km/h está prácticamente desechada la tracción diésel o la tracción a base de turbinas de gas (que fue experimentada a mediados de siglo en Francia). La alta velocidad se ha transformado en un patrimonio exclusivo de la tracción eléctrica. Los equipos han evolucionado muy notablemente desde las primeras locomotoras eléctricas. En efecto, han pasado de tener sistemas de control basados en mecanismos complejos y en resistencias, a sistemas electrónicos; y el motor ha pasado de ser de corriente continua (el más empleado en los primeros años de la electrificación) a ser de corriente alterna trifásico (síncrono y, más frecuentemente, asíncrono).

El suministro de energía al tren puede ser en corriente continua (tensiones de 600V, 1.500 V y hasta 3 kV) o en corriente alterna (el sistema normal, empleado en las más modernas electrificaciones y en todas las de alta velocidad es 25 kV a 50 Hz, aunque en Japón hay líneas 25 kV 60 Hz, y en Alemania y en otros países de su entorno a 15 kV, 16 2/3 Hz).

El rendimiento energético de la tracción eléctrica es muy alto en la máquina, del orden del 80-90%, el mayor de entre todos los tipos de tracción. Sin embargo, el análisis del rendimiento global debe tener en cuenta el rendimiento con el que se

produce y transporta la energía eléctrica que consume el sistema ferroviario (este rendimiento y los factores de emisión pueden variar en el tiempo y entre países). Este análisis global, puede llegar a bajar el rendimiento de la tracción eléctrica cerca de los valores de la tracción diésel, por lo que puede afirmarse que la ventaja de la tracción eléctrica frente a la diésel no proviene de un mejor rendimiento energético, aunque si produce normalmente menos emisiones de CO₂, menos energía no renovable, y deslocalización de las emisiones de contaminantes de efecto local.

Utilización de la tracción

Los trenes de tracción eléctrica no pueden circular por líneas no electrificadas, pero los vehículos diésel sí que pueden hacerlo por líneas electrificadas, por lo que es preciso adoptar decisiones en el ámbito de la explotación sobre si interesa o no, y cuándo, que circulen vehículos diésel por líneas electrificadas (bajo catenaria).

Las razones que, en un momento determinado, pueden favorecer el empleo de la tracción diésel en líneas electrificadas se refieren a trenes que circulan en la mayor parte de su recorrido por líneas no electrificadas y que recorren un tramo corto electrificado. En este caso, puede no ser interesante cambiar la locomotora, pues el menor coste de tracción no se compensaría con el tiempo perdido y la duplicidad recursos necesarios. También si al final del recorrido el tren debe entrar a un apartadero o punto de descarga no electrificado puede interesar que sea la propia máquina titular del tren la que haga la maniobra.

Este problema se soluciona modernamente con vehículos (locomotoras o trenes) “híbridos”, que son a la vez eléctricos y diésel-eléctricos.

4.1.3 Tracción diésel

La aparición de los motores de combustión interna (de gasolina y gasóleo) que se aplicaron a la automoción desde los últimos años del siglo XIX, apuntaron la posibilidad de sustituir con ventaja las máquinas de vapor. Sin embargo, hasta entrado el siglo XX, el desarrollo de vehículos ferroviarios con este nuevo tipo de tracción fue muy limitado.

Primero se empleó el motor de gasolina y posteriormente el de gasóleo (diésel) para aumentar las potencias; pero en todo caso, hasta la construcción de grandes motores diésel, la aplicación ferroviaria se limitó a automotores (vehículos semejantes a los autobuses con ruedas ferroviarias que circulaban por la vía). Estos automotores, con cajas de cambio análogas a las de los autobuses, tenían al principio pequeños motores de gasolina; posteriormente fueron adoptando motores diésel, pero no consiguieron acoplarse éstos en las locomotoras por falta de potencia, y sobre todo por falta de un desarrollo adecuado de las transmisiones, ya que la tradicional caja de cambios mecánica no permite trabajar con altas potencias.

Entrado ya el siglo XX se fueron construyendo motores cada vez más potentes que han permitido el desarrollo de locomotoras diésel, singularmente en Estados Unidos y Gran Bretaña donde la electrificación ha tenido poca penetración y se ha preferido siempre la versatilidad del diésel.

Frente a la tracción vapor, la diésel tiene la ventaja de una conducción más limpia y fácil, de un aprovisionamiento más sencillo, y de un suministro de combustible más ágil. Por otra parte, también permite potencias mayores sin aumentar el peso de la locomotora. Frente a la tracción eléctrica tiene la ventaja de que no precisa las inversiones iniciales ni el gasto de conservación de la catenaria; pero presenta el inconveniente del menor rendimiento energético de la máquina, mayores emisiones; emisión de productos contaminantes en el lugar de circulación de la máquina; y mayor costo de combustible, aunque estas diferencias oscilan en función de la estructura de generación energética de cada país.

Lo cierto es que la tracción diésel ha sustentado el desarrollo del ferrocarril de mercancías en Estados Unidos, mientras que en la Europa continental se ha destinado fundamentalmente a servicios de maniobras y de mercancías en las líneas no principales y desde los años 60 ha “barrido” las máquinas de vapor, de manera que en todos los países europeos la tracción vapor ha sido sustituida por la diésel.

Modernamente, los motores diésel mueven generadores que alimentan motores de tracción eléctricos (en las llamadas máquinas *diésel-eléctricas*) con lo cual se ha conseguido el mayor apogeo de la tracción diésel, al combinar las ventajas del suministro del motor diésel con las de la transmisión eléctrica. Además, la tracción diésel presenta una alta flexibilidad para la explotación, ya que puede circular por todo tipo de líneas, con independencia de que estén electrificadas o no, su combustible tiene una excelente red de distribución y las locomotoras tienen una gran autonomía.

Por el contra, las máquinas diésel no son aptas para muy altas potencias (lo que desaconseja su uso con frecuentes aceleraciones o en alta velocidad), el rendimiento energético en el vehículo es bajo (del orden del 30 al 35 %), dependen casi totalmente del petróleo y tienen un nivel alto de emisiones y de contaminación locales, lo que hace imposible su utilización intensiva en líneas subterráneas.

La tracción diésel está evolucionando mucho, especialmente en Norteamérica con el desarrollo de nuevos motores de mayor rendimiento y bajas emisiones, y este tipo de tracción se beneficiará del desarrollo de las tecnologías de la automoción y del uso de nuevos combustibles.

Por otra parte, se están realizando experimentos de uso de biocombustibles para la alimentación del motor.

4.1.4 La tracción por turbina de gas

En el ferrocarril se han empleado de forma muy marginal trenes movidos por turbina de gas. Se trata generalmente de motores de aviación y que han tenido su aplicación en trenes norteamericanos, franceses, canadienses y egipcios.

General Electric fabricó dos series de locomotoras de turbina de gas: una de 4.500 CV en 1949 y otra de 8.500 CV en 1958 (luego aumentadas a 10.000 CV). Estas locomotoras que empleaban un combustible semejante al fuelóleo funcionaron entre 1950 y 1969. Un tren de pasajeros propulsado por turbina de gas, el *United Aircrat Turbotrain*, funcionó en Canadá en los años 70 y se hicieron pruebas en los Estados Unidos de un tren semejante que no llegó a funcionar comercialmente.

Las primeras experiencias de trenes propulsados con turbinas de gas en Europa datan de 1967 con el automotor francés TGS. Diez trenes (y cuatro adicionales después) tipo ETG (*Élémets à turbine à gaz*) funcionaron entre 1970 y 1999 en el servicio París-Caen. Posteriormente 41 trenes RTG (*Rame à turbine à gaz*) comenzaron a prestar servicio desde 1973 y funcionaron hasta diciembre de 2004. Todos ellos son alimentados con gasóleo. Los primeros eran de transmisión hidráulica, mientras que el prototipo de tren de alta velocidad TGV 001, que circuló a 300 km/h entre 1972 y 1976, era de transmisión eléctrica. Este tipo de trenes no se ha desarrollado por tener un consumo muy alto, ser muy ruidosos y presentar altos costes de mantenimiento.

Figura 25. Esquema de la turbina de gas del Jetrain 2000

An Ingenious Convergence of Air and Rail

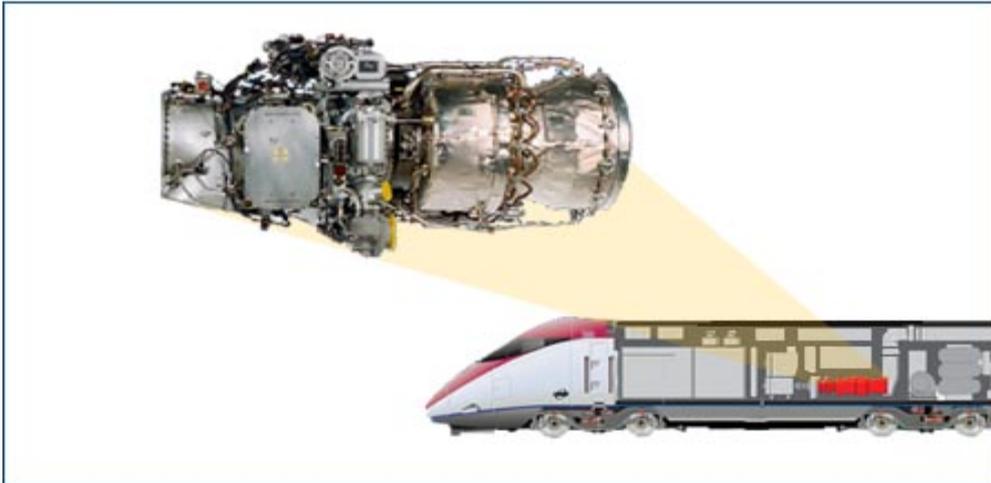


Foto: www.bombardier.com

Ya en el siglo XXI, como respuesta a los deseos manifestados en el programa “Next generation High Speed Rail” de la administración federal del ferrocarril en Estados Unidos, Bombardier desarrolló un tren con dos locomotoras que funcionan con una turbina de gas y transmisión eléctrica. Las locomotoras, de cuatro ejes, pesan 90,7 t, tienen una potencia de 3.750 kW y equipan un motor de aviación Pratt&Whitney PW 150 que permite al tren alcanzar los 240 km/h de forma sostenida (con puntas de 265 km/h en una composición de dos locomotoras y siete coches). Sus promotores aseguran que esta máquina es un 20% más ligera que una diésel tradicional, tiene una capacidad de aceleración dos veces superior y tiene un 30% menos de emisiones y un nivel de ruido equivalente al de un tren eléctrico.

También se estudia introducir trenes de este tipo en Gran Bretaña, con turbinas tipo *Makila* T1 que, con un peso de 500 kg, tienen igual potencia 1,2 MW que un diésel de 3.570 kg y según dicen, 6,7 veces menos de emisiones de NO₂ y CO₂ que el diésel.

En España Patentes Talgo estudia desde 2008 una locomotora híbrida y un tren de alta velocidad en el que una turbina de gas alimenta a un alternador para mover los motores eléctricos de uno de los elementos motores, siendo el otro enteramente eléctrico.

No existen experiencias ni datos fiables sobre los consumos o nivel de emisiones de esta nueva generación de turbinas de gas, aunque sus promotores destacan que unos y otros se han reducido notablemente respecto a los de la generación anterior. Estimaciones realizadas por *Bombardier* sobre el corredor Montreal-Toronto, señalan que la implantación en el mismo del *JetTrain* supondría, respecto a los modos de transporte actualmente empleados, una desviación de tráfico que permitirá reducir el 26% el consumo energético y un 16% las emisiones de CO₂, aunque no facilitan datos comparativos con la tracción diésel o la electrificación.

4.2. La cadena de tracción eléctrica

La cadena energética de la tracción eléctrica tiene una parte exterior al vehículo que se compone de la generación, transporte y transformación de energía eléctrica hasta la entrada al tren. En el tren pueden distinguirse tres fases: transformación de la energía antes de su uso en el motor; motor y transformación mecánica de potencia.

4.2.1 Motores empleados, tamaño y potencia

En tracción eléctrica se empleaban motores de corriente continua, y posteriormente de corriente alterna trifásicos síncronos, y se tiende a los asíncronos. La potencia de los motores oscila entre los 1.000 kW y los 3.000 kW y una locomotora suele llevar entre cuatro y seis motores.

4.2.2 Rendimientos en el vehículo en tracción eléctrica y variables de las que depende

Figura 26. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica



Fuente: Elaboración propia

4.3. La cadena de tracción diésel

Los vehículos de tracción diésel emplean normalmente gasóleo como combustible. La parte exterior al vehículo comprende la extracción, transformación y transporte de combustible hasta el tren.

La parte en el vehículo comprende motor diésel, transmisión y reducción.

4.3.1 Motores empleados en la tracción diésel

En los trenes de tracción diésel se emplean hasta dos tipos de motores: el “motor principal”, que suele ser un motor diésel de gran potencia (200 a 2000 kW), y en el caso particular de la tracción diésel eléctrica, motores eléctricos de tracción que son alimentados por la electricidad producida en un generador o alternador acoplado al motor principal, y tienen potencias del orden de 300 kW por motor.

Los motores diésel utilizados en tracción ferroviaria como “motores principales” son de cuatro tiempos (aspiración, compresión, combustión y escape), exceptuando los de General Motors que son de dos tiempos. Suelen ser de 12 o 16 cilindros en “V”, aunque en motores pequeños es corriente el usos de 6 cilindros en línea y horizontales. La refrigeración es por agua, salvo algunas excepciones de motores refrigerados por aire.

Los motores diésel modernos son de inyección directa. La inyección se realiza con el sistema clásico o bomba de inyección, con tantos pistones como inyectores o por el sistema moderno de alta presión con control electrónico sistema “common rail” mediante una electroválvula en la cabeza de cada cilindro.

El rendimiento de estos motores es del orden del 35%???

Definiciones de potencia y esfuerzo tractor

Para las locomotoras diésel se definen distintos valores de potencia, dependiendo del punto elegido para medirla. Aunque son posibles varias definiciones de potencia, normalmente se emplean cinco:

- La potencia nominal del motor, es la potencia máxima alcanzable para unas determinadas condiciones de presión atmosférica, temperatura y humedad (1 bar, 27°C y 60% de humedad relativa)
- La potencia de utilización, es la disponible en el motor y es la máxima que se puede obtener de él para una determinada aplicación. Esta potencia es inferior a la potencia nominal del motor y el fabricante la consigue limitando el desplazamiento de la cremallera de la bomba o bombas de inyección. Esta reducción de potencia se efectúa para aumentar la fiabilidad y duración del motor y para que la locomotora mantenga su potencia máxima independiente de la altitud sobre el nivel del mar.
- La potencia nominal de la locomotora, es el resultado de restar a la potencia de utilización la potencia consumida por los auxiliares y las pérdidas que se producen en la transmisión.
- La potencia en llantas, es la potencia realmente utilizable por la locomotora, su valor suele estar próximo a la potencia nominal de la locomotora.
- La potencia en gancho, es la potencia realmente útil para remolcar. Tiene el inconveniente de que, puesto que se define como la potencia en llantas menos la potencia necesaria para mover la locomotora, depende del tren que arrastre y del perfil.

Por otra parte el esfuerzo tractor es la fuerza longitudinal que la locomotora hace sobre el tren en el gancho.

4.3.2 Transmisiones

Dado que el sentido de rotación del motor diésel ferroviario es único, es necesario disponer de algún sistema de inversión del sentido de la marcha. Esta es la función de la transmisión. Así mismo permite desacoplar el motor diésel de las ruedas del tren para poder arrancar el motor y que funcione en ralentí con el tren parado y adapta la curva de propulsión del motor a las necesidades y límites de tracción del vehículo.

Los tipos de transmisiones son:

- Mecánica
- Hidráulica
- Eléctrica

Transmisión mecánica

La transmisión mecánica es similar a la utilizada en los automóviles. El par motor proporcionado por el motor diésel se transmite a los ejes motores a través de una serie de piñones y ejes.

La transmisión mecánica está compuesta por tres órganos fundamentales: el embrague, la caja de cambios y el inversor.

El embrague es un elemento intermedio que une los ejes del motor con el eje que mueve las ruedas. Si no existiera no se podría mantener el vehículo parado con el motor en marcha y en el momento del arranque se iniciaría de forma brusca el movimiento del vehículo.

La caja de cambios permite modificar la relación de transmisión, es decir, el cociente entre la velocidad del motor diésel y la velocidad de rotación de las ruedas del tren. Se emplean juegos de engranajes que permiten por lo general cinco velocidades o relaciones.

El inversor del sentido de la marcha se sitúa en el puente reductor o en la caja de cambios y permite cambiar el sentido de circulación del vehículo sin modificar las cualidades de potencia y velocidad.

Las transmisiones mecánicas se utilizan muy poco en el ferrocarril, exclusivamente en vehículos de reducida potencia puesto que la potencia está muy limitada por el embrague, se rompe el esfuerzo tractor al cambiar de marcha y no es posible instalar un freno dinámico. Como ventajas se pueden mencionar su menor precio y buen rendimiento (hasta el 95%).

Transmisión hidráulica

La transmisión hidráulica tiene dos componentes fundamentales: los *acopladores* que realizan la función del embrague de las transmisiones mecánicas, y los *convertidores de par* que transmiten la potencia del motor a los engranajes acoplados al eje de las ruedas del vehículo.

Se distinguen dos tipos de transmisiones hidráulicas: las *hidrodinámicas*, en las que todos los elementos son hidráulicos; y las *hidromecánicas*, en las que el convertidor o convertidores de par se combinan con una caja mecánica de varias velocidades.

El acoplador hidráulico está formado por una cámara con aceite en el que giran dos coronas con álabes enfrentadas entre sí, una solidaria al eje accionado por el motor (bomba centrífuga) y la otra al eje de salida (turbina). El aceite impulsado por la turbina transmite el movimiento a la corona de salida. Tanto en el arranque del motor como en el funcionamiento al ralentí el cárter está vacío de aceite y por tanto el desacoplamiento es total.

Las ventajas de este tipo de transmisiones son que no se produce ruptura del esfuerzo tractor, se reducen las masas no suspendidas, se mejora el comportamiento ante el patinaje, los costes de mantenimiento son muy reducidos y la fiabilidad es elevada. Sin embargo, el rendimiento es inferior al de la transmisión mecánica y la potencia máxima está limitada a unos 3.000 kW.

Transmisión eléctrica

La transmisión eléctrica se compone de un generador acoplado al motor diésel, que alimenta a los motores eléctricos acoplados a los ejes del vehículo. Existen tres tipos de transmisiones eléctricas, dependiendo del tipo de generador y de motores eléctricos empleados:

- Continua/Continua (DC/DC): en ella tanto el generador como los motores de tracción son de corriente continua con colector. Este tipo de transmisiones dejaron de emplearse en los años 70.
- Trifásica/Continua (AC/DC): en la que el generador es un alternador trifásico síncrono y los motores son de corriente continua con colector.

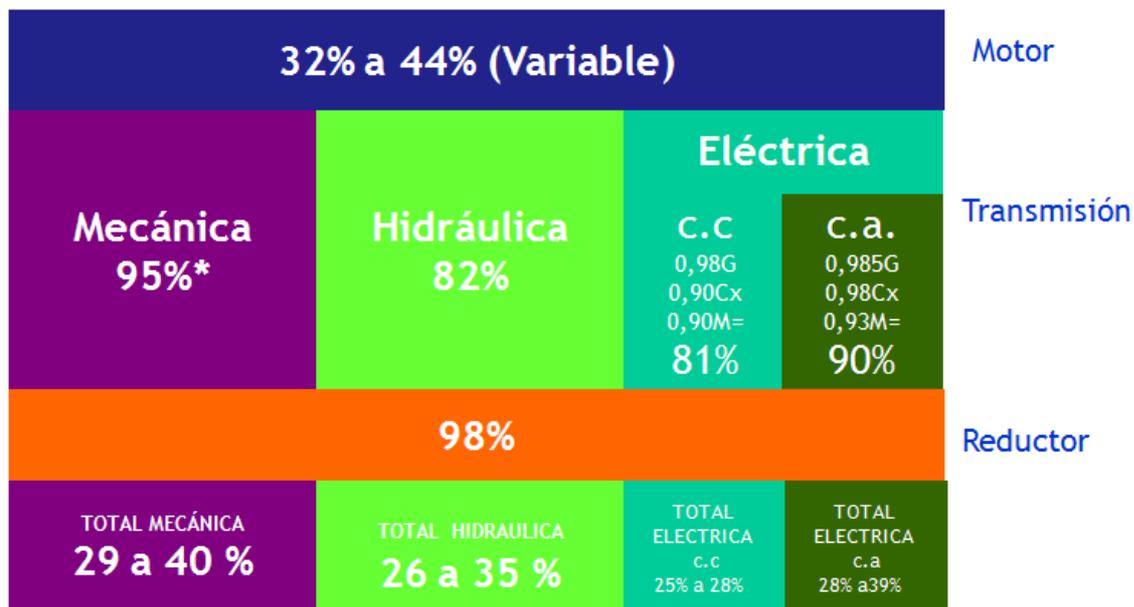
- Trifásica/Trifásica (AC/AC): el generador principal es un alternador trifásico síncrono y los motores de tracción son trifásicos asíncronos alimentados mediante onduladores con variación de frecuencia y tensión.

La regulación de las locomotoras diésel-eléctricas se efectúa actuando sobre el generador eléctrico y la inyección de combustible del motor diésel.

Aunque estas transmisiones son más pesadas y su coste de adquisición es alto, permiten una elevada utilización de la adherencia rueda-carril, buena fiabilidad y posibilidad de instalar freno eléctrico reostático.

4.3.3 Rendimientos y emisiones en tracción diésel y variables de las que dependen

Figura 27. Rendimiento de la cadena de tracción diésel



* Baja el rendimiento del motor

Fuente: Elaboración propia

5. DINÁMICA DEL TREN

Sobre el tren actúan diversas fuerzas longitudinales, siendo el balance de ellas el que produce la aceleración o deceleración del tren y explica su consumo de energía.

Para la descripción de la dinámica longitudinal del tren seguiremos el documento “Dinámica de los trenes de alta velocidad” de García Álvarez (2007b) que puede consultarse para mayor detalle.

5.1. Resistencia al avance

Se denomina genéricamente “resistencia al avance” a las diversas fuerzas que se oponen al movimiento del tren.

El valor de la *resistencia al avance en recta* (R_{ar}) depende de características físicas del tren; en concreto, de su masa, de su forma, del área de su sección transversal y de su *superficie mojada* (que a su vez está muy influenciada por su longitud). La *resistencia al avance* también depende, y de forma muy importante, de la velocidad a la que circula.

En el caso de que la vía no esté en alineación recta en un punto determinado, la R_{ar} sólo es una componente de la *resistencia al avance total* que debe sumarse a la *resistencia al avance* debida a la curva.

La expresión más habitual de la *resistencia al avance* de un tren en recta (y en horizontal), con velocidad del viento exterior 0 km/h⁴, es conocida como “fórmula de Davis” y es la siguiente:

$$R_{ar} = -(A + B \times V + C \times V^2)$$

Donde: R_{ar} es la resistencia al avance en recta, que se expresa normalmente en decanewtons (daN). Será siempre de valor negativo, pues se opone al movimiento del tren y tiene sentido contrario a la velocidad V . V es la velocidad del tren, expresada normalmente en kilómetros por hora (km/h); A , B y C son coeficientes que dependen de las características físicas del material rodante, que se miden, respectivamente, en [daN], [daN/(km/h)] y [daN/(km/h)²].

En muchas ocasiones, los coeficientes se expresan (erróneamente, a nuestro juicio) por unidad de masa del tren, y entonces la ecuación anterior se convierte en la siguiente:

$$R_{ar} = -[M \times (a + b \times V + c \times V^2)]$$

⁴ En la exposición nos referiremos a la *resistencia al avance* en ausencia de viento exterior. En realidad, la resistencia al avance depende de la velocidad y sentido relativo del viento, pero el efecto del viento sobre la resistencia no es predecible como para que pueda ser tenido en cuenta en un análisis general, así que este efecto sólo se considerará en el cálculo de las marchas de los trenes y los consumos como un elemento aleatorio que puede producir una variación en el valor de la resistencia al avance calculada. Ello no significa que el viento sea irrelevante en la explotación ferroviaria: en alta velocidad, el viento lateral puede ser un factor crítico para limitar la velocidad del tren, por motivos de seguridad, pero ello queda fuera del objeto de análisis en este punto. También el viento debe ser tenido en cuenta en el caso de los vehículos estacionados sin freno, cuando un pequeño empuje del viento en el sentido de la pendiente puede ayudar a iniciar el movimiento del vehículo.

En este caso: M es la masa del tren, expresada en toneladas (t); y a , b y c son coeficientes específicos de la resistencia al avance, que se miden respectivamente en daN/t, daN/(t.km/h) y daN/[t.(km/h)²].

La razón por la que tradicionalmente se hayan empleado expresiones con coeficientes específicos relativos a la masa radica en que, en el pasado, la mayor parte de los trenes eran de composición variable, por lo que con esta fórmula se podía estimar con más facilidad la *resistencia al avance* de un tren al cambiar su composición (por ejemplo, cuando a un tren se le añadían o retiraban más coches o vagones).

Desaconsejamos el empleo de este tipo de expresiones porque, en la realidad (y cómo mostraremos más adelante), los coeficientes B y C no dependen de la masa del tren. Por ello, al suponer que existe una relación de proporcionalidad entre la masa y estos coeficientes, se cometen errores que pueden ser significativos, especialmente en el dominio de la alta velocidad, ya que el error se presenta en los términos que dependen de la velocidad y que son, precisamente, los que tienen más influencia en la *resistencia al avance* en alta velocidad⁵.

5.1.1 Resistencia mecánica al avance

La parte de la resistencia al avance que no tiene que ver con el efecto del aire exterior al tren se denomina *resistencia mecánica* (la designaremos como R_m). Se deriva, en el caso más general (García-Lomas, 1956) de la resistencia de rozamiento entre cojinetes y manguetas, de la rodadura entre las ruedas y carriles, de las irregularidades en la vía, así como de las pérdidas de energía en los aparatos de tracción y choque y en la suspensión de los vehículos a causa de los movimientos oscilatorios o parásitos que adquiere la masa suspendida.

Resistencia mecánica al avance en recta

En el ferrocarril moderno (con el carril soldado) no es significativa la resistencia debida a las irregularidades de la vía (entre las cuales la más relevante es la producida por las juntas de dilatación, que se podría evaluar, cuando la hubiera, en aproximadamente 1,5 daN/t). Tampoco son relevantes los efectos de las pérdidas de energía en aparatos de tracción y de choque o en las suspensiones.

Por ello, a los efectos prácticos, la *resistencia mecánica en recta* (R_m) en un sistema ferroviario moderno la supondremos como la suma de: la resistencia a la rodadura (R_{mrd}) y la resistencia de los rozamientos internos (R_{mri}). Es decir,

$$R_m = R_{mrd} + R_{mri}$$

y expresado en función de los correspondientes coeficientes específicos relativos a la masa del tren,

$$R_m = a \times M = a_{mrd} \times M + a_{mri} \times M = (a_{mrd} + a_{mri}) \times M$$

La fuerza mecánica de *resistencia a la rodadura* (R_{mrd} , en daN) es el resultado de multiplicar la fuerza normal a la vía (el peso sobre la rueda, medido a partir de la masa en toneladas, M) por el *coeficiente de resistencia a la rodadura*:

⁵ La expresión de la *resistencia al avance* con coeficientes que resultan de dividir su valor real por la masa del tren puede dar una idea de la aceleración que cada uno de estos términos produce en el tren, si bien en este caso no habrá que dividir por la masa del tren, sino por la masa del tren más la masa equivalente de las partes giratorias.

$$R_{mrd} = \varphi \times 1000 \times M \approx 0,5a0,9 \times M$$

El *coeficiente de resistencia a la rodadura* en el ferrocarril es muy bajo en relación con el de la carretera ($\varphi = 5 \times 10^{-4}$ a 9×10^{-4} frente a $\varphi = 100 \times 10^{-4}$) como se puede comprobar comparando el calentamiento de las ruedas y carriles del tren con el de los neumáticos y el asfalto.

La *resistencia de los rozamientos internos* incluye la resistencia mecánica al avance que se produce en los cojinetes y en las cajas de grasa de los ejes, cuyo valor depende de muchos factores, pero puede suponerse aproximadamente proporcional a la masa del tren y al número de ejes.

En la fórmula clásica de Davis, muy parecida a la adoptada en la *Norma Técnica de Renfe* para locomotoras, y aplicable a velocidades mayores de 7 o 10 km/h, el valor de esta resistencia es

$$R_{mri} = 0,65 \times M + 13 \times N_e$$

donde: R_{mri} es resistencia mecánica de los rozamientos internos (en daN); M es la masa real del tren (en t) y N_e es el número de ejes del tren.

Valores de la resistencia mecánica para diversos tipos de trenes

El valor del coeficiente específico de *resistencia mecánica a la rodadura* (a_{mrd}) que facilitan los fabricantes de los trenes (y que es constatado por la experimentación) es del orden de 0,5 a 0,9 daN/t, con valores más próximos a 0,5 daN/t para trenes modernos.

Por lo que respecta a la *resistencia de los rozamientos internos*, la aplicación de las fórmulas clásicas de Davis conduce, para trenes con una masa media por eje del orden de 20 toneladas, a un valor del coeficiente específico asociado (a_{mri}) de 1,3 daN/t. Y para trenes con masa del orden 17 toneladas por eje, a valores de esta resistencia específica de 1,4 daN/t.

Los totales de la *resistencia mecánica total* (por unidad de masa) para locomotoras y trenes clásicos estaban habitualmente en valores de 1,2 a 2 daN/t. El valor recogido en las fórmulas empleadas en la mayor parte de las administraciones ferroviarias para las composiciones remolcadas, tanto de viajeros como de mercancías, es de 2 daN/t. Este valor encaja bien con las fórmulas clásicas, y permite deducir que 1/3 de la resistencia corresponde a la *resistencia a la rodadura* y 2/3 a la *resistencia de los rozamientos internos*.

En trenes de alta velocidad modernos, el coeficiente específico de resistencia mecánica (a) nunca llega al valor de 1 daN/t, estando en valores normales de 0,6 a 0,8 daN/t. En alta velocidad la *resistencia mecánica* es poco importante: no sólo porque este coeficiente es muy bajo, sino porque al crecer la velocidad, aumentan mucho los términos de la resistencia al avance que dependen de la velocidad del tren, por lo que el peso relativo de la *resistencia mecánica* es muy reducido (en alta velocidad la resistencia mecánica sólo requiere alrededor del 5% de la energía total consumida por el tren).

Resistencia en curva

Al circular el tren por una curva, existe una fuerza longitudinal retardadora que actúa sobre el tren, por efecto del rozamiento de las pestañas sobre el carril, y por el rozamiento de la rueda externa sobre el carril (rozamiento debido a que giran las dos ruedas del mismo eje con la misma velocidad angular mientras la rueda externa recorre una mayor longitud).

La *resistencia al avance en las curvas* (se ha comprobado empíricamente) responde, aproximadamente, para vía de ancho 1.668 mm, a la fórmula:

$$R_{ac} = - \left[m \times \frac{800}{R} \right],$$

y en vía de ancho 1.435 mm la fórmula es la misma con el valor 600 en vez de 800.

Donde, R_{ac} es la resistencia al avance debida a la curva en daN; R es el radio de la curva, en m y m es la masa del tren, en t.

Resistencia media equivalente de las curvas

Debido a la relativa poca importancia de la resistencia al avance en las curvas en velocidades medias y altas, y para facilitar el cálculo de la resistencia al avance en las curvas en un tramo de línea (y, sobre todo, de la energía adicional consumida por la resistencia de las curvas) se puede aplicar un método simplificado basado en el hecho de que esta resistencia no cambia con la velocidad ni con el perfil en alzado de la línea, sino únicamente con la masa del tren y con el radio de la curva. Por ello, la aproximación no vendría de la consideración de la curva como un incremento de la pendiente, sino como una componente adicional de la *resistencia mecánica al avance*.

Recordemos que la resistencia mecánica al avance en recta es:

$$R_m = a_{mrd} \times M + a_{mri} \times M = (a_{mrd} + a_{mri}) \times M = M \times a$$

Donde: R_m es la resistencia mecánica; M es la masa del tren, en toneladas y a_{mrd} , a_{mri} y a son los coeficientes específicos (por unidad de masa) de resistencia a la rodadura, de los rozamientos internos y el total de la resistencia mecánica.

La energía necesaria (en llantas) para vencer esa resistencia mecánica en una longitud L es:

$$E_m = L \times R_m = L \times M \times a$$

Como, por otra parte, la resistencia adicional de la curva (de radio R_c y longitud l_c y en vía de ancho 1.435 mm⁶) es

$$R_{ac} = - \left[M \times \frac{600}{R_c} \right]$$

La energía requerida para vencer la resistencia del conjunto de las curvas existentes en un tramo del recorrido, es

$$E_{curvas} = \sum (l_c \times R_{ac}) = M \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c}$$

si se define el *índice de curvas* de un tramo de longitud L como:

$$a_{cur} = \frac{1}{L} \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c}$$

La energía necesaria para vencer la resistencia en las curvas puede expresarse de la siguiente forma:

⁶ Para vía de ancho 1.668 mm, se debe sustituir en todas las expresiones el valor de 600 por el de 800.

$$E_{curvas} = \frac{L}{L} \times M \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} = L \times M \times \frac{1}{L} \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} = L \times M \times a_{cur}$$

y teniendo en cuenta la analogía que presenta con la fórmula de la resistencia mecánica, la expresión de la energía necesaria para vencer la resistencia de la curva más la resistencia mecánica es:

$$E_{m+curvas} = L \times M \times a + L \times M \times a_{cur} = L \times M \times (a + a_{cur})$$

Ello equivale a afirmar que el denominado *índice de curvas* se convierte en una *resistencia media equivalente de las curvas* del tramo, ya que se expresa en las mismas unidades (daN/t) que el *coeficiente específico de resistencia mecánica* (y puede ser sumando éste para, multiplicado por la masa del tren, obtener la parte de la fuerza que, en horizontal, se opone al avance que es independiente de la velocidad del tren).

El valor de a_{cur} es fijo y predeterminable para cada trayecto concreto (según la fórmula que se indicó). Teniendo en cuenta el pequeño peso relativo este coeficiente, se propone que, en lugar de calcularlo caso por caso, se recurra en cada tramo de línea a una estimación de su valor en función del valor calculado o estimado para un tramo comparable de la misma línea o de otra línea análoga.

Ejemplos de valores representativos de diversos tipos de líneas pueden considerarse los siguientes:

- Línea de muy alta velocidad ($V \approx 350$ km/h) con ancho 1.435 mm (calculado para la línea Madrid-Barcelona): 0,08 daN/t.
- Línea de alta velocidad ($210 < V < 300$ km/h) con ancho 1.435 mm (calculado para la línea Madrid-Sevilla): 0,1268 daN/t.
- Línea convencional con velocidades normales de tráfico de viajeros ($V \approx 160$ km/h) y ancho 1.668 mm (calculado para la línea de Tortosa a Tarragona): 0,163 daN/t.
- Línea convencional con velocidades correspondientes a una línea principal. En un tramo de trazado difícil ($V \approx 100$ km/h) con ancho 1.668 mm (calculado para el tramo de Bobadilla a Pizarra de la línea de Córdoba a Málaga): 0,803 daN/t; en un tramo con trazado más normal, 0,58 daN/t (Lleida a Roda de Bará).
- Línea secundaria de trazado antiguo trazado difícil ($V \approx 80$ km/h) con ancho 1.668 mm (calculado para el tramo de Betanzos Infesta a Pontedeume de la línea de Betanzos a Ferrol): 1,424 daN/t.

De los valores expuestos puede deducirse que la resistencia producida por las curvas, salvo casos muy extremos, es siempre inferior (e incluso en líneas normales, muy inferior) a la resistencia mecánica en recta, y además la resistencia mecánica tiene un peso despreciable en líneas de velocidades altas frente a la resistencia al avance total.

Resistencia en curva de vehículos con ejes orientados radialmente

Una parte de la resistencia en curva procede del roce de la pestaña con el carril externo. Por ello, esta resistencia en curva es menor en los vehículos cuyos ejes se orientan radialmente en las curvas, o cuyas ruedas están guiadas (como es el caso del tren Talgo).

Lucaszewicz (2007) ha observado, en diversos ensayos, una reducción del 35 al 40% de la resistencia en curva de los vagones MV2000, equipados con el bogie ASF AR-1,

que permite a los ejes autoalinearse radialmente en las curvas, frente a los vagones “Vad” con bogies convencionales.

López Gómez (2008) indica que el coeficiente de resistencia en curva de los ejes guiados de los trenes Talgo es de 0,3.

5.1.2 Resistencia a la entrada del aire

La resistencia al avance dependiente de la velocidad del tren corresponde, en una parte importante, a la resistencia al avance que produce la entrada de aire en el tren.

En los trenes en marcha, entra y sale de forma permanente una notable cantidad del aire: la necesaria para refrigeración de los motores y la que precisa para la renovación de aire de los viajeros. Para la renovación de aire de los viajeros, los caudales típicos suelen ser de 10 a 20 m³ por persona y hora, dependiendo de la temperatura exterior.

La cantidad de aire total que entra en los trenes es importante. Por ejemplo, el tren *Talgo 350* (serie Renfe 102) necesita 32,4 m³/s para la refrigeración de los motores de las cabezas tractoras y 44,9 m³/s para la renovación de aire; es decir, un tren de alta velocidad de 320 plazas puede precisar más de 77,3 m³/s (el ICE 3, Serie 103, de 404 plazas, requiere casi 150 m³/s). Este aire debe ser acelerado casi instantáneamente al entrar en el tren, por lo que el tren hace sobre esta masa de aire una fuerza hacia adelante y por lo tanto, el tren experimenta una fuerza de reacción hacia atrás de igual valor:

$$R_{ea} = -\frac{Q \times \rho \times dV}{dt} \times \frac{1}{3,6 \times 10}$$

Donde: R_{ea} es la fuerza instantánea que se opone al avance del tren como consecuencia de la entrada de aire en el mismo. Al ser continua la entrada de aire, se convierte en la *resistencia al avance* debida a *la entrada de aire* de refrigeración y el aire acondicionado (daN); t es la unidad de tiempo en que se produce el proceso, en s; Q es el gasto másico, o flujo de aire que entra en el tren, en m³/s; ρ es la densidad del aire (kg/m³), con valor típico de 1,225 kg/m³ a 15°C y a presión atmosférica estándar a nivel del mar y V es la velocidad del tren en km/h

De ello se deduce que el valor del término B dependiente de la velocidad (en la parte debida a la entrada de aire en el tren), en daN/(km/h), es:

$$B = Q \times \rho \times 0,0277 \approx 0,034 \times Q$$

5.1.3 Resistencia aerodinámica de presión y fricción

Denominamos *resistencia aerodinámica al avance* a la fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia de la interacción entre el tren y el aire circundante con el que choca y que lo envuelve.

En ausencia del viento exterior, la *resistencia aerodinámica al avance* es proporcional al cuadrado de la velocidad del tren, y tiene, por ello, como expresión general:

$$R_{ada} = C \times V^2$$

Esta resistencia aerodinámica está integrada por dos componentes: *resistencia de fricción* y *resistencia de presión*.

La *resistencia aerodinámica de presión* es la proyección en la dirección del movimiento de la resultante de las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie del cuerpo. Está integrada, por lo tanto, por esfuerzos normales a la superficie sobre la que actúan. Depende fundamentalmente de la sección transversal del tren (en cabeza y cola), y de la forma de la cabeza y cola del tren. También depende de los aparatos situados en el techo del vehículo (por ejemplo, pantógrafos, línea de techo, etc.) y de los bogies. “El campo fluido alrededor del tren crea un campo de presiones no simétrico que tiene como resultante una fuerza en sentido contrario al avance del tren que representa la resistencia de presión” (Alcol, 2004).

La *resistencia aerodinámica de fricción* está constituida por esfuerzos tangenciales. Es debida a la viscosidad del aire, y depende fundamentalmente del área *mojada* del cuerpo (entendiendo por tal el área o la superficie que fricciona el aire; es decir, que se obtiene multiplicando el perímetro del tren (en la parte que fricciona con el aire que aproximadamente corresponde al doble de la altura por el ancho- por su longitud). También depende de su continuidad y rugosidad superficial.

El coeficiente de la *resistencia aerodinámica al avance*, de un tren, en cielo abierto y sin viento, se calcula empíricamente en ensayos sin tracción ni freno, con el tren en deriva decelerando desde una determinada velocidad (y aplicando a los valores obtenidos las correcciones por el viento exterior, temperatura y presión).

Aunque resulta muy difícil determinar la influencia de cada uno de los componentes, puede señalarse orientativamente:

La resistencia aerodinámica producida por los bogies puede ser del 38 % al 47 %. Guiheu (1982) evalúa la resistencia de un bogie en $15,9 \times 10^{-4}$ daN/(km/h)² en el caso de los vehículos no articulados y en $16,72 \times 10^{-4}$ daN/(km/h)² en el caso de los articulados. La resistencia que presenta cada bogie decrece a lo largo del tren: así, la resistencia del segundo es el 40% de resistencia del primero y la resistencia del cuarto bogie es el 25% de la del primero (Alcol, 2004).

La resistencia aerodinámica del pantógrafo y equipos en techo puede ser del 8 % al 20%. Para Guiheu, 1982, la resistencia de un pantógrafo y sus equipos es de $19,8 \times 10^{-4}$ daN/(km/h)². De los datos publicados por Rochard y Schmid (2000), para el Eurostar, que circula con dos pantógrafos en captación, la resistencia de cada pantógrafo es muy parecida a la indicada por Guiheu: 20×10^{-4} daN/(km/h)².

La resistencia de presión de la cabeza y cola del tren puede ser del 8 % al 13% (Guiheu, 1982, ofrece el valor, para un TGV, de $8,040 \times 10^{-4}$ daN/(km/h)²).

La resistencia específica de los espacios entre los coches, con valor orientativo par cada uno de $0,000272 \times p \times L$ daN/[km/h²], supone según la fórmula de Armstrong y Swift (citada por Rochard y Schmid, 2000) multiplicar por 11 el valor de la resistencia de fricción, aunque aplicada únicamente a la longitud de los pasos entre coches.

Resistencia aerodinámica en túneles

En el interior de los túneles, la *resistencia aerodinámica al avance* aumenta como consecuencia de la mayor fricción del aire contra la pared exterior del tren. El efecto práctico es que en la *resistencia al avance aerodinámica* debe incluirse un *coeficiente de obstrucción* (o *factor túnel*, T_f), adimensional, que multiplica el término relacionado con el cuadrado de la velocidad, y por tanto, pasa a ser:

$$R_{ar_{túnel}} = -[A + B \times V + T_f \times C \times V^2]$$

Sobre el factor túnel, señalan Melis et al. (2001) que “la razón de las resistencias en el interior de túnel y a cielo abierto se denomina factor del túnel, y para el mismo acabado superficial, depende principalmente de la relación de las áreas de las secciones transversales del tren y del túnel, parámetro que se denomina sección de bloqueo”. Concreta Glöckle (1996) que “el factor túnel T_f depende de la sección

libre del túnel, de la sección del tren, de la velocidad y en menor medida de la longitud del tren. En túneles de gran longitud y sobre todo los de vía única, la resistencia aerodinámica del túnel es un elemento esencial del cálculo del tiempo de recorrido”.

El *factor de túnel* para velocidades de 100 km/h oscila, orientativamente, entre 1,2 y 1,6 (con secciones de túnel respectivamente correspondientes a diámetros de 11,5 m o 8,5 m), y a 300 km/h pasa a tener valores (con la misma sección) entre 1,3 y 2.

El factor del túnel sólo multiplica el término proporcional a la velocidad del tren al cuadrado; porque los demás componentes de la *resistencia al avance* (la resistencia mecánica, la resistencia por entrada de aire o la debida a las curvas) no sufren variación significativa por estar el tren en túnel o a cielo abierto. (Ello sin perjuicio de que, como hemos señalado, es frecuente que al paso de los trenes de alta velocidad por los túneles, se cierre la entrada de aire exterior para la recirculación de aire, lo que tiene el efecto indirecto de reducir la resistencia al avance debida a la entrada de aire).

Incidencia de la temperatura y la presión

En la realidad, las condiciones de temperatura y de presión pueden ser muy diferentes a las de los ensayos, por lo que si desea ajustar el valor de la resistencia aerodinámica al avance para otras condiciones, debería de aplicarse una corrección proporcional de la siguiente forma:

$$C_r = C_s \times \frac{\rho_r}{\rho_s}$$

Donde:

C_r es el *coeficiente aerodinámico* en las condiciones reales;

C_s es el coeficiente aerodinámico en condiciones estándar (normalmente 15 ° C y 1.013 mbar);

ρ_r es la densidad del aire en las condiciones reales (se calcula con la fórmula correspondiente)

ρ_s es la densidad del aire en las condiciones estándar (1,225 kg/m³ en las condiciones expuestas).

El cálculo de la densidad real del aire (a una presión de P mbar y a una temperatura de θ °C) se hace sobre el dato de que densidad del aire es, con presión de 1.013 mbar y temperatura de 0°C, $\rho_a=1,293$ kg/m³. En el caso más general:

$$\rho = \rho_a \times \frac{P}{1013} \times \frac{273,16}{273,16 + \theta} = \frac{P \times 0,34866}{273,16 + \theta}$$

Para tener una idea del orden de magnitud que pueden suponer las variaciones de la densidad del aire en el coeficiente aerodinámico (y por ello de la resistencia al avance de un tren), puede deducirse de la fórmula anterior que a -10°C, la densidad del aire (a la presión atmosférica normal) es de 1,342 kg/m³, mientras a 40 °C, la densidad del aire es del 1,127 kg/m³, lo que supone una variación respecto al valor estándar desde +9,55% a -8% (con una horquilla, por lo tanto, en las temperaturas alcanzables en España en la zonas de meseta del 17,55%).

Por ejemplo, para un tren circulando a 300 km/h con coeficiente C de 0,05 daN/(km/h)² en condiciones climatológicas estándar, el consumo de energía en llantas para vencer la resistencia aerodinámica es de 12,5 kWh/km. Este consumo se

reduce a 11,5 kWh/km cuando la temperatura sube (desde 15°C) a 40°; y el consumo se eleva a 13,7 kWh/km cuando la temperatura baja a -10° C.

En relación con la presión atmosférica puede apuntarse que, como ésta disminuye con la altura, la densidad del aire y el coeficiente aerodinámico también disminuyen con la altura, pudiendo estimarse, para una misma temperatura, una disminución de la densidad de un 2% por cada 300 m de incremento de altura. Por ello, la disminución de la *resistencia aerodinámica al avance* de un tren de alta velocidad entre, por ejemplo, Barcelona (situada al nivel del mar) y Medinaceli (a unos 1.200 m de altitud) es del orden de un 8%.

La densidad del aire afecta directamente al coeficiente de la resistencia aerodinámica C y al de la resistencia por la entrada de aire en el tren, B . Puede señalarse, a título orientativo, que en alta velocidad (300 km/h) estos términos explican alrededor de 95% de la fuerza que, en horizontal, se opone al avance del tren, y el 83% de la energía consumida para el movimiento del tren en un recorrido representativo (la diferencia entre ambos porcentajes corresponde a la energía consumida -y luego no reaprovechada- para subir rampas y acelerar en paradas y otros puntos de cambio de velocidad.)

En García Álvarez (2007) pueden observarse las variaciones de la densidad del aire para diversos valores de la presión y de la temperatura, así como su incidencia en el coeficiente C de la fórmula de la resistencia al avance.

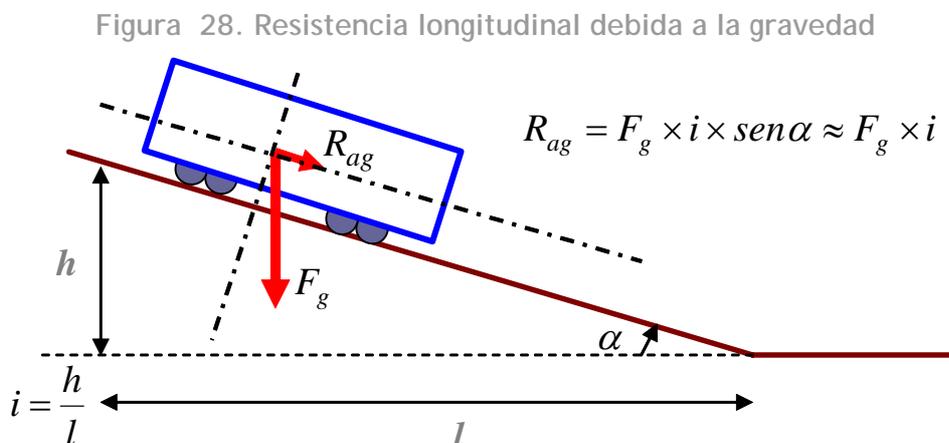
5.2. El efecto de la gravedad

Para tener en cuenta el efecto de la gravedad sobre el movimiento del tren, que disminuye o aumenta la resistencia al avance, hay que agregar la resistencia al avance debida la rampa o pendiente cuyo valor es el siguiente:

$$R_{ag} = -(M \times g \times i) \times \frac{1}{10} \approx -(M \times i)$$

Donde:

R_{ag} es la resistencia al avance debida a la fuerza de la gravedad en decaNewtons (daN). Puede ser positiva o negativa en función del signo de i ; g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²); M es la masa del tren, en toneladas (t) e i es al pendiente local en milésimas o milímetros por metro (mm/m). Puede tener valor positivo si es una subida (rampa) o negativo si se trata de una bajada (pendiente).



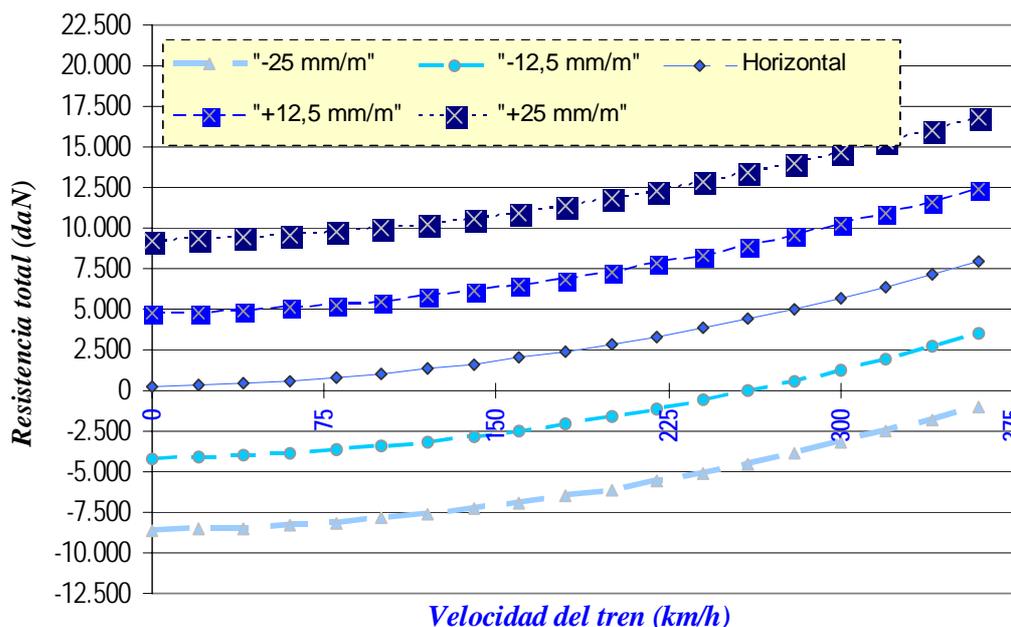
Fuente: García Álvarez, 2007

Como se puede observar, la incidencia de la fuerza de la gravedad sobre el tren es independiente de la velocidad, y debe sumarse (con su signo) a la resistencia al

avance, por lo que en la práctica, para cada tren, la resistencia al avance en horizontal (caracterizada gráficamente en una representación R_a, V como una parábola creciente con la velocidad), se convierte en una familia de curvas paralelas, cada una representativa de la resistencia total en una pendiente o rampa caracterizada por su inclinación i . Como es natural, existen casos en que los que la fuerza total es positiva (tiende a acelerar el tren, incluso en ausencia de tracción) lo que ocurre con pendientes fuertes y normalmente a velocidades bajas.

La representación gráfica de la *resistencia total* en diversas rampas y pendientes (para un tipo de concreto de tren y cambiada de signo) está recogida en la figura:

Figura 29. Resistencia total al movimiento del Talgo 350 en diversos perfiles



La resistencia al avance crece con el cuadrado de la velocidad y la fuerza de la gravedad es independiente de la velocidad. Cuando la pendiente supera determinado valor, la resistencia al avance es positiva, es decir, el tren tiende a acelerarse en ausencia de tracción o freno.

5.3. Ecuación del movimiento del tren

La aceleración del tren (y por ello su velocidad) depende de las diversas fuerzas que actúan sobre él.

5.3.1 Expresión simple de la ecuación del movimiento

Cuando hay una fuerza neta longitudinal F (en daN, resultante de la resistencia al avance, de la fuerza gravitatoria y de las fuerzas de tracción y frenado) sobre un tren (cuya masa es M) el tren cambia su velocidad, y lo hace de acuerdo con la segunda ley de Newton o principio fundamental de la dinámica:

$$a = \frac{F}{M} \times 10^2$$

Si la fuerza neta sobre el tren es positiva, entonces el tren aumenta su velocidad, pues la aceleración resulta mayor que 0; mientras que si la fuerza neta es negativa (porque la tracción es menor que la resistencia al avance o porque la fuerza del freno es mayor que la fuerza de la gravedad en la bajada) entonces la aceleración es negativa y el tren disminuye su velocidad.

Debe observarse que aunque el tren disminuya su velocidad, ello no significa que esté frenando, tan solo que las fuerzas retardadoras (entre las que el freno es sólo una más) son mayores que las fuerzas aceleradoras. Por ejemplo, puede estar subiendo una rampa fuerte traccionando, pero va perdiendo velocidad porque la rampa es muy fuerte.

5.3.2 El efecto de la inercia de las masas giratorias

Cuando el tren aumenta (o disminuye) su velocidad, no sólo es preciso aumentar su velocidad de traslación en el sentido longitudinal de la vía, sino que además es necesario aumentar la velocidad de rotación de diversas masas que giran, y que lo hacen más deprisa cuando el tren circula a mayor velocidad. Entre estas masas giratorias están, por ejemplo, las ruedas, los ejes y los discos de freno.

Estas masas tienen que girar más deprisa cuando el tren se traslada más deprisa (y viceversa), por lo que es preciso dedicar parte de la fuerza neta disponible a acelerar (o frenar) angularmente estas masas giratorias.

Puede comprobarse (véase García Álvarez, 2007)

$$a = \frac{F}{\left(M + \sum \left(M_{gi} \times \frac{r_i^2}{R_i^2} \right) \right)}$$

Donde M_{gi} es la masa del conjunto giratorio, en t; r es el radio de inercia polar del conjunto, en m y R es el radio de las ruedas motrices, en m.

puede, por ello, concluirse señalando que a los efectos del cálculo de la aceleración o frenado del tren, la masa que debe considerarse es la masa real del tren (incluyendo su carga), M , más una masa adicional que es la suma de cada una de las masas giratorias (M_g) multiplicada por el coeficiente entre los cuadrados del radio de inercia polar y el radio de giro. Como este valor es fijo para cada tren o cada vehículo, en muchas ocasiones se convierte en un *coeficiente de masas giratorias* (C_{mg}) que multiplica la masa real del tren:

$$C_{mg} = 1 + \frac{\sum (M_{gi} \times \frac{r_i^2}{R_i^2})}{M}$$

Son habituales valores de C_{mg} del orden 1,045 a 1,07.

Sin embargo, debe observarse que si se pretende hacer los cálculos con detalle, si el tren va más cargado, la masa del tren aumenta, pero no por ello aumenta la masa giratoria equivalente, lo que es especialmente relevante en los trenes de mercancías, en los que la relación entre la masa en vacío y cargado es importante como para requerir que, en los cálculos, se emplee la masa del tren cargado.

Por ello, la forma correcta de realizar los cálculos (cuando ello sea pertinente) es sumar la masa giratoria equivalente del tren en lugar de multiplicar por el coeficiente asociado. Si no se conoce la masa giratoria equivalente, puede deducirse del valor del coeficiente dado por el fabricante que estará en relación con la masa nominal del vehículo (es importante conocer con claridad si la masa a la que se ha referido es masa en vacío o la masa a plena carga).

5.3.3 Expresión completa de la ecuación del movimiento del tren

En la expresión de la ecuación general del movimiento del tren se ha representado por F la resultante de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren. Como resumen de lo expuesto, en la tabla se figuran las principales fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren clasificadas entre las que tienden a favorecer el movimiento del tren y las que tienden a retenerlo.

Como consecuencia de la existencia de todas estas fuerzas y del efecto de las masas giratorias, la ecuación del movimiento se convierte, en su expresión más detallada (debiendo emplearse, lógicamente, unidades homogéneas), en la siguiente:

$$a = \frac{F_t + M \times g \times p - F_f - M \times g \times r - A - B \times V - C \times T_f \times V^2 - M \times \frac{600}{R}}{\left(M + \sum \left(M_{gi} \times \frac{r_i^2}{R_i^2} \right) \right)}$$

Donde la *fuerza de tracción* (F_t) es incompatible con la *fuerza del freno* (F_f), y la *fuerza de la pendiente* de valor p es incompatible con la *fuerza de la rampa* de valor r .

Tabla 4. Resumen de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren

Fuerzas aceleradoras	Fuerzas retardadoras	Depende de ...	Fórmula
	Resistencia al avance en recta y horizontal	Masa, velocidad, forma y tipo de tren	$R_{avhr} = (A + BV + CV^2)$
	Acción gravitatoria en rampa	Masa del tren, inclinación de rampa	$R_{ag} = - i \times M \times g$
Acción gravitatoria en pendiente		Masa del tren, inclinación de la pendiente	$R_{ag} = + i \times M \times g$
	Resistencia de la curva	Masa del tren, Radio de la curva	$R_{ac} = -M \times \frac{800}{R}$ o $R_{ac} = -M \times \frac{600}{R}$
Esfuerzo de tracción		Potencia, velocidad, adherencia	$E_t = \text{Min}\left(+\frac{P_t}{V}, -(M \times K_a)\right)$
	Esfuerzo de frenado	Potencia frenado, masa, adherencia	$E_f = \text{Min}\left(-\frac{P_f}{V}, -(M \times K_a)\right)$

Fuente: García Álvarez, 2007

Notas: (1) En túnel, se añade el *Factor de túnel*, T_f que multiplica a V^2 . Con viento, aumenta el valor de esta resistencia. (2) Unidades: M, en t; Resistencias y esfuerzos, en daN; V en km/h; R en metros; P en kW; i en mm/m; A, B y C son coeficientes. K_a es el coeficiente de adherencia.

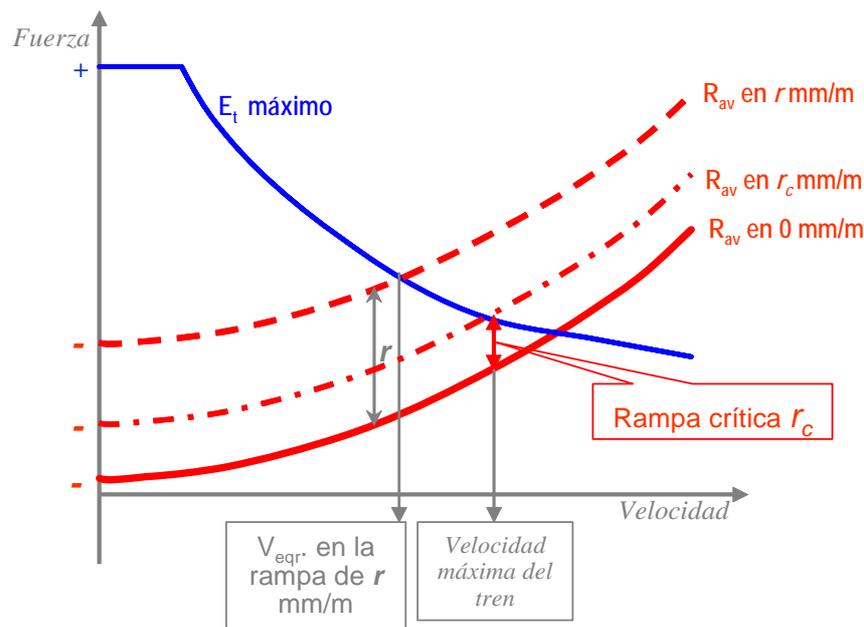
5.4. Dinámica del tren en pendientes y rampas

5.4.1 Dinámica del tren en rampas

En la circulación en una rampa (subida) sobre el tren actúan, en el caso más general, las siguientes fuerzas:

A favor del movimiento del tren: La fuerza de tracción (moderada) y en contra del movimiento del tren: La resistencia al avance (incluyendo, en su caso, la resistencia de curva y de túnel); y la resistencia de la fuerza gravitatoria.

Figura 30. Rampa crítica y velocidad de equilibrio en una subida



Fuente: Elaboración propia

Para la velocidad máxima del tren existe una *rampa crítica* r_c en la que la fuerza máxima de tracción se iguala a la fuerza resistente, y el tren está en equilibrio. Para cada rampa de valor r mm/m, existe una *velocidad de equilibrio en rampa* del tren (V_{eqr}).

Si la fuerza que actúa a favor del movimiento del tren es superior a las fuerzas que se oponen, el tren puede acelerarse; si es inferior, el tren reduce su velocidad. Existe una velocidad, llamada *velocidad de equilibrio en rampa* V_{eqr} (para un tren y para una rampa, r) para la cual la fuerza de tracción máxima que puede hacer el tren es igual a la suma de las fuerzas resistentes, y por tanto el tren si circula traccionando al máximo no cambia su velocidad. La velocidad de equilibrio V_{eqr} es tal que

$$\frac{P}{V_{eqr}} = A + B \times V_{eqr} + C \times T_f \times V_{eqr}^2 + m \times r$$

Si la *velocidad de equilibrio en rampa* es mayor que la velocidad máxima (que puede estar condicionada por las propias características del tren o por las de la infraestructura -típicamente por el radio de las curvas) el tren no precisa hacer uso de toda su fuerza de tracción para mantener en la subida su velocidad máxima. Por el contrario, si *velocidad de equilibrio* es menor que la velocidad máxima del tren, éste no podrá mantener en la rampa su velocidad máxima.

Correlativamente, para un tren, con una velocidad máxima (condicionada por las características del tren o por las curvas) le corresponde una rampa, llamada *rampa*

crítica (r_c), en la que ambas fuerzas se igualan y el tren mantiene su velocidad. Si la rampa existente es mayor que la *rampa crítica*, el tren no puede aumentar su velocidad hasta llegar a la máxima, pero si la rampa existente es menor que la *rampa crítica*, le sobra potencia al tren para mantener en la subida su velocidad máxima. Para la rampa crítica (r_c), se cumple que:

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

Esta idea tiene importancia en orden al diseño de la infraestructura, ya que para optimizar el sistema, las rampas y las curvas deben dimensionarse (cuando sea posible) conjuntamente y teniendo en cuenta el tipo de tren que pueda circular por la línea.

En efecto, si en una rampa determinada, se implantan curvas muy cerradas, la velocidad máxima admisible por las curvas es pequeña y puede ocurrir que los trenes, aunque tuvieran potencia para superar la rampa a una determinada velocidad, debieran que ir más despacio por el límite que impone el trazado. En sentido contrario, si se hace un esfuerzo económico importante para disponer de un trazado con pocas curvas, pero la pendiente es tan fuerte que un tren potente no puede mantener la velocidad máxima, entonces habrá sido inútil (al menos para ese tren) la rectificación del trazado.

Por ello, cuando haya que determinar los radios de una curva en una rampa se estudiará la velocidad que puede alcanzar un tren característico y se calculará el radio de las curvas en la subida para tal velocidad. (Debe tenerse en cuenta que también es bajada y que la velocidad aconsejada para la circulación de los trenes que bajan puede ser mayor).

Obsérvese que el valor de la rampa crítica r_c a la velocidad máxima para un tren determinado coincide con la *aceleración residual* de éste en horizontal, medida en cm/s^2 .

5.4.2 Dinámica del tren en pendientes

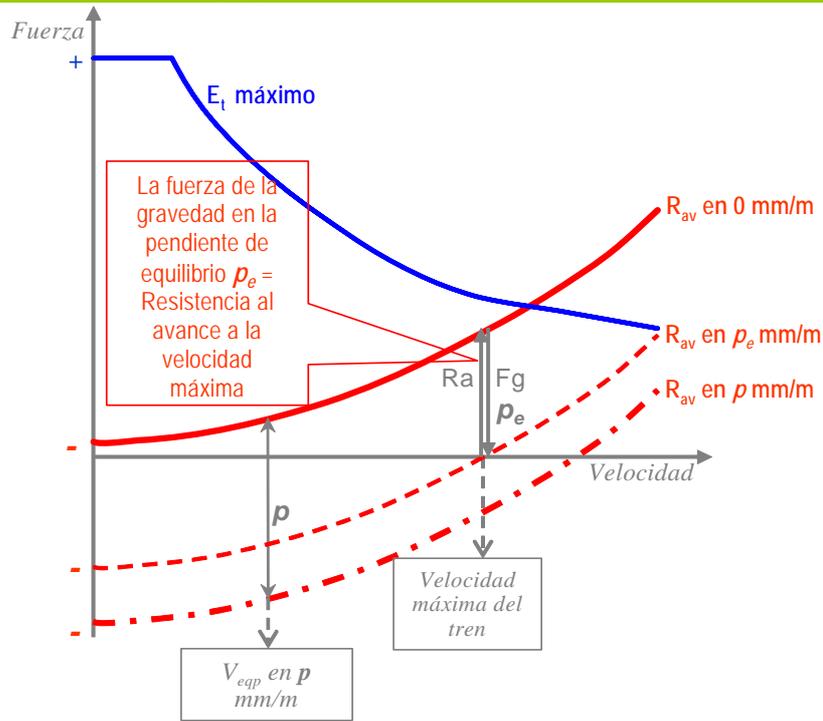
El análisis de la dinámica del tren en las pendientes (bajadas) muestra que actúan sobre el tren las siguientes fuerzas:

- A favor del movimiento del tren la fuerza de gravedad y la fuerza de tracción (moderada)
- En contra del movimiento del tren la resistencia al avance y la fuerza del freno (moderada, e incompatible con la fuerza de tracción).

Suponiendo, en principio, que no se hace uso de la tracción en la pendiente y que el tren circula a la velocidad máxima al entrar en ella, pueden presentarse tres casos:

- La fuerza gravitatoria (positiva) es de valor absoluto menor que la resistencia al avance (negativa). Entonces el tren tiende a frenarse y es preciso aplicar tracción para mantener la velocidad.
- La fuerza gravitatoria (positiva) es de valor mayor que la resistencia al avance (negativa). Entonces el tren tiende a acelerarse y es preciso aplicar el freno para que evitar que el tren rebase la velocidad máxima.
- La fuerza gravitatoria es de valor absoluto igual a la resistencia al avance. Entonces, sin aplicar ni la tracción ni el freno, el tren mantiene la velocidad máxima en la bajada.

Figura 31. Pendiente de equilibrio y velocidad de equilibrio en una bajada



Fuente: García Álvarez, 2007

Para la velocidad máxima del tren existe una pendiente de equilibrio p_e en la que la fuerza de la gravedad se iguala (en valor absoluto) a la fuerza resistente y el tren está en equilibrio.

Para cada rampa de valor r mm/m, existe una velocidad de equilibrio del tren.

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:

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

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

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

Y la *velocidad de equilibrio en pendiente* (V_{epq}) en una pendiente de valor p mm/m, es la que cumple que:

$$p = a + b \times V_{eq} + c \times T_f \times V_{eq}^2$$

5.4.3 Consideración conjunta de la pendiente y la rampa

En las líneas ferroviarias (siempre que son de vía única y casi siempre aunque sean de vía doble), la misma plataforma (y por ello con el mismo perfil) se emplea para circular en ambos sentidos, por lo que las rampas para los trenes que circulan en un sentido, se convierten en pendientes para los trenes que circulan en el contrario.

Ello sugiere la conveniencia de asumir que el valor de la rampa o pendiente es la misma, y como para la misma rampa o pendiente la velocidad de equilibrio en subida no es, normalmente igual a la velocidad de equilibrio en bajada, es conveniente analizar conjuntamente ambos efectos.

En la tabla se pueden ver para cuatro trenes representativos (un mercancías de tamaño medio-grande; un tren convencional de viajeros de 160 km/h; un tren Talgo Altaria con máquina de gran potencia, poco peso y 200 km/h; y un Talgo de Alta Velocidad); los valores más característicos para las rampas y pendientes. En concreto, se señalan la rampa y pendiente crítica para cada uno, así como las velocidades de equilibrio en diversas rampas, y en diversas pendientes.

Puede observarse que la *rampa crítica* depende de forma muy importante de la potencia del tren o, más exactamente, de la relación entre potencia y masa (es más elevada con cociente de potencia/masa alto) y también de la velocidad máxima (la rampa crítica es menor cuanto mayor es la velocidad); mientras que la *pendiente de equilibrio* no depende de la potencia del tren, ni de su masa de forma significativa, y está más relacionada con la forma y características aerodinámicas del tren y sobre todo con su velocidad máxima (a mayor velocidad máxima, mayor pendiente de equilibrio).

Los radios de curva necesarios para que un tren pueda aprovechar toda su potencia de tracción en la subida y no tenga que frenar en la bajada están condicionados por la siguiente regla aproximada: En las inclinaciones no muy fuertes (orientativamente menores de 17 mm/m), es más restrictivo el criterio de no aprovechar la tracción en la subida, es decir, es este criterio el que obliga a radios de curva más amplios; por el contrario, en tramos de fuerte inclinación (más de 17 mm/m) la condición más restrictiva para optimizar el trazado en planta es la de no frenar en la bajada, siendo ésta la condición que impone radios más amplios.

Tabla 5. Ejemplo de rampas críticas y pendientes de equilibrio de diversos trenes

Dinámica en pendiente y rampa de algunos trenes representativos

Datos del tren			Tren de mercancías	Tren clásico de viajeros	Tren Talgo Altaria	Talgo AVE serie 102
			Loc.250 +15 vagones	Loc. 269 + 7 coches	Loc 252 +12 remolq.	M-12R-M
Masa	<i>t</i>	1.320	360	287	357	
Potencia	<i>kW</i>	4.600	3.150	5.600	8.000	
Vel.máxima	<i>km/h</i>	110	160	200	330	
Dinámica en subida (rampa)	Rampa crítica	<i>mm/m</i>	2	12	24	5
	5 mm/m	<i>km/h</i>	97	199	282	332
	10 mm/m	<i>km/h</i>	79	170	259	305
	15 mm/m	<i>km/h</i>	64	145	237	278
	20 mm/m	<i>km/h</i>	53	124	216	253
	25 mm/m	<i>km/h</i>	44	106	196	230
Din. en bajada(pendiente)	30 mm/m	<i>km/h</i>	38	93	179	209
	Pendiente de equilibrio	<i>mm/m</i>	9,56	7,68	11,00	18,98
	5 mm/m	<i>km/h</i>	67	116	118	149
	10 mm/m	<i>km/h</i>	113	189	189	229
	15 mm/m	<i>km/h</i>	144	241	240	289
	20 mm/m	<i>km/h</i>	169	284	283	339
25 mm/m	<i>km/h</i>	191	321	322	383	
30 mm/m	<i>km/h</i>	211	355	356	434	

Fuente: García Álvarez, 2007

5.5. Freno

Los trenes emplean diferentes recursos (frenos) para provocar *esfuerzos de frenado* tendentes a disminuir la velocidad de circulación del tren. Los frenos empleados pueden estar basados en la adherencia entre rueda y carril (frenos dinámicos o frenos de fricción: zapatas o discos) o emplear otros fenómenos físicos, tales como los frenos por *corrientes de Foucault* o los frenos aerodinámicos.

Desde el punto de vista de la dinámica del tren interesa retener la idea de que el frenado de los trenes se clasifica, por la magnitud del esfuerzo, en dos formas:

Freno *de emergencia* es el que emplea el máximo esfuerzo de frenado, y sólo se utiliza en condiciones extraordinarias, ante la necesidad de frenar de forma urgente, normalmente por una incidencia. No se emplea regularmente, puesto que produce unas deceleraciones molestas para el viajero y un desgaste importante en el material rodante.

Freno *de servicio*, de menor esfuerzo, es el que se emplea de forma regular en la marcha ordinaria del tren.

Para cada una de las dos formas de frenado se fijan, como una propiedad o condición de explotación del material rodante, los valores máximos que deben conseguirse (expresados en la deceleración alcanzable en un determinado rango de velocidad). Estos esfuerzos máximos de frenado en cada una de las formas se obtienen por el tren con la combinación de los diversos tipos de freno (dinámico, neumático, de Foucault, etc.).

Sin rebasar los esfuerzos de frenado máximos en cada una de las dos formas, es habitual fijar para el tren, en cada línea por la que circula, una o varias *curvas de frenado (de emergencia o de servicio)* para reducir la velocidad del tren en coherencia con la señalización y la reglamentación existentes en la línea.

5.5.1 Condiciones de aplicación del freno

Según la ETI de Alta Velocidad (Material Rodante), la máxima deceleración media será siempre inferior a $2,5 \text{ m/s}^2$ (que es una interfaz con la resistencia longitudinal de la vía), y al máximo esfuerzo siguiente:

- 360 kN en frenado de emergencia,
- 180 kN para el frenado de servicio “a fondo” para ajustar la velocidad a los límites establecidos por el sistema de señalización,
- 100 kN para el frenado de servicio en rampas y pendientes acusadas o cuando los límites de velocidad se apliquen automáticamente.

Señala también que los frenos que no se basan en la adherencia rueda-carril pueden aplicarse desde la velocidad máxima de explotación hasta 50 km/h: ($V_{\text{max}} > V > 50 \text{ km/h}$),

Los requisitos del sistema de frenado (ETI Material Rodante) que pueden tener relación con la dinámica del tren son:

La aplicación del freno de emergencia, por la razón que sea, cortará automáticamente la alimentación eléctrica de tracción, sin posibilidad de recuperarla mientras permanezca aplicado el freno.

Sólo se admite tener en cuenta el freno eléctrico en las prestaciones de los frenos si su funcionamiento es independiente de la presencia de tensión en la catenaria, si las subestaciones lo permiten. Se admite el retorno de la energía eléctrica generada en el frenado, pero esto no hará que la tensión supere los límites de tensión previstos, y

además, si se pierde la alimentación de la catenaria, ello no impedirá que la tensión de la línea caiga a 0 V.

5.5.2 Prestaciones mínimas de los frenos

A los trenes se les exigen unas prestaciones mínimas de frenado de emergencia y de servicio que están recogidas en la tabla, para el caso de los trenes de alta velocidad:

Tabla 6. Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de Alta Velocidad						
		Tiempo eq. retardo	Deceler. entre 330 y 300 km/h	Deceler. entre 300 y 230 km/h	Deceler. entre 230 y 170 km/h	Deceler. entre 170 y 0 km/h
		s	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²
Emergencia	Caso A	3	0,85	0,90	1,05	1,20
Emergencia	Caso B	3	0,65	0,70	0,80	0,90
Servicio	Caso B	2	0,35	0,35	0,6	0,6
Distancias máximas de frenado con freno de emergencia						
		Tiempo eq. retardo	Dist. máxima de 330 a 0 km/h	Dist. máxima de 300 a 0 km/h	Dist. máxima de 250 a 0 km/h	Dist. máxima de 200 a 0 km/h
			m	m	m	m
Emergencia	Caso A	3	4.530	3.650	2.430	1.500
Emergencia	Caso B	3	5.840	4.690	3.130	1.940
Fuente: ETI de Material Rodante, 2003. Nota: Se denomina <i>Caso A</i> el tren en horizontal, con una climatología normal, con carga normal (80 kg por asiento) y un módulo de freno eléctrico aislado. Se considera <i>Caso B</i> , las circunstancias del caso anterior y, además, un distribuidor de freno aislado, una adherencia rueda carril reducida y el coeficiente de fricción entre la guarnición y el disco de freno reducido por la humedad.						

Para trenes a velocidades convencionales, una idea de las deceleraciones medias usadas puede conseguirse por observación de las empleadas en Renfe con el *freno de servicio*:

- Para velocidad máxima de 100 km/h, 0,47 m/s²;
- Para 120 km/h, 0,61 m/s²;
- Para 140 km/h, 0,77 m/s²; y
- Para 160 km/h, 0,74 m/s².

6. CONSUMO Y EMISIONES

Cualquier tren en su movimiento, va consumiendo energía pero además acumula o cede energía cinética o potencial, por lo que el consumo de energía total en un recorrido puede hacerse a través del balance de energía de un tren en un recorrido.

Energía que entra al tren = Energía que sale del tren + Pérdidas

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

Energía necesaria para vencer las resistencia al avance en recta y en curva

Energía perdida en el rendimiento de la cadena de tracción y auxiliares

Energía disipada en el freno

Energía consumida por los servicios auxiliares (incluyendo los tiempos de parada asociados al ciclo).

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

Determinación de la energía final (consumo en llantas y auxiliares)

La energía final es la suma de:

1. Energía empleada para vencer la resistencia al avance (E_{ra}). Ésta, a su vez, se compone de:

Resistencia mecánica, incluyendo las de las curvas

Resistencia a la entrada de aire en el tren

Resistencia aerodinámica al avance (presión y fricción)

2. Energía disipada o regenerada en el freno (E_{fr}). El uso del freno puede ser:

Para decelerar el tren (en una parada o en un punto de reducción de velocidad).

Para no rebasar la velocidad máxima en una pendiente muy pronunciada

En ambos casos, la energía disipada en el freno puede reducirse por la conducción económica, pero a costa de emplear en el recorrido un tiempo mayor que el mínimo imprescindible.

3. Energía empleada para alimentar los servicios auxiliares (medida a la entrada de los equipos consumidores):

Auxiliares técnicos (compresores, ventiladores de motores, etc.)

Auxiliares de confort en trenes de viajeros (climatización, iluminación, etc.)

Auxiliares en trenes de mercancías para el acondicionamiento de la carga (frigoríficos).

En virtud de todo lo expuesto, podría formularse la energía consumida para su movimiento en llantas por un tren que no tiene freno regenerativo, en el conjunto de su recorrido como:

$$E_{\text{mlantas}} = \left[\left(\left(a + \left(\sum \frac{600 \times l_c}{R_c} \times \frac{1}{L} \right) \right) \times M + B_\rho \times \bar{V} + C_\rho \times (\bar{V}^2 + \delta_v^2) \right) \times L \right. \\ \left. + \left(C_\rho \times \sum (T_f - 1) \times l_t \times V_t^2 \right) + \right. \\ \left. \left(M \times g \times (h_f - h_i) \right) + \left(M \times g \times \sum l_p \times (p - p_e) \right) + \right. \\ \left. \left(\frac{1}{2} \times (M + M_g) \times \sum (V_f^2 - V_i^2) \right) \times K_{der} \right]$$

Donde:

E_{mlantas} es la energía necesaria para el movimiento del tren medida en las llantas (no tiene en cuenta, por lo tanto, los rendimientos del vehículo motor ni las pérdidas dentro del mismo).

Características del material rodante empleado son las siguientes:

- a , B y C son constantes características de la fórmula de la resistencia al avance del material rodante (puede ser necesario ajustar estas constantes según las circunstancias, debiendo señalarse que B y C son especialmente sensibles a la densidad del aire y, por ello, a la temperatura y presión exterior).
- M es la masa del tren
- M_g es la masa equivalente de las partes giratorias del tren

Datos del trayecto, que son propios de la infraestructuras son los siguientes:

- L es la longitud del recorrido.
- Para cada curva a recorrer: l_c es la longitud de una curva y R_c su radio. Si se trata de una línea con radios no muy reducidos (mayores de 700-800 m) y el tramo es homogéneo en cuanto a curvas, puede sustituirse por un coeficiente que multiplique la longitud del tramo y que se obtiene como el sumatorio correspondiente a todo el tramo homogéneo.
- Para cada túnel a recorrer: T_f es el factor de túnel (depende de la sección el túnel y sección del tren, y oscila entre 1,2 y 2); l_t es la longitud de túnel; V_t es la velocidad a la que se puede circular por el túnel.
- h_f es la altitud al final del recorrido del tren y h_i es la altitud al comienzo del recorrido.
- l_p es la longitud de cada pendiente y p su inclinación

Parámetros de la marcha del tren son:

- \bar{V} es la velocidad media del tren en su movimiento (excluyendo los tiempos de parada).
- δ_v es la desviación típica de velocidades respecto a la media (excluyendo los tiempos de parada).
- K_{der} es un *coeficiente de marcha en deriva*, que depende de la forma de conducción. Puede estimarse, suponiendo una conducción razonable, como función de la diferencia de tiempo entre el tiempo mínimo empleado en el

trayecto y el realmente empleado (excluyendo en ambos casos los tiempos de parada).

En cuanto a los servicios auxiliares pueden dividirse en:

- Auxiliares comerciales de climatización: calefacción y aire acondicionado.
- Resto de servicios comerciales: iluminación, aseos, cafetería, etc.
- Auxiliares técnicos: ventiladores de equipos de tracción, compresores, cargadores de baterías, etc.
- La estimación de los consumos de climatización es compleja ya que varía considerablemente dependiendo de la época del año, incluso de la hora del día y de la localización geográfica. Además, no debe emplearse un método único de cálculo para estimar el consumo de cualquier tipo de servicio. Es recomendable diferenciar servicios que disponen de un elevado número de puertas que se abren con mucha frecuencia (tranvías, metros y trenes de cercanías) en los que la renovación del aire es mayor y por lo tanto resulta más complejo mantener la temperatura de consigna, de aquellos servicios en los que la entrada de aire del exterior por apertura de puertas no es tan relevante.
- Los fabricantes de material rodante facilitan las potencias instaladas para cada uno de los equipos de auxiliares y a partir de estas se puede hacer una estimación del consumo considerando el tiempo de viaje y el factor de simultaneidad. Este último concepto resulta fundamental por cuanto algunos equipos se encuentran redundados por razones de fiabilidad, lo que no significa que estén funcionando continuamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcol, A. (2004). *Resistencia al avance y aerodinámica de trenes*, UPCO, Apuntes Master de Sistemas Ferroviarios ICAI
- Alonso Mostaza, J.C. (2005): SIBI, sistema inteligente de basculación integral de CAF, en Paso a Nivel, Valencia.
- Arenillas Melendo, J. (1986): *La tracción en los ferrocarriles españoles. Evolución histórica y situación actual*. Col: Monografías ferroviarias 2. Ed.: Gire-Renfe, Madrid.
- Bernard, M. y Guiheu, M. (1976): Mesures récentes de la résistance a l'avancement de matériels roulants, en Revue Générale des Chemins de Fer, n° de abril de 1976, París.
- García Álvarez, A. (2003): Gestión de la energía en el ferrocarril, en Documentos de explotación técnica y económica del ferrocarril; 1ª edición, Madrid, noviembre de 2003.
- García Álvarez, A. (2007): *Dinámica de los trenes en alta velocidad*. Ed.: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid. [www.ffe.es].
- García Álvarez, A., Cillero Hernández, A., Ramos Melero, R., Puente Domínguez, F., Martín Cañizares. M.P (2008): *Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia energética de los trenes de viajeros*.
- Cillero Hernández, A., Bouzada Outeda, P., García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M^a del P. Monografía Enertrans 7 *Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión*.
- Glöckle, H. (1996): Características aerodinámicas de los túneles en el tráfico de alta velocidad, en ETR, num. 45.
- López Gómez, J.L. (2005): *AVE serie 102*, en Maquetren N° 150. Pág. 25-27
- López Gómez, J.L. (2006): Rendimientos de motores diésel
- López Gómez, J.L. (2008): Resistencia en curva
- López Pita, A. (1998a): *De la teoría a la práctica en la utilización de los vehículos de caja inclinable*, en Actas del III Congreso de Ingeniería del Transporte, Barcelona.
- López Pita, A. (1998b): Pendulación, basculación y construcción de infraestructuras ferroviarias: opciones alternativas y complementarias. Ed.: Ministerio de Fomento y Gestor de Infraestructuras Ferroviarias, Madrid.
- Lorenzo, J.C. (2005): Tracción distribuida en la alta velocidad europea: solución de futuro; en Maquetren N° 150, págs.6 a 8.
- Maestro, A. (2003): Proyecto suizo revolucionario en tracción vapor, en Líneas del tren, número 283, enero.
- Mathieu, G. (1977): La explotación de Tokaido Shinkansen. Principios y aplicaciones. Ed.: SNCF, Dirección de alta velocidad.
- Melis Maynar, M.M. y González Fernández, F.J. (2008): Ferrocarriles Metropolitanos: tranvías, metros ligeros y metros convencionales, 3ª edición. Ed.: CICCIP, Madrid.
- Ribera Sánchez, I. (2007a): *Trenes autopropulsados*. Apuntes Master de Sistemas Ferroviarios ICAI, 6ª edición (2007-2008). Sesión 5.05.
- Ribera Sánchez, I. (2007b): *Tecnologías especiales del material rodante ancho variable autopropulsados*. Apuntes Master de Sistemas Ferroviarios ICAI, 6ª edición (2007-2008). Sesión 5.06

Rochard, B. P.; Schimd, F. (2000): A review of methods to measure and calculate train resistances, en IMechE (Institution of Mechanical Engineers) Vol. 214 Part F, Seúl.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Conexiones mecánicas, neumáticas y eléctricas entre tres autopropulsados eléctricos de la serie 442 en Cotos.....	8
Figura 2. Proceso de inversión del sentido de la marcha de un automotor de única cabina.....	11
Figura 3. Tren unidireccional Talgo II invirtiendo su sentido en el triángulo de Aravaca	12
Figura 4. Talgo III con locomotora de cabina única	12
Figura 5. Maniobras en estaciones en “fondo de saco”	13
Figura 6. Material remolcado	14
Figura 7. Posición de la tracción en un tren.....	16
Figura 8. Tracción concentrada vs. Tracción distribuida	17
Figura 9. Comparación entre tracción concentrada y distribuida.....	18
Tabla 1. Indicadores de los efectos de tracción concentrada y distribuida en los trenes de alta velocidad	19
Figura 10. Ubicación de la tracción condicionada por la resistencia de los ganchos .	20
Figura 11. Tren articulado de bogies	21
Figura 12. Incidencia de la articulación en la longitud del coche.....	21
Tabla 2. Indicadores de los efectos de los coches articulados.....	23
Figura 13. Serie 450 de Renfe Cercanías, dos niveles.....	24
Figura 14. Tren Max E4 de dos niveles y caja ancha. El tren de alta velocidad de mayor capacidad del mundo	26
Tabla 3. Trenes de caja ancha vs. caja normal	26
Figura 15. Comparación del interior de trenes de dos pisos	27
Figura 16. Efectos en la velocidad media de la posibilidad de inclinación en las curvas	30
Figura 17. Unidades del Metro Ligero de Madrid.....	32
Figura 18. Unidades s8000 de Metro de Madrid	33
Figura 19. Tren Civia de Renfe Cercanías	33
Figura 20. Unidades de media distancia s/598 (diésel) y s/470 (eléctrico)	34
Figura 21. Tren autopropulsado de larga distancia, s/490 (Alaris)	34
Figura 22. Coches convencionales (s/9000) y coches Talgo (s6)	35
Figura 23. Trenes de alta velocidad	36
Figura 24. Interior de un compartimento de trenhotel	37
Figura 25. Esquema de la turbina de gas del Jetrain 2000	47
Figura 26. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica	49
Figura 27. Rendimiento de la cadena de tracción diésel	52
Figura 28. Resistencia longitudinal debida a la gravedad	61
Figura 29. Resistencia total al movimiento del Talgo 350 en diversos perfiles	62

Tabla 4. Resumen de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren	64
Figura 30. Rampa crítica y velocidad de equilibrio en una subida	65
Figura 31. Pendiente de equilibrio y velocidad de equilibrio en una bajada.....	66
Tabla 5. Ejemplo de rampas críticas y pendientes de equilibrio de diversos trenes..	68
Tabla 6. Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de Alta Velocidad	71

Documentos del Proyecto EnerTrans

Monografías EnerTrans

Monografía 1: "El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad": José Ignacio Pérez Arriaga, Eduardo Pilo de la Fuente, Ignacio de L. Hierro Ausín

Monografía 2: "Usos de la energía en el transporte": Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 3: "Modelos de consumos y emisiones: Estado del arte": Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro

Monografía 4: "Análisis de las estadísticas de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el transporte": Alberto Cillero, Paula Bouzada Outeda

Monografía 5: "Tablas input-output relacionadas con las estadísticas de consumos y emisiones en el transporte": Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 6: "Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte": Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 7: "Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión": Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 8: "Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte": José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo, Álvaro Gómez, Ángel Fernández.

Monografía 9: "Flujos de la energía de la electricidad para el transporte": Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio

Monografía 10: "Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras": Timoteo Martínez Aguado, M^a José Calderón Milán, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 11: "Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos": José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 12: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión": José María López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 13: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar": Alberto Cillero Hernández, Gustavo Martinelli, Paula Bouzada Outeda

Monografía 14: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión": Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Monografía 15: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco": Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Monografía 16: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril": Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 17: "Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería": Manuel Cegarra Plané

Monografía 18: "ENERTRANS: Modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte": Grupo de investigación del proyecto Enertrans

Notas técnicas EnerTrans

Nota técnica 1: "Introducción al transporte por tubería": Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 2: "Informe sobre el tráfico internacional y el consumo de carburante en el sector aeronáutico": Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 3: "Informe sobre el suministro de combustible en los aeropuertos en España": Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 4: "Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte aéreo": Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 5: "Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario": Alberto García Álvarez, Eduardo Fernández González

Nota técnica 6: "Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por tubería": Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 7: "Informe sobre el tráfico español y el consumo de carburante en el sector marítimo": Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 8: "Análisis de documentación referida al transporte marítimo": Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 9: "Aspectos generales del transporte marítimo": Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 10: "Características de la navegación marítima": Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 11: "Consumo de los servicios auxiliares en el automóvil": José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 12: "Notas sobre los valores del coeficiente de resistencia a la rodadura": José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 13: "Tipos de aeronaves según su compañía constructora": Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

El proyecto *EnerTrans*

El Proyecto de investigación *EnerTrans* tiene el objetivo de obtener un modelo ajustado para conocer el consumo de energía (y sus emisiones asociadas) del sistema español de transporte, en función de las variables relevantes de las que depende. Con él se pretende superar la necesidad de extrapolar series históricas y calculadas con metodologías diversas en el ámbito europeo para cada modo de transporte.

En el proyecto participaron entidades de naturaleza diversa y ligadas a distintos modos de transporte: la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, la Universidad Politécnica de Madrid-INSIA la Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, la Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, la Fundación Agustín de Betancourt y la Fundación Universidad de Oviedo.

En el proyecto se construyó un modelo que permite explicar y predecir el consumo de energía (y de las emisiones asociadas) en el sistema español de transporte, empleando una metodología coherente para todos los modos, considerando todos los usos de la energía (construcción, explotación mantenimiento, movimiento) y todo el ciclo de la energía desde su origen. Ello permite anticipar y evaluar los efectos de los resultados de política de infraestructura o de transporte. Como objetivo secundario, el trabajo permitire valorar el impacto de cualquier tipo de medida técnica u operativa tendente a reducir dicho consumo, lo que será útil a las empresas operadoras de transporte.

Incluye novedades como la toma en consideración de los diferentes recorridos entre los mismo puntos para cada uno de los diversos modos de transporte, o independizar el consumo de los coeficientes de ocupación o de uso del espacio.

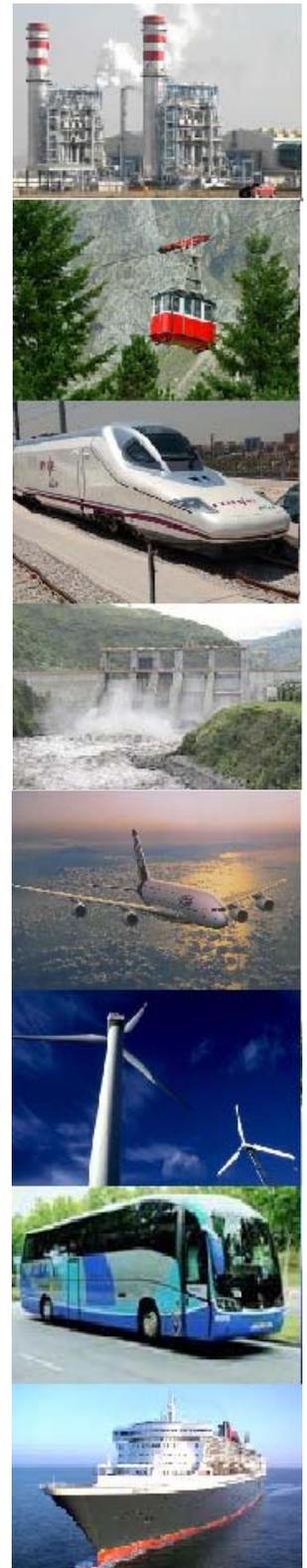
Los documentos publicados del proyecto *EnerTrans* son de tres tipos:

- Monografías, que recogen aspectos concretos y resultados del proyecto, organizados según el propio desarrollo del proyecto.
- Artículos, en castellano e inglés, que se corresponden con los mismos aspectos que las monografías, pero tratados de forma más breve y directa.
- Notas técnicas, que son informes parciales sobre una materia concreta (generalmente relacionada con un modo de transporte) y cuyo contenido es utilizado parcialmente en una o varias monografías. Se considera de interés su publicación para no perder en ninguna parte la información contenida en ella.

Monografías *EnerTrans* / 16

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril

Energy consumption and emissions associated with transportation by rail



CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS



Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(Ministerio de Fomento)

Número de proyecto PT-2006-006-01IASM.