Alberto García Álvarez

Efecto de la alta velocidad ferroviaria en el consumo de energía y en los costes operativos

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

2ª edición

Efecto de la alta velocidad ferroviaria en el consumo de energía y en los costes operativos

Alberto García Álvarez

El libro

Este libro está basado en la tesis doctoral "*Contribución al estudio del efecto de la alta velocidad en el consumo de energía y en los costes de explotación del ferrocarril*" realizada por Alberto García Álvarez bajo la dirección del doctor Andrés López Pita en el programa de doctorado en Ingeniería e Infraestructuras del transporte en la Universitat Politécnica de Catalunya.

La tesis fue leida el dia 13 de abril de 2012 en Barcelona y mereció la calificación de *Apto cum laude*.

El tribunal estaba presidido por el profesor Dr. José Vicente Colomer Ferrándiz (UPV); fue secretario el doctor José Rodrigo Miro Recasens (UPC); y fueron vocales los doctores Carles Casas Esplugas (UPC); Miguel-Domingo Rodríguez Bugarín (Universidad de A Coruña) y Ricardo Insa Franco (UPV).

El autor

Alberto García Álvarez es Doctor en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte (Universitat Politécnica de Catalunya, 2012); Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales (UAM, 2004); Ingeniero Superior Electromécanico del ICAI (ICAI, 1977); Licenciado en Derecho (UNED, 1988) y ha cursado el PADE (Programa de Alta Dirección de Empresas) del IESE (1993).

Actualmente (2015) es Director Gerente de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, donde hasta 2012 fue Director de Investigación, Formación y Colaboración Cientifica.

Entre 2012 y 2014 fue Director General de Renfe Viajeros, S.A. y Presidente del Consejo de Administración de Elypsos Internacional, S.A.

Desde 1999 hasta 2003 fue Director de Explotación del Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF).

Ingreso en Renfe en 1981 y fue sucesivamente, hasta 1999, Técnico en el Gabinete de Información y Relaciones Externas; Subdirector y Director de la 1ª Zona; Director Gerente de la Unidad de Negocio de Estaciones; Presidente de Sercolsa; Director General Adjunto de Área de Negocio II; Director de Explotación Alta Velocidad; y Director de Operaciones de AVE.

Ha publicado los siguientes libros: "La alta velocidad en España: Líneas y trenes (2009)" con Iñaki Barrón de Angoiti, Fernando Puente Domínguez, y Pilar Martín Cañizares; "Explotación económica y regulación del transporte de viajeros por ferrocarril" (2006); "Operación de Trenes de viajeros (Claves para la gestión avanzada del ferrocarril)" (1998) en coautoría con Alberto Cillero y Pilar Jericó; "La Velocidad en el Ferrocarril" (1986); "Diseño funcional y técnico de estaciones ferroviarias para viajeros (2002); "Dinámica de Trenes en alta velocidad" (ediciones desde 2003 hasta 2015); "La doble via y el sentido de circulación de los trenes por ella" (2007); y Cambio automático de ancho de via de los trenes en España (2009) (versiones en español e inglés)

La edición

Este libro ha sido editado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Primera edición: septiembre de 2015. Segunda edición: noviembre de 2015

Imprime: Tórculo, Comunicación Gráfica. Santiago de Compostela.

Diseño Cubierta: Belén Romeo. Foto portada interior: Gonzalo Rubio.

Depósito legal: M-16713-2015. ISBN: 978-84-943462-3-1

El concepto y alcance del estudio

El estudio pretende analizar el efecto del incremento de la velocidad del tren en el consumo de la energía y en las emisiones de productos contaminantes, así como en los costes de explotación del ferrocarril.

No se trata de analizar únicamente el efecto directo de la variación de la velocidad sobre los consumos y sobre los costes, sino también (en ambos campos) el efecto derivado de pasar del sistema ferroviario convencional al sistema de alta velocidad (en las dos versiones de éste que se definirán posteriormente).

Ello es relevante por cuanto al pasar de uno a otro sistema, además de un salto importante en la velocidad, cambian muchos otros parámetros muy influyentes (características de los trenes, radios de curva, pendientes, perfil de velocidades, señalización, etc.)

El análisis se realizará, por lo tanto, considerando el efecto conjunto de todos los elementos que componen el sistema de alta velocidad (en cada una de sus dos versiones) pero también se aislará el efecto del incremento de la velocidad (manteniendo todos los demás factores constantes). Para ello es necesario realizar unas reflexiones generales sobre la alta velocidad en el ferrocarril y sus aportaciones de valor.

Son múltiples los efectos técnicos y económicos que conllevan la variación de la velocidad y la transición del sistema ferroviario convencional al de alta velocidad. De todos ellos, aquí solo se abordarán dos efectos relacionados entre si y que tienen en común que han sido poco estudiados de forma sistemática: 1) el consumo de energía y las emisiones asociadas a la circulación de los trenes; y 2) los costes de explotación.

Dadas las características peculiares de cada una de las dos vertientes del estudio se les dota de una cierta autonomía metodológica, al incluir cada una su propio estado del arte (que se presenta al ir razonando sobre el análisis del problema y desarrollo del modelo), su desarrollo y modelado específico. Las partes comunes a los dos problemas se abordan en el capítulo conceptual sobre la alta velocidad y sus efectos económicos y sociales; y en el capítulo de aplicación a los casos-ejemplo, que se hace de forma conjunta. Se concluye con sendos capítulos de conclusiones e identificación de futuras líneas de investigación, y con la bibliografía.

En un anejo se incluye una terminología específica que ayudará al lector a familiarizarse con ciertas palabras o acrónimos que son empleados en el ambiente ferroviario en el que tienen un significado diferente del que reciben en otros ámbitos, o que, simplemente, no se emplean fuera del ferrocarril.

Agradecimientos y dedicatoria

El trabajo que ha supuesto la elaboración de esta tesis ha sido posible gracias la colaboración intelectual o material de muchas personas a las que quiero agradecerles su participación y dedicarles el resultado alcanzado.

- Quiero agradecer en primer lugar a mi padre, Alberto García Crespo, ingeniero y profesor "como los de antes". Todas sus enseñanzas y el ejemplo en su vida personal y profesional sin duda han sido decisivas para adquirir los conocimientos y para realizar los esfuerzos necesarios para la elaboración de este trabajo. Por ello, le dedico este libro con mi máximo reconocimiento.
- También a mi director de tesis, Andrés López Pita, maestro de todos cuantos nos dedicamos al estudio del ferrocarril. El agradecimiento se produce por dos razones: En primer lugar, por todas sus enseñanzas, compartidas generosamente a través de sus publicaciones e impregnadas de su mesura, reflexión, prudencia. En segundo lugar, específicamente, por su dedicación en la dirección de la tesis en la que ha aportado comprensión y estímulo, y me da dado libertad intelectual compatible con la necesaria orientación en los momentos en que fue necesaria.
- A mis compañeros en la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (singularmente de los Grupos de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte y de explotación económica en el transporte). En concreto, mi agradecimiento a Pilar Martín Cañizares, Ignacio González Franco, Luis Eduardo Mesa, Iván Palacio y Leticia García González que han tenido un grado de colaboración muy directa en la elaboración de los artículos y estudios en los que se apoya la tesis y en la propia tesis. También a Antonio Sánchez Plaza y a Fernando Sanz Abajo, Jefes del Tren-Maquinistas AVE por su colaboración proporcionando medidas, experiencias e ideas sobre el consumo de energía de los trenes de alta velocidad y sobre la forma de reducirlo. A Laura León González por su ayuda en la corrección de estilo.
- A todas las personas (muchísimas) con las que he tenido el privilegio de poder reflexionar y discutir sobre el transporte y el ferrocarril en mi vida profesional. Son muchos, pero por citar a algunos, mencionaré a Vicente Rallo Guinot, Francisco Minayo de la Cruz, Javier Fernández Arévalo, Iñaki Barrón de Angoiti, Segundo Vallejo, Antonio Berrios Villalba, Rodrigo Hilario, Ramón Azuara, Alfonso Abengózar, José Estrada Guijarro, Justo Arenillas Melendo, José Luis López Gómez, César López Sánchez, Juan Miguel Sastre, Luis Miguel Gascón y Lorenzo Jaro Arias.
- A todos quienes me han aportado datos, ideas, reflexiones para enriquecer el presente trabajo y los trabajos anteriores en los que éste se ha basado.

Alberto García Álvarez,

agosto de 2015

ÍNDICE

0.INTRODUCCIÓN 7

0.1. Planteamiento del problema y justificación de la investigación 9

0.2. Objetivos de la tesis 15

0.3. Metodología 16
0.1.1. Metodología material 16
0.3.1. Metodología formal 18

0.4. Medida e imputación de los consumos y costes 20
0.4.1. Consistencia de los indicadores 20
0.4.2. Homogeneización de indicadores 22
0.4.3. Unidades empleadas 29

0.5. Definiciones de la velocidad 31

1.CONCEPTOS GENERALES SOBRE ALTA VELOCIDAD Y SU BALANCE ECONÓMICO- SOCIAL .37

1.1. Definición de la alta velocidad en sus diversas categorías 38

1.2. La alta velocidad como sistema 41

1.3. Aportaciones de valor de la alta velocidad 45
1.3.1. Aportaciones al conjunto de la sociedad 47
1.3.2. El atractivo comercial de la alta velocidad 50
1.3.3. El aumento de viajeros y de las percepciones económicas 53
1.3.4. Trazados más cortos entre los mismos puntos 57

1.4. Evaluación cuantitativa de la aportación de valor del sistema de alta velocidad 61

2.RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL FERROCARRIL.....63

2.1. Transporte y energía 64
2.1.1. Efectos negativos del uso de la energía 65
2.1.2. Unidades a emplear en el estudio del consumo de energía en el transporte 72
2.1.3. Consumo y flujos de energía en el transporte 73
2.1.4. Cuantificación de las pérdidas emisiones según vectores energéticos 81
2.1.5. Rendimientos y pérdidas el vehículo ferroviario 86

2.2. Consumo de energía del ferrocarril 88
2.2.1. Antecedentes: ideas y estudios sobre el consumo de energía en el transporte por ferrocarril 88
2.2.2. Comparación empírica del consumo de energía del sistema ferroviario convencional con el de alta velocidad 94

2.3. Dinámica del tren 104
2.3.1. Resistencia al avance en recta 104
2.3.2. Resistencia adicional en curva 111
2.3.3. El efecto de la gravedad 114
2.3.4. Ecuación del movimiento del tren 115
2.3.5. Dinámica del tren en pendientes y rampas 117
2.3.6. El efecto del freno en la dinámica 122

2.4. Planteamiento del modelo para el análisis del efecto de la velocidad en el consumo de energía y emisiones del ferrocarril 124
2.4.1. Observaciones metodológicas 124
2.4.2. Formas de cálculo de la energía necesaria para el movimiento 127
2.4.3. Descripción del procedimiento de cálculo del consumo por el balance de energía 128
2.4.4. El modelo analítico de estimación del consumo 136

2.5. Análisis del efecto de la velocidad en el consumo de energía final por unidad de oferta 141
2.5.1. Energía empleada para vencer la resistencia mecánica al avance en recta 141
2.5.2. Energía empleada para vencer la resistencia mecánica adicional en las curvas 143

2.5.3. Energía empleada para vencer la resistencia a la entrada de aire 145
2.5.4. Energía empleada para vencer la resistencia aerodinámica 147
2.5.5. Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad 149
2.5.6. Energía potencial disipada en el freno en pendientes 152
2.5.7. Energía perdida en el vehículo 154
2.5.8. Energía consumida por los servicios auxiliares 155
2.5.9. Energía recuperada en el freno regenerativo 157
2.5.10. Resumen de la energía final necesaria para el movimiento del tren y para los servicios auxiliares 159
2.5.11. Variabilidad del consumo de energía en cada sistema 163

2.6. Análisis del efecto de la alta velocidad en el consumo de energía y emisiones por unidad de tráfico 169
2.6.1. Densidad de plazas 170
2.6.2. Aprovechamiento 171
2.6.3. Coeficiente de trayectoria 172
2.6.4. Pérdidas de energía en las redes eléctricas 173
2.6.5. Factor de emisiones de gases de efecto invernadero 175
2.6.6. Resultado global de los factores logísticos y externos 176
2.6.7. Resultados del consumo y emisiones por unidad de tráfico 177
2.6.8. Valores posibles de los diversos indicadores de energía y emisiones del tren de alta velocidad 180
2.6.9. Comparación de los resultados obtenidos con otros resultados publicados sobre consumo y emisiones 181

2.7. El efecto de la velocidad del ferrocarril en el consumo global de energía y emisiones en una ruta 187
2.7.1. La necesidad de realización del análisis global del consumo de energía y de las emisiones en una ruta 187
2.7.2. Comparación del consumo y las emisiones según modos de transporte 190
2.7.3. Efecto en la cuota de mercado y en la demanda inducida de la introducción de la alta velocidad en una ruta 198
2.7.4. Incidencia de la velocidad del tren en la evitación de emisiones 205

3.RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LOS COSTES DE EXPLOTACIÓN EN EL FERROCARRIL211

3.1. Introducción a los costes de explotación 212
3.1.1. Utilidad del estudio de los costes en el transporte de viajeros 213
3.1.2. Antecedentes de estudios sobre la relación entre velocidad y costes de explotación 214
3.1.3. Los costes totales del transporte 216
3.1.4. La tarifación en el transporte 220
3.1.5. Unidades a emplear en el estudio de los costes de explotación del transporte 225
3.1.6. Delimitación y clasificación de los costes operativos y de los costes de explotación 226

3.2. La función de costes de explotación en el transporte de viajeros por ferrocarril 231
3.2.1. Componentes y características de la función de costes de explotación 231
3.2.2. Consideraciones previas: coste de adquisición del tren y su producción anual 232

3.3. Análisis de la relación con la velocidad de cada uno de los costes de explotación 242
3.3.1. Costes relacionados con la posesión o tenencia del tren 242
3.3.2. Costes de mantenimiento y limpieza 248
3.3.3. Costes de la energía de tracción 255
3.3.4. Costes del personal operativo 260
3.3.5. Coste marginal del uso de la infraestructura 264
3.3.6. Costes totales de explotación 270

3.4. Costes operativos no incluidos en el coste de explotación 274
3.4.1. Costes comerciales 274
3.4.2. Costes generales 276
3.4.3. Relación entre los costes comerciales y generales y los costes de explotación 277
3.4.4. Coste del uso de infraestructura por encima del coste marginal 278
3.4.5. Comparación del orden de magnitud de los costes de explotación con el total de los costes operativos 282

4.APLICACIÓN A LOS CASOS-EJEMPLO 285

4.1. Definición de los escenarios y metodología de la aplicación 287
4.1.1. Definición de escenarios 287
4.1.2. Metodología 288
4.1.3. Datos de la infraestructura empleados en las comparaciones 289
4.1.4. Datos de los trenes empleados en los análisis 296

4.2. Casos de comparación de diferentes sistemas 298
4.2.1. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros 298
4.2.2. Consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías 301
4.2.3. Costes de explotación de los trenes de viajeros 303
4.2.4. Costes de explotación de los trenes de mercancías 305

4.3. Casos de comparación de diferentes trazados 306
4.3.1. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en los trazados comparados 306
4.3.2. Consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías en los trazados singulares comparados 308
4.3.3. Costes de explotación de los trenes de viajeros en los trazados comparados 310
4.3.4. Costes de explotación de los trenes de mercancías en los trazados singulares comparados 312

5.CONCLUSIONES 313

6.FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 321

7.BIBLIOGRAFÍA 325

8. ANEJOS 333

Anejo 1. Índices de tablas y de figuras 335
Índice de tablas 335
Índice de figuras 340
Anejo 2. Abreviaturas y terminología 344

0. INTRODUCCIÓN

0.1. Planteamiento del problema y justificación de la investigación

En numerosos países del mundo, y en España en particular, se realizan importantes inversiones para la construcción de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad en las que los trenes circulan regularmente por encima de los 250 kilómetros por hora.

La financiación de las líneas de alta velocidad.- Estas líneas reciben en muchos casos ayudas públicas para su construcción, y los excedentes económicos de la explotación del servicio (entendiendo por tales los ingresos menos costes totales de explotación) permiten, en general, cubrir todos los costes de mantenimiento y el resto de los costes corrientes de la infraestructura; pero en ocasiones solo es posible recuperar una parte de la inversión y de los costes financieros asociados.

Estas inversiones públicas no recuperadas se justifican en parte por la mejora del bienestar que produce el funcionamiento de la línea, por la contribución al desarrollo territorial, y por otras ventajas que inducen las líneas de alta velocidad (que serán analizadas en detalle más adelante). Pero ello por si mismo no sería suficiente para justificar la inversión. Las líneas de alta velocidad producen además efectos diferenciales externos (generalmente positivos) sobre el conjunto del sistema de transporte que se pueden concretar en ahorros de tiempo, de costes de operación, reducción de accidentes, minoración del consumo de energía y de las emisiones, del ruido, etc.

Los procesos de evaluación de inversiones.- Para tomar la decisión de construir las líneas se recurre a los procesos llamados de "evaluación de inversiones" que consisten normalmente en realizar un balance financiero y un balance económico-social comparando la situación de referencia o tendencial (cómo evolucionarían dichos balances a lo largo de los años si no se construyese la infraestructura) con la situación que se presentaría con la infraestructura construida. Para ello no solo se precisa conocer el tráfico y los precios, sino también los costes de todo tipo y los efectos externos que se producirán.

Cuando los parámetros de diseño de una nueva línea (entre ellos, las velocidades) reproducen los valores aplicados anteriormente en otras líneas es posible prever los efectos económicos (en los ingresos y en los costes), sociales y medioambientales que va a tener la construcción y en la posterior explotación de la nueva línea. Pero la relación de la velocidad con los ingresos y con los recursos necesarios para el servicio (entre ellos, la energía) no es lineal, por lo que se plantea un problema cuando se trata de extrapolar las experiencias del pasado hacia entornos con parámetros no aplicados anteriormente (por ejemplo, con velocidades significativamente más altas).

Estimación de la demanda.- Sobre los efectos de la velocidad y del tiempo de viaje en la demanda (y en los ingresos de explotación) es muy abundante la literatura existente, y por ello es una cuestión bien estudiada y conocida -véase como texto más representativo (Ortúzar & Willumsen, 2008). Es posible aplicar técnicas de análisis de la demanda que permiten prever con razonable precisión el número de viajeros en función del precio que se les pide, de la frecuencia, y de la oferta de otros modos en competencia.

Hipótesis de precios.- Los precios que se van a aplicar por el operador de servicios de transporte se basan en hipótesis (generalmente deducidas de las políticas de precios aplicadas anteriormente), y el precio medio así definido es el que alimenta los modelos. Es preciso advertir sobre dos problemas que ello plantea:

- La demanda depende del precio ofertado a cada viajero individualmente, y en un escenario de discriminación del precios (como el vigente en la aviación y como al que se tiende en el ferrocarril), el precio aplicado a cada viajero dista mucho del precio medio.
- La futura apertura a la competencia del sector del transporte de viajeros por ferrocarril hará aparecer nuevos actores y nuevos escenarios de competencia que probablemente hagan que las políticas de precios aplicadas en el pasado no puedan extrapolarse hacia el futuro.

Desde luego, la aplicación de políticas flexibles de precios basadas en las técnicas de la gestión del rendimiento ("*yield management*") y las ofertas de muy bajo precio (como las que se aplican en el segmento "*low cost*" de la aviación) serán una exigencia de la competencia intermodal en el corto plazo; pero aún cuando la experiencia y literatura son muy escasas en esta materia (están prácticamente limitadas al entorno francés), podrá sin duda ser de utilidad la abundante literatura existente en el ámbito de la aviación y de otros sectores de servicios.

Costes de mantenimiento y corrientes de la infraestructura.- Por lo que se refiere a los costes de mantenimiento de la infraestructura (y en general a todos los costes corrientes de la misma) son numerosos los estudios que permiten conocer con cierta precisión tales costes, e incluso extrapolarlos hacia velocidades desconocidas. Véase, por ejemplo,(Bente, Kindler, & Wittmeier, 2008) o (UIC, 2009). Los largos y fructíferos debates doctrinales sobre la estructura y la cuantía del canon por el uso de las infraestructuras han ayudado a conocer con cierto detalle este tema, sobre todo desde que el concepto de "coste marginal por el uso de la infraestructura" ha pasado a tener relevancia jurídica y económica, pues es el límite inferior del que no debe bajar el canon para un tren concreto por el uso de la infraestructura.

Los costes de explotación.- En lo que se refiere a los costes de la operación (o de explotación) del servicio existen pocos estudios. Por ello, cuando es necesario, se emplean valores medios obtenidos de la experiencia el funcionamiento de otros servicios preexistentes. Es el caso, por ejemplo, de los datos empleados en el "Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril" (Ministerio de Fomento, 2008).

La utilización de valores medios obtenidos empíricamente puede ser adecuada para el análisis de los resultados económicos y sociales de una infraestructura cuyas características están predefinidas (generalmente tomando como referencia casos anteriores) y con unos servicios análogos a los ya existentes. Sin embargo, como puede comprenderse fácilmente, no son adecuados para el estudio de situaciones nuevas o alternativas, tanto en lo que se refiere a diferentes características de la infraestructura como en lo relativo a la programación de los servicios de transporte que se prestan sobre ella o a la fijación de sus precios y características comerciales.

La necesidad de prever los resultados de las actuaciones en infraestructura.- La posibilidad de efectuar previsiones de resultados cuando se aplican parámetros diferentes de los empleados anteriormente siempre es útil, pero resulta de especial importancia en una etapa (como la que parece que comienza en la segunda década del siglo XXI) en la que se presentan tres circunstancias que la hacen diferente del ciclo constructivo anterior:

- por una parte, ya se han construido en Europa (y en España) las principales líneas troncales de la red de alta velocidad, por lo que las nuevas líneas a construir cumplen una función diferente en la red, lo cual sugiere que pudieran tener características distintas;
- la crisis económica impone la necesidad de optimizar los recursos públicos, destinándolos a aquellas inversiones con un mayor retorno económico- social, optimizando su alcance y consistencia para maximizar el citado retorno de forma compatible con la restricción que impone la disponibilidad presupuestaria;
- la construcción de nuevas líneas de alta velocidad se extiende hacia países en desarrollo, con entornos tecnológicos y económicos muy diferentes de los vigentes en los países es los que se ha implantado la alta velocidad en las últimas décadas del siglo XX.

Otros cambios previsibles en el entorno.- Por otra parte, la creciente presión competitiva de la aviación, debida a la aparición, consolidación y expansión de las llamadas compañías "low cost", que no solo compiten con las aerolíneas tradicionales, sino también con el ferrocarril de alta velocidad –véase (Casas Esplugas, 2008)- , hace que sea previsible que en el ámbito ferroviario se replique este modelo operativo (probablemente de forma no excluyente con la actividad de los operadores tradicionales).

Por otra parte, la apertura a la competencia del mercado del transporte de viajeros de larga distancia por ferrocarril (ya sea con fórmulas de "competencia en el mercado" o de "competencia por el mercado" o mixtas entre ambas) hace prever que aparecerán nuevas arquitecturas y tamaños de trenes; tecnologías diferentes, nuevos productos comerciales; y, en fin, innovadoras formas de operación para las que resultan de dudosa aplicabilidad los costes medios obtenidos del pasado y con trenes diferentes. (Véase al respecto la interesante reflexión contenida en (Fröidh, 2008)).

La importancia específica del consumo de energía.- En lo que se refiere al consumo de energía y a las emisiones asociadas, la problemática es la misma: los valores medios obtenidos de entornos de explotación pasados (generalmente muy similares entre si) no pueden extrapolarse sin un conocimiento de la "función de consumo" aplicable en cada caso hacia otros entornos operativos.

Además, el consumo de energía del ferrocarril presenta una gran variabilidad debida a la variedad de tipos de vehículo, de infraestructura y de servicios. Ello hace difícilmente trasladable a otros casos los resultados obtenidos en el entorno referencia.

El consumo de energía no solo tiene implicaciones en el balance financiero, sino que añade otros componentes importantes en el balance económico-social. En este contexto, el conocimiento detallado del consumo de energía, y de las emisiones asociadas a este consumo, tiene una doble importancia en el análisis de rentabilidad económico-social de las infraestructuras:

- por una parte, la energía tiene un valor económico que se incluye como un coste más en la cuenta de resultados del operador y que, por lo tanto, forma parte de los costes de explotación;
- por otra, las emisiones producidas (singularmente de dióxido de carbono, pero también de otros agentes que producen contaminación local) forman igualmente parte (importante) de las externalidades de los diversos modos de transporte, por lo que resulta fundamental su conocimiento diferenciado.

La necesidad del conocimiento del consumo de energía y de los costes de explotación.- En previsión de que se puedan tener que realizar en el futuro análisis de rentabilidad económico-social de líneas ferroviarias de nueva construcción con parámetros, velocidades o entornos operativos o tecnológicos diferentes de los conocidos, puede ser necesario disponer de información acerca de las funciones de consumo de energía y de emisiones y de costes de explotación, expresadas en relación con diversas variables y, singularmente, con la velocidad.

También es posible (e incluso probable), que se desee aplicar sobre las líneas existentes nuevas formas de operación y políticas de precios en un mercado abierto a la competencia, con aparición de nuevas y diferentes tipologías de trenes que pudieran llevar a una estructura de costes económico-sociales diferente de la anterior. Esta estructura no se puede conocer, generalmente, con la aplicación de los valores medios. En estos casos vuelve a tener importancia el conocimiento de las funciones de consumos y de costes, y la posibilidad de disponer de los modelos analíticos correspondientes.

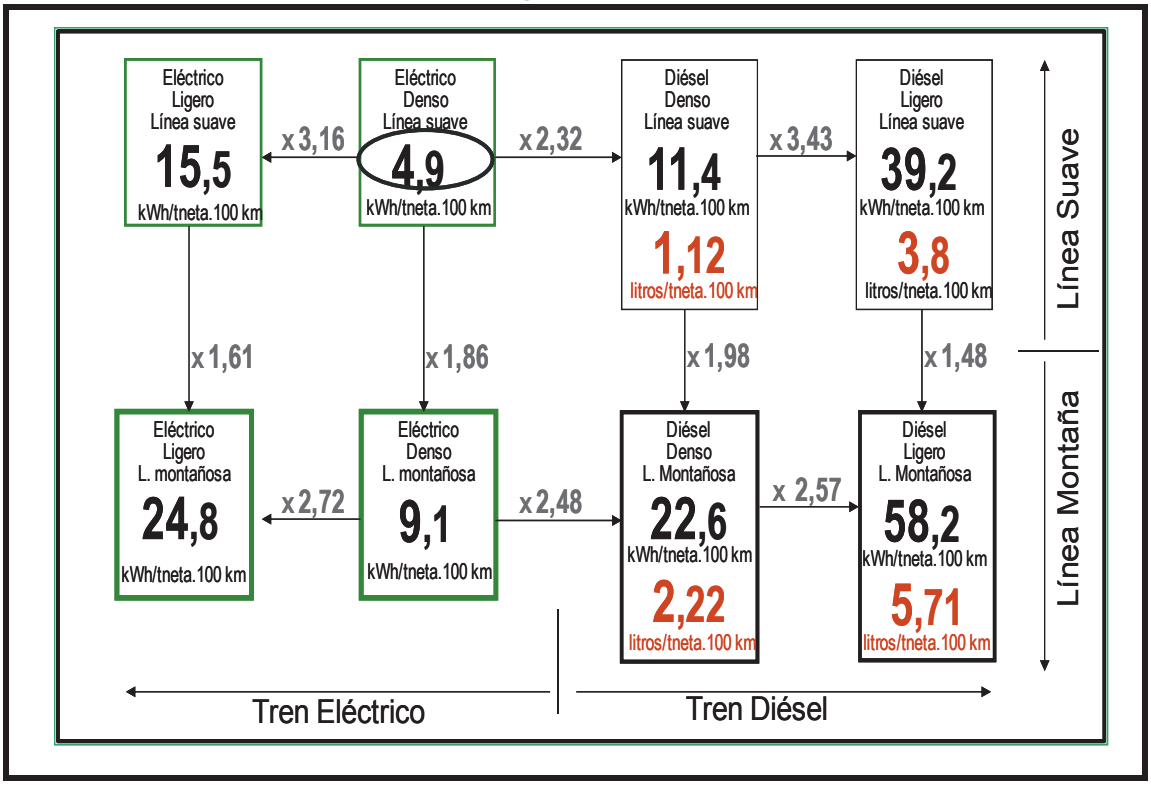
➢ La variabilidad del consumo de energía y de los costes del ferrocarril

Los estudios existentes sobre el consumo de energía y sobre los costes de explotación del ferrocarril muestran una gran dispersión de resultados que, cuando el estudio tiene por objeto la comparación con otros modos de transporte, se traduce en una posición competitiva muy diversa.

La razón de esta dispersión hay que buscarla en el hecho de que (a diferencia de otros modos de transporte) en el ferrocarril es muy grande del rango de tamaños de los vehículos, de densidades de plazas, de factores de aprovechamiento, etc. Además, el tren emplea en muchas ocasiones tracción eléctrica con características muy diferentes de la diésel, y en algunos casos tiene freno regenerativo con diferentes grados de aprovechamiento. En cada país y en cada año el factor de emisiones de dióxido de carbono en la generación de electricidad es muy diverso. Todo ello hace que las diferencias de unos trenes a otros sean enormes. Por ello, para las comparaciones no es suficiente (aunque sí necesario) realizar una tarea de homogeneización, sino que es preciso emplear el tipo de tren, de infraestructura y de servicio procedente en cada caso. Por supuesto, ello puede llevar a resultados diferentes en cada comparación realizada.

En el caso del transporte de mercancías, con la misma carga neta, pueden apreciarse diferencias de consumo de casi 12 veces (4,9 a 58,2), solo variando el tipo de mercancía, el perfil de la línea y el tipo de tracción, como se explica en (González Franco & García Álvarez, 2011) y se muestra en la tabla 1. Si además se tuvieran en cuenta la economías de tamaño y el hecho de que la carga de los trenes de mercancías (y por ello su tamaño) tiene un rango de variación muy amplio, las diferencias de consumo por unidad transportada se amplificarían aún más.

Tabla 1. Variabilidad del consumo de energía del ferrocarril de mercancías



Características de los trenes empleados: ◆ Tren ligero, Portaautomóviles de 300 toneladas netas y 1.090 toneladas brutas; ◆ Tren denso: petroquímico, de 300 toneladas netas y de 562 toneladas brutas.

Observaciones metodológicas: ◆ El consumo de energía tracción eléctrica está medido a la salida de la central generadora; y el consumo de energía en tracción diésel está medido en la boca del depósito de la locomotora. ◆ En todos los casos, se incluye la parte proporcional de los consumos de los trenes vacíos.

Fuente:(González Franco & García Álvarez, 2011)

Igual ocurre cuando se compara el ferrocarril convencional con el de alta velocidad. Mientras que los trenes de alta velocidad son (relativamente) más homogéneos, existe una gran diferencia entre los trenes convencionales de unos países a otros: en unos casos son trenes remolcados y en otros autopropulsados; pueden ser grandes o pequeños; alimentados con tracción diésel, con corriente continua o con alterna; pueden, en fin, utilizar infraestructuras muy diferentes y con esquemas de servicios diversos. Ello también explica la dispersión de los resultados que se puede encontrar en estas comparaciones "intramodales".

En la presente tesis la comparación se realizará en el entorno español, donde el ferrocarril convencional está caracterizado por emplear vehículos autopropulsados, con un tamaño pequeño del tren, con un aprovechamiento medio-alto, con alimentación de los trenes eléctricos convencionales en corriente continua, poca presencia del freno regenerativo y un bajo factor de regeneración por la reducida densidad de tráfico.

Las concretas características del sistema ferroviario español de alta velocidad y convencional conducen a unos resultados que no siempre serán extrapolables a otros entornos, pero debe destacarse que el objeto de esta tesis no es tanto obtener resultados concretos, como definir una metodología adecuada y poner de relieve las razones de la diferencias que se puedan observar en uno u otro sentido.

En la tabla 2 se recogen, con las necesarias generalizaciones, algunas de las diferencias entre modos de transporte que ilustran lo expuesto con respecto a la variabilidad relativa de los resultados del ferrocarril.

Tabla 2. **Variabilidad de la características del ferrocarril en comparación con otros modos de transporte interurbano**

	Coche	Autobús	Avión	Ferrocarril convencional	Ferrocarril de alta velocidad
Tamaño (plazas)	4 a 7	35 a 55	50 a 600	50 a 1.200	200 a 1.600
Densidad (plazas/m^2)	1,1 a 1,7	1,5 a 2,1	1,1 a 1,5	0,85 a 0,93	0,75 a 1,58
Velocidad máxima (km/h)	120	100	800 a 900	110 a 160	200 a 350
Pisos (nº)	1	1	1 o 2	1 o 2	1 o 2
Vectores energéticos	Gasóleo o gasolina	Gasóleo	Queroseno	Gasóleo o elec. (DC o AC)	Electricidad AC
Nº de tipos de arquitecturas (1)	1	2	2	4	3
Nº motores	1	1	2 a 4	1 a 8	4 a 16
Factor emisiones ($gCO_2/kWh_{útil}$)	750 a 850	700 a 800	900 a 1.100	7 a 550	6 a 550
Freno regenerativo	No	No	No	Si o No	Sí

(1) Se entiende por "arquitectura" una concreta opción técnica de diseño y configuración del tren con independencia de su tamaño. Por ejemplo, las opciones que combinadas determinan una arquitectura son la tracción concentrada o distribuida; tener uno o dos pisos; caja ancha o normal; articulación o no entre vehículos; etc. Véase para más detalle (García Álvarez, Cillero Hernández, Martín Cañizares, M. del P., Puente Domíguez, & Ramos Melero, 2008)

Fuente: Elaboración propia

0.2. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de la tesis es producir una reflexión que se concrete en unos modelos analíticos que sirvan de ayuda en la toma de decisiones relativas a la construcción de líneas de alta velocidad (o la modernización de las que ya están operativas) y, sobre todo, a la explotación de las líneas de alta velocidad existentes. También debe permitir el análisis de las características de la infraestructura y de los servicios para optimizar sus resultados.

En concreto, este objetivo principal se puede aplicar en tres campos:

Ayuda en la toma de decisiones de diseño y evaluación de la infraestructura.- Entre los resultados que se derivan de la construcción y posterior explotación de una línea ferroviaria de alta velocidad (como de cualquier otra infraestructura de transporte), los costes ambientales y los costes de explotación tienen un peso fundamental, por lo que su conocimiento resulta de la mayor importancia para adoptar las decisiones más adecuadas en materia de inversión en infraestructura, tanto en lo que se refiere a la decisión de construir o no construir una nueva infraestructura, como en lo relativo a los criterios de diseño que deberían aplicarse en caso de que decida construirse, ampliarse o reformarse.

Ayuda en el diseño de los servicios de transporte.- También se plantea como objetivo ayudar al diseño de la oferta de transporte sobre la infraestructura (características de los trenes, frecuencias, estructura de paradas, horarios, formas de conducción,…) con la doble finalidad de hacerlos coherentes con las características de la infraestructura para su mejor aprovechamiento, y simultáneamente optimizarlas para mejorar los resultados económico-sociales. La política de precios (que requiere conocer los costes marginales, así como los costes medios) también se verá beneficiada por el conocimiento detallado de las funciones de costes.

Ayuda en estudios de otro tipo relativos al sistema de transporte.- Otro objetivo, que puede considerarse "colateral" (pero no por ello de menor interés), es el ofrecer las funciones de costes y de consumos que pueden ser útiles en la realización de numerosos tipos de estudios, tanto de planificación como de programación, análisis y de reingeniería de procesos.

0.3. Metodología

Para la consecución de los objetivos generales y concretos de la tesis, es preciso emplear una determinada metodología material que permita plantear los problemas y una determinada forma de conceptualizarlos y resolverlos. Ésta se concreta en una metodología formal que ordena la tesis, clasifica sus contenidos y los interrelaciona.

0.1.1. Metodología material

A fin de lograr el objetivo propuesto, se realizará un análisis de la cuestión en todos los aspectos relacionados con el ámbito de la tesis. Se estima conveniente definir y caracterizar los sistemas de alta velocidad, y sus efectos técnicos, económicos y sociales, así como analizar las consecuencias de todo tipo que se producen al incrementar la velocidad de los trenes en diversos entornos operativos.

Será necesario también traer a colación algunos conceptos básicos sobre la explotación ferroviaria (singularmente con las características propias de la alta velocidad) y definir claramente los conceptos de mayor importancia, por cuanto con frecuencia se emplean términos equívocos, cuando no inapropiados.

Es preciso llamar la atención sobre el hecho de que la función de consumo de energía (y emisiones) y así como la de costes de explotación, incluyen muchas variables, y por ello es preciso formular (en la fase de explotación del modelo de analítico) ciertas hipótesis sobre todas aquellas variables inductoras que no sean la propia velocidad (en sus diversas acepciones), lo que arrojará una "función de consumo" dependiente exclusivamente de la velocidad y de las características del sistema ferroviario. Desde luego, las funciones de consumos y de costes de explotación pueden expresarse en dependencia de varias variables. Entre ellas, algunas muy relevantes son el tamaño y la arquitectura del tren; pero también lo son la distancia de la ruta recorrida, los tiempos de rotación, el perfil de velocidades, o la distancia entre paradas; y todo ello para las características de cada uno de los sistemas ferroviarios.

➢ Los modelos analíticos

Para reflejar las funciones de consumos (y emisiones) y de costes de explotación es necesario construir sendos modelos analíticos que permitan analizar los efectos en el consumo de energía y en los costes de explotación de las variaciones de la velocidad del tren; y ello con diversas características de la infraestructura, de los vehículos y del servicio, de forma que se pueda disponer (además de la información relevante sobre los costes de la explotación obtenida de los modelos incluidos en la propia tesis y de su aplicación a los casos-ejemplo) de una herramienta que pudiera ayudar en la toma de decisiones en otros casos semejantes.

Los modelos deben permitir adoptar otras hipótesis diferentes a las de referencia, y ensayar la sensibilidad a la variación de cada una de ellas. Además, los modelos deben estar construidos por agregación de sumandos, de forma que permitan analizar de forma separada la contribución al conusmo o al coste de cada uno de los hechos que inciden en ellos.

➢ Enfoque de los modelos

Los modelos de las funciones de consumo/emisiones y de costes de explotación pueden agruparse en dos grandes categorías:

- Los modelos "top-down" (de arriba a abajo), también llamados "econométricos" o "de reparto";
- Los modelos "bottom-up" (de abajo arriba), que también se designan en ocasiones como "ingenieriles" o "de agregación".

Los modelos necesarios para el presente trabajo se desarrollarán con un enfoque "bottom-up"; es decir, se partirá de los procesos físicos asociados al movimiento de los vehículos y a la configuración de la oferta para deducir a partir de ellos los consumos y emisiones, así como los costes de explotación.

Se ha preferido esta metodología a la alternativa "top-down" que tomaría como referencia los consumos los costes producidos en la realidad y los "repartiría" entre las unidades de transporte realizadas.

Se entiende -véase para más detalle (García Álvarez, 2010e) que el enfoque propuesto del tipo "bottom-up" es más adecuado para la ayuda a la toma de decisiones con efectos en el futuro, y que este enfoque además es necesario para que el modelo tenga las propiedades deseadas para el tipo de análisis al que se va a aplicar (el modelo debe ser multipropósito, acumulativo, identificador de los inductores reales, etc.) Desde luego, los modelos "bottom-up" precisan de un ajuste para reflejar la realidad, pero a cambio tienen la ventaja de que permiten comprender las razones últimas del consumo y del coste; y por ello, identificar mejor los inductores y priorizar las acciones para la reducción del consumo y emisiones y del coste de explotación en cada uno de los escenarios estudiados. También son más útiles para identificar el efecto de la velocidad en unos y otros casos.

Por el contrario, los enfoques de reparto ("top-down") son más adecuados para el análisis estadístico y para las predicciones de ámbito macroeconómico, pero únicamente son útiles en ausencia de cambios tecnológicos o de acciones de mejora o de estrategias alternativas. El enfoque propuesto se encuadra en lo que (Hidalgo González, 2005) llama "modelos ingenieriles", sobre los que señala que (aplicados a la energía) "permiten una mayor desagregación por regiones y por fuentes de energía de la que es posible con otros tipos [de modelos]".

En (van Essen, Bello, Dings, & van den Brink, 2003), uno de los pocos trabajos que emplean el enfoque "bottom-up", se sugiere una limitación relevante de este enfoque para el caso del ferrocarril: no reflejaría adecuadamente los consumos debidos a maniobras, movimientos en vacío, etc., que sí que son recogidos por los modelos econométricos "top-down". Ciertamente puede ocurrir que los modelos "bottom-up", si no se calibran adecuadamente, tengan alguna carencia para reflejar estos consumos "parásitos" o indirectos (que solo son relevantes cuando el tren es de material convencional, pero no suelen serlo en explotaciones en las que predominan los trenes autopropulsados, como es la explotación española en el ámbito del transporte de viajeros). Sin embargo, dadas las ventajas de los modelos "bottom-up", preferimos emplearlos, ya que cuando los movimientos en vacío o maniobras sean relevantes se pueden aplicar los coeficientes correspondientes para recoger sus efectos. En el ferrocarril, estos movimientos son importantes en el caso de las mercancías, pero su cuantificación es sencilla; mientras que en caso de los trenes de viajeros, cuando son de material autopropulsado, el porcentaje de recorridos en vacío suele ser pequeño (en torno al 2 por ciento).

0.3.1. Metodología formal

De acuerdo con lo indicado, la ordenación de los contenidos en el esquema de la tesis recoge las diferencias existentes entre la problemática del consumo de energía y emisiones por un lado, y de los costes de explotación por otro. Ambos tienen fuerte incidencia en el resultado económico y social de la línea, pero su problemática es independiente, lo que sugiere un tratamiento autónomo, pero paralelo, de cada uno de estos dos temas en la tesis.

Contenidos de la tesis.- Comienza la tesis con el presente capítulo introductorio que incluye el planteamiento del problema, el objetivo y justificación de la tesis, la definición de los conceptos empleados y la discusión de las unidades de medida a utilizar y su homogenización, así como la metodología propuesta.

Tras la introducción, la tesis tiene cuatro capítulos básicos:

- En el primero se analizan los conceptos generales sobre la alta velocidad, sus flujos económicos y las externalidades. También (de forma tangencial y muy general por no ser el objetivo directo de la tesis) algunas ideas en cuanto a la rentabilidad socioeconómica de las líneas, ya que el consumo de energía y los costes de explotación tienen un fuerte impacto en el análisis coste-beneficio.
- En el segundo capítulo se profundiza en la cuestión del consumo de energía y las emisiones: Se repasan los antecedentes del conocimiento existente sobre la relación del consumo de energía con la velocidad (incluyendo la mención de ideas preconcebidas y la de su refutación con datos procedentes de la experiencia); se identifican y analizan los inductores de consumo y las relaciones funcionales entre ellos, desarrollándose un modelo analítico cuya explotación con valores genéricos representativos permite obtener algunos resultados sobre la relación específica entre consumo y la variación de la velocidad, y entre consumo y el sistema de alta velocidad.
- El tercero de estos capítulos es análogo al anterior, pero referido a los costes de explotación: se repasan algunos estudios existentes en lo que se refiere a su relación con la velocidad, se clasifican los costes y se identifican los inductores; se construye el modelo; se emplea éste con valores genéricos para diferentes medidas de sensibilidad, y se sintetizan los resultados específicos relativos a la relación entre los costes de explotación y la alta velocidad.
- Seguidamente, en el cuarto capítulo se realiza la aplicación de los modelos a tres casos-ejemplo. En cada uno de los casos se realiza un análisis de sensibilidad a las variaciones de velocidad, tamaño y arquitectura del tren, distancia recorrida y tiempo de rotación. Como ejemplos de aplicación se han escogido tres casos diferentes. Uno corresponde a la comparación en un trayecto "largo" del orden de 450 kilómetros entre una línea convencional, una línea convencional mejorada para 200 kilómetros por hora, y una línea nueva de alta velocidad. Los otros dos se desarrollan sobre sendos tramos singulares en los que hay un paralelismo entre la línea de alta velocidad y la convencional:
  - Caso 1. Líneas de Madrid a Lleida (en las líneas convencionales de Madrid a Barcelona y de Zaragoza a Barcelona ; Madrid a Lleida (en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona y Francia); y Alicante a Barcelona (línea convencional mejorada del Corredor Mediterráneo).

- Caso 2. Tramo de La Robla a Pola a Lena, comparando el trazado por la línea convencional de León a Gijón (de 1884), con la nueva línea de alta velocidad en su tramo de los túneles de Pajares (¿2013?).
- Caso 3. Tramo de Ourense a Santiago, comparando la línea convencional (de 1958), con la nueva línea de alta velocidad (2011).

Se incluye un capítulo de conclusiones y otro con las líneas de investigación identificadas. Tras la bibliografía, en anexos, se presentan los índices de tablas y de figuras, y la terminología específica.

Alcance de la bibliografía.- Con respecto a la bibliografía, sólo se incluyen en ella los libros, artículos monografías y documentos que aportan reflexiones, datos o ideas de calado relativos a los temas básicos de la tesis. Cuando se trata de un documento, revista, periódico o página web del que se menciona o utiliza solo algún dato concreto aislado o alguna idea colateral, se cita en el propio texto o a pie de página sin incluirlo en la bibliografía.

0.4. Medida e imputación de los consumos y costes

En la tesis se pretende analizar y comparar consumos de energía, emisiones y costes. Por ello es necesario definir cuáles son los indicadores y las unidades de medida que deben aplicarse para unos y otros.

Los indicadores y unidades de medida aplicables tienen que cumplir, en general, dos condiciones:

- ser consistentes, reflejando adecuadamente el fenómeno que miden;
- ser homogéneos cuando se emplean para comparaciones, de forma que la comparación no resulte desvirtuada por utilizar indicadores consistentes pero no comparables.

0.4.1. Consistencia de los indicadores

La *consistencia* de un indicador es la propiedad de reflejar de forma sólida y eficiente lo que se pretende medir. Para asegurar la consistencia del indicador, es preciso determinar con precisión tanto la magnitud a medir como (en el caso de los indicadores específicos) la referencia a utilizar.

➢ Indicadores absolutos o relativos

Una primera cuestión importante a decidir es si las funciones de consumo y de costes que se van a desarrollar, deben expresar los consumos y los costes en valores absolutos o relativos.

- Los indicadores absolutos de consumo de energía expresan el uso de un determinado recurso energético, en unidades netas de consumo (litros de gasóleo, kilovatios.hora de electricidad, etc.); o en unidades de consumo por kilómetro recorrido (litros de gasóleo por kilómetro, kilovatios.hora por kilómetro, etc.), sin relación con ninguna otra magnitud.[1]
- Análogamente, los indicadores absolutos de emisiones de gases de efecto invernadero expresan las emisiones de dióxido de carbono equivalente (gramos de dióxido de carbono equivalente) o en unidades de emisión por kilómetro recorrido (gramos de dióxido e carbono equivalente por kilómetro).
- Los indicadores absolutos de costes (para un servicio de transporte) expresarían éstos en euros, o en euros por kilómetro[2].

Los indicadores absolutos no dan una medida de la eficiencia real del vehículo o del sistema de transporte, puesto que la capacidad de los diferentes modos de transporte (por ejemplo, un autobús y un avión), o incluso la capacidad de los vehículos de un mismo modo de transporte (por ejemplo, dos modelos diferentes de

[1] En el capítulo dedicado al modelado del consumo de energía se incluirá la discusión sobre qué indicadores concretos (tep, kWh, litros de gasóleo, kilogramos de dióxido de carbono, Megajulios…) son los más adecuados para reflejar los efectos negativos del uso de la energía.

[2] En el capítulo destinado a los costes de explotación se explicará qué indicadores se consideran más adecuados para la medida, comparacón y análisis de los costes.

trenes de alta velocidad), puede ser muy diversa. Surge así la necesidad de emplear indicadores que denominamos "relativos", "específicos" o "unitarios".

Los indicadores relativos expresan el consumo de un determinado recurso con respecto al output producido, normalmente relacionado con la oferta o con la demanda de transporte (kWh por viajero, litros de gasóleo por plaza, litros de gasolina por plaza.kilómetro, céntimos de euro por plaza.kilómetro, etc.) Análogamente, los indicadores relativos de costes, expresan éstos por unidad de output o de demanda (por ejemplo, euros por viajero, céntimos de euro por plaza.kilómetro, etc.)

Los indicadores relativos ofrecen más información y son más útiles para comparar y analizar. Además, conociendo los indicadores relativos, y multiplicando por la unidad de oferta o demanda utilizada, se puede obtener el indicador absoluto si fuese necesario. Por lo tanto, las funciones de consumo y costes que se van a desarrollar se expresarán empleando indicadores relativos.

➢ Output a utilizar: de oferta o de tráfico (demanda)

Una segunda cuestión a dilucidar es si el divisor del indicador (es decir, el *output* considerado) ha de ser una unidad de oferta (como lo son las plazas, o las plazas.kilómetro) o una unidad de de transporte o de demanda (como son los viajeros o los viajeros.kilómetro).

Regla general: los costes y consumos se relacionan con la oferta y los ingresos con el transporte o la demanda.- La teoría económica enseña que los costes no deben relacionarse con los indicadores de demanda o de tráfico, sino con los indicadores de oferta (puesto que es la producción de la oferta la que induce los costes con independencia de su utilización, que tiene que ver además con la política comercial, precios, etc.) Véase, por ejemplo, al respecto (García Álvarez, Cillero Hernández, & Rodríguez Jericó, 1998) o (de Rus, Campos, & Nombela, 2003).

Los ingresos deben relacionarse con los indicadores de demanda o con los de tráfico (viajeros.kilómetro o viajeros en el transporte de pasajeros, o toneladas netas.kilómetro en mercancías), pues es justamente la realización del transporte lo que produce el coste.

Entonces, los indicadores económicos principales de la actividad de transporte de viajeros serían:

- Los costes, por unidad de oferta (céntimos de euro por plaza.kilómetro)
- Los ingresos, por unidad transportada (céntimos de euro por viajero.kilómetro).

La relación entre las unidades de oferta (plaza.kilómetro) y las de demanda (viajero.kilómetro) se produce a través del *aprovechamiento* o *load factor* (viajeros.kilómetro / plazas.kilómetro), por lo que la ecuación económica básica del operador ha sido expresada en (García Álvarez et al., 1998) como se indica en la ecuación 1:

$$Margen_{unitario}(c€/v.km) = Ingreso_{unitario}(c€/v.km) - \frac{Coste_{unitario}(c€/plaza.km)}{Aprovechamiento(v.km/p.km)} \quad [1]$$

Conocido el aprovechamiento, se pueden obtener (a partir de los indicadores básicos) los *indicadores complementarios* que relacionarían los costes o consumos con los tráficos; y los ingresos con las plazas.

Excepción a la regla general.- Una importante excepción a esta regla general (según la cual los consumos y los costes deben relacionarse con la oferta) se presenta cuando se trata de realizar comparaciones entre diferentes modos de transporte o entre diferentes vehículos de mismo modo de transporte. En estos casos es preciso medir los recursos empleados para atender una determinada demanda de movilidad, por lo que en tales comparaciones puede ser conveniente utilizar una unidad específica con relación a la demanda (por ejemplo, el consumo o coste por viajero en una ruta).

Proponiendo el uso de unidades de oferta para el análisis de la eficiencia del sistema y de demanda para las comparaciones se manifiesta también (Kemp, 2007) quien sugiere el uso de las unidades siguientes: *kilovatios hora por plaza.kilómetro* o *litros de gasóleo por plaza.kilometro* para el análisis del consumo del ferrocarril; y el de *gramos de dióxido de carbono por plaza.kilómetro* para comparar trenes diésel con trenes eléctricos. Para las comparaciones intermodales recomienda utilizar como divisor una unidad demanda (*unidad de utilidad*, la denomina) en concreto, los *gramos de dióxido de carbono por viajero kilómetro*.

Indicadores utilizados en esta tesis.- En resumen, en esta tesis, y para cada una de las magnitudes a medir (consumo de energía, emisiones y costes), se calcularán dos tipos de indidadores:

- Indicadores por unidad de oferta (generalmente por plaza.kilómetro o por unidad de capacidad.kilómetro).
- Indicadores por unidad de demanda (generalmente por viajero.kilómetro o por viajero. kilómetro ortodrómico).

0.4.2. Homogeneización de indicadores

Cuando los indicadores de consumos, emisiones o de costes se van a utilizar para realizar comparaciones (por ejemplo, de dos diferentes trenes en la misma línea; o del mismo tren con diversas velocidades o con un número diferente de paradas; o de un tren con un avión o un autobús) deben emplearse unidades homogéneas para que la comparación resulte útil y válida. Para que los indicadores tengan la propiedad de la homogeneidad, es necesario que cumplan dos condiciones: i) el indicador ha de medir lo mismo para todos los casos que se comparan (es decir, ha de ser un indicador común); ii) la unidad de oferta que se compara ha de ser homogénea, tanto en la forma de medir la oferta o demanda (plazas, o superficie útil bruta, o viajeros) como en la forma de contabilizar la distancia (kilómetros reales o kilómetros ortdrómicos).

La comparación será mas útil cuando, en lugar de comparar exclusivamente el resultado final, se comparan los resultados intermedios y los factores que conducen a tal resultado (utilizando indicadores “en cadena”). Ello permite comprender mejor las razones de las diferencias entre los resultados finales que se comparan.

Todos estos temas se abordarán seguidamente.

➢ Indicadores comunes

El consumo de un vehículo en un kilómetro de recorrido puede no ser directamente comparable con otros vehículos o con otros modos de transporte por diversas razones:

- Porque los vehículos pueden tener muy diferentes capacidades y coeficientes estructurales de aprovechamiento. Por lo tanto, para un mismo consumo por

vehículo.kilómetro, para el mismo recorrido y para la misma capacidad, pueden ser diferentes los consumos por viajero.kilómetro.

- Porque para realizar el servicio comercial se precisan recorridos en vacío diferentes según los modos de transporte (las diferencias no son muy relevantes en el transporte de viajeros, aunque existen; pero sí lo son en el de mercancías, donde los recorridos en vacío puede llegar hasta el 50% de los recorridos totales).
- Finalmente (y específicamente en el caso de la energía y de las emisiones), porque al ser diferente el tipo de energía empleada, también lo son el combustible, las pérdidas y las emisiones que se producen antes de la llegada al vehículo. Ello exige una corrección si se quiere tener en cuenta la globalidad del proceso. Los resultados (que pueden ser, a elección del decisor, por ejemplo, emisiones de dióximdo de carbono, consumo de energía primaria de origen fósil, o de energía procedente del petróleo, etc.) incluyen estas diferencias, pudiendo adaptarse los coeficientes específicos a las circunstancias concretas de cada país y momento temporal. Ello es especialmente relevante en la tracción eléctrica, ya que las emisiones en la generación de electricidad varía de país a país y en cada país, de año en año.

El efecto de las "economías de tamaño".- Debe advertirse que en el transporte de viajeros hay apreciables "economías de tamaño": cuanto mayor sea el vehículo (es decir, cuantas más plazas tenga) menor será el consumo o el coste por plaza. Ello aconseja, cuando sea posible, comparar vehículos de la misma capacidad, ya que si se comparan consumos o costes de vehículos de muy diferentes tamaños, el resultado de la comparación incluye a la vez los efectos de la diferencia del vehículo (o de la velocidad o del tipo de servicio) y los efectos del tamaño. Un ejemplo clásico es la comparación entre el tren TGV normal de 350 plazas y el de dos pisos, de 500 plazas. Al comparar el consumo o el coste por plaza sale siempre muy beneficiado el de dos pisos, pero el resultado incluye tanto la indudable eficiencia de la arquitectura de los dos pisos, como la "economía de tamaño" derivada del mayor número de plazas. En rigor, lo deseable sería aislar ambos efectos y calcular los indicadores para un tren de dos pisos de 350 plazas (la diferencia con el normal sería la eficiencia de la arquitectura) y luego comparar con el de 500 plazas (que permitiría apreciar la economía del tamaño).

➢ Homogeneización de la oferta (capacidad)

La cuestión de la diferente densidad de plazas según los modos de transporte.- Los vehículos de diferentes modos de transporte ofrecen normalmente una cantidad de plazas muy variable en la misma superficie (incluso para el mismo tipo de servicio). Así, la anchura típica de un asiento en segunda clase en el tren es de 500 milímetros, en un avión es de 450 milímetros y en un autobús es de 400 milímetros. El paso típico entre dos filas consecutivas de asientos puede ser de 900, 800 y 700 respectivamente. Ello arroja una superficie necesaria de 0,45 metros cuadrados por plaza en el tren, 0,36 metros cuadrados por plaza en el avión y de 0,28 metros cuadrados por plaza en el autobús. ¿Quiere ello decir que, si el consumo absoluto un tren, de un avión y de un autobús del mismo tamaño fuese idéntico, el consumo específico por plaza sería un 61 por ciento superior en el tren frente al autobús, o un 29% superior en el avión frente al autobús?. En rigor sí, pero desde luego no son "plazas" comparables. Obviamente es preciso introducir una cierta corrección para homogeneizar la oferta.

La cuestión de la diferente densidad en el mismo vehículo.- Otra cuestión muy relacionada con la anterior tiene que ver con el hecho de que en función de la

política comercial que se aplique, dos vehículos (ya sean dos trenes, aviones o autobuses) de un mismo tamaño exterior e interior puede tener diferente número de plazas (así por ejemplo, el mismo autobús puede tener 35 plazas cuando se destina a un servicio "Supra" o 55 plazas cuando se utiliza en un servicio normal; un avión 737-800 puede tener 162 plazas –cuando cuenta con dos clases- y 189 plazas con una clase única densa; los trenes de alta velocidad Talgo de las series 102 y 112 son prácticamente idénticos entre sí, pero uno ofrece 316 plazas y el otro 365 plazas).

La unidad estandarizada de capacidad

Como se ha indicado, si la comparación se realiza por plaza.kilómetro sin ninguna corrección, podría conducir a resultados de consumos o costes específicos diferentes para vehículos idénticos, en los que únicamente cambia la configuración interior, mientras que los consumos o los costes absolutos normalmente no varían con la configuración del vehículo.

Por ello, las comparaciones entre vehículos de diferentes modos de transporte y entre diferentes vehículos del mismo modo de transporte se deben hacer en relación a una oferta estandarizada. Siguiendo la propuesta de (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares, M. del P., 2009) parece oportuno emplear como unidad de oferta la "plaza_estandar por kilómetro", entendiendo por "plaza_estándar" una unidad de capacidad que está directamente relacionada con la superficie del vehículo disponible para los viajeros. Comoquiera que puede ser necesario comparar modos o vehículos en los que se puede viajar de pie, con otros modos de transporte o vehículos que solo llevan plazas sentadas, parece preferible en estos casos emplear directamente la *superficie útil bruta* como unidad de estandarización, y transformarla (cuando sea necesario) a plazas_estándar a través de un coeficiente específico que denominaremos *coeficiente de densidad de plazas*.

Adoptamos, pues como unidad de oferta la *superficie útil bruta* (S_{ub}, en metros cuadrados), entendiendo como tal la superficie en planta del vehículo de las zonas en las que pueden viajar personas (de pie o sentadas o en camas), o en las que se pueden ubicar aseos, plataformas, cafeterías, restaurantes, etc. No se incluyen en la *superficie útil bruta*, los espacios ocupados por locomotoras, motores, cabinas o puestos de conducción, pasillos de paso entre coches y, en general, todos los espacios en los que no se pueden ubicar viajeros.

Al cociente entre las plazas reales de un vehículo (o de un tren) y su superficie útil bruta lo denominamos *Densidad de plazas* (Dp), y suele ser del orden de 4 a 6 plazas por metro cuadrado en el caso de los servicios que admiten viajeros de pie, y de 0,5 a 3 plazas por metro cuadrado en los vehículos con plazas sentadas. Valores de 0,7 a 1,1 son frecuentes en trenes para servicios de muy larga distancia, mientras que los valores de 1 a 2 pueden serlo en trenes de corta o de media distancia. Utilizando valores de la *densidad de plazas* comunes para los diversos modos de transporte (aunque diferentes para cada tipo de servicio) se puede disponer de otra medida estándar de la capacidad. Si se adopta el valor 1 para la la *densidad de plazas*, la unidad, la cifra que mide la capacidad en plazas estándar coincide con la que mide la *superficie útil bruta* (en metros cuadrados).

Una completa y detallada definición de los indicadores específicos y de las metodologías de homogenización de los consumos de energía (incluso de diversos modos de transporte) puede verse la Monografía 6 del proyecto EnerTrans "Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte" (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares, M. del P., 2009).

La decisión de medir por plazas o por viajeros

Según cuál sea el propósito de cada estudio, puede ser diferente el divisor adecuado. Por ello, se podrían llegar a establecer tres indicadores específicos "en cadena", con la ventaja de que así se pueden separar los efectos de las decisiones que subyacen en cada uno de los factores que son responsabilidad de actores diferentes (Figura 1):

- El consumo o coste por metro cuadrado (o por plaza estándar), es consecuencia directa de la arquitectura del vehículo o tren, de su rendimiento y de su concepción; por lo que la mayor responsabilidad en este indicador se sitúa en los diseñadores técnicos del vehículo (típicamente, el fabricante o tecnólogo del vehículo).
- El consumo o coste por plaza real se obtiene al multiplicar el consumo por plaza estándar por el cociente entre las plazas estándar y las plazas reales (inverso de la *Densidad de plazas*). Este cociente (plazas estándar / metro cuadrado) es responsabilidad de quien decide sobre el diseño comercial del vehículo (normalmente es el operador del servicio), ya que se ve afectado por decisiones como en número de clases, la distancia entre asientos, si hay o no cafetería, número y dimensión de los aseos, si es preciso espacio para galleys, etc.
- El consumo por viajero kilómetro se obtiene al dividir el consumo por plaza real por el aprovechamiento (medido éste como el cociente entre los viajeros.km y las plazas.km). El aprovechamiento es consecuencia de decisiones de programación operativa del servicio: la política adoptada respecto al equilibrio entre frecuencia y aprovechamiento; la decisión de reforzar o no reforzar los servicios en día punta; de programar más o menos paradas, la política de precios…; y por ello tiene poco que ver con el diseño "físico" del vehículo.

Figura 1. **Indicadores de consumo con diversos divisores para diferentes propósitos.**

A - Consumo por Plaza Equivalente ($\mathbf{C_{pe}}$)

B - Consumo por Plaza Real ($\mathbf{C_{pr}}$)

$$C_{pr} = C_{pe} \cdot {}^{P_e}\!/_{P_r}$$

C - Consumo por Viajero.km ($\mathbf{C_{vk}}$)

$$C_{vk} = {}^{C_{pr}}\!/_{Aprovechamiento_total} = C_{pr} \cdot {}^{plazas.km}\!/_{viajeros.km}$$

Fuente: (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares, M. del P., 2009)

➢ Homogeneización de la distancia

No se podría afirmar con rigor que el tren consume menos que el avión si su consumo por plaza_estándar.kilómetro fuera inferior, por ejemplo, en un 5 por ciento, pero si el tren tuviera que recorrer un 10 por ciento más de kilómetros para hacer el transporte entre los mismos puntos. Ello pone de relieve que en los análisis en los que estén implicados diferentes recorridos para realizar el desplazamiento entre dos mismos puntos es preciso aplicar un factor corrector que tenga en cuenta las diferencias de recorrido. También puede ser necesario aplicarlo cuando se emplean

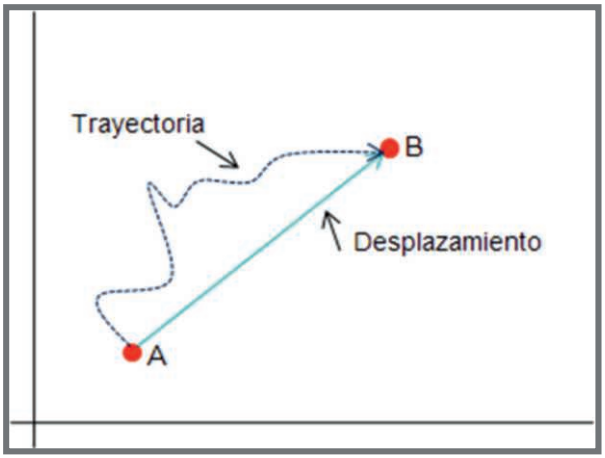
dos rutas distintas del mismo modo de transporte (por ejemplo, una carretera y una autopista; o una línea de ferrocarril convencional y otra de alta velocidad).

El enfoque global debe analizar el consumo y los costes desde el punto de vista de la movilidad, lo que es especialmente relevante si se tiene en cuenta que, para un mismo desplazamiento (entendiendo por tal la menor distancia entre el origen y el destino), en cada modo de transporte se siguen trayectorias de longitud muy diferente (por ser distinta la longitud del propio camino, por planteamientos logísticos, por diferente necesidad de recorridos en vacío, etc.) Por ello, es necesario conocer y usar para homogeneizar los cocientes entre desplazamiento y trayectoria de cada modo o servicio (que llamamos "coeficientes de trayectoria", CT_i). Este coeficiente permite pasar de la distancia propia de cada modo (km_i) a la distancia ortodrómica entre origen y destino (km_{ort}) que es común para todos los modos de transporte y para todos los servicios en la misma ruta origen-destino.

$$\frac{kWh}{v.km_{ort\,AB}} = \frac{kWh}{v.km_{i\,AB}} \times CT_i\left(\frac{km_{i\,AB}}{km_{ortAB}}\right) \quad [2]$$

Donde el subíndice i denota cada diferente modo de transporte entre el origen A y el destino B (Figura 2).

Figura 2 . **Desplazamiento y trayectoria entre dos puntos**



El *Coeficiente de trayectoria* (CT) para un modo de transporte o para un servicio entre dos puntos A y B es el resultado dividir la trayectoria que recorre por el desplazamiento o distancia ortodrómica entre estos puntos. Por definición, el coeficiente de trayectoria es mayor que la unidad.

Fuente: (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares, 2009)

Los valores de los *Coeficiente de trayectoria* (tal y como se han definido en la ecuación 2) son muy diferentes según los modos de transporte y según distancias recorridas. En el marco del proyecto EnerTrans (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares et al., 2009) se calcularon los valores medios para el caso español en función de la longitud de la ruta origen-destino. En la tabla 3, que recoge estos valores, puede observase, por ejemplo, cómo el coeficiente de trayectoria del tren de alta velocidad es sensiblemente menor que el del tren convencional, lo que explica parte de las diferencias entre ellos en consumos, emisiones y costes.

Tabla 3 . **Valores del *Coeficiente de trayectoria* en el sistema español de transporte de viajeros**

Coeficientes de trayectoria en transporte interurbano					
	45-190 km	**190-350km**	**350-460km**	**460-930km**	**>930 km**
Autocar	1,259	1,290	1,311	1,321	
Turismo carretera convencional	1,234	1,257	1,268	1,241	
Turismo autopista de peaje	1,230	1,257	1,268	1,241	
Ferrocarril línea convencional	1,280	1,391	1,453	1,389	
Ferrocarril línea alta velocidad	1,243	1,229	1,234	1,296	
FC Convencional / FC alta velocidad	*+2,97%*	*+13,18%*	*+17,8%*	*+7,1%*	
Avión		1,098	1,044	1,037	1,093
Coeficientes de trayectoria en transporte urbano					
	0-4 km	4-8km	8-15km	15-30km	30-45km
Autobús	1,386	1,338	1,271	1,229	1,229
Turismo	1,425	1,511	1,554	1,554	1,554
Tren	1,494	1,407	1,283	1,203	1,203

Fuente: Adaptado de (Cillero Hernández, Bouzada Outeda, García Álvarez, & Martín Cañizares et al., 2009)

➢ Indicadores "en cadena"

Para el mejor análisis de los resultados de consumo y de costes, especialmente cuando se comparan modos de transporte o vehículos diferentes, es conveniente presentar el resultado como producto de varios resultados o indicadores parciales que se enlazan "en cadena". De esta manera se podrán conocer, no solo las diferencias numéricas en el resultado final, sino también las razones de las diferencias (lo que suele ser más relevante).

Además, ello podría permitir cuando el resultado de la comparación sean dos o más números semejantes, comprobar si tal semejanza se extiende a todos los indicadores parciales que intervienen, o si (por el contrario), la semejanza es el resultado de la compensación de unos y otros.

Un ejemplo (puede haber diferentes formatos) de expresión de indicadores en cadena para las emisiones de gases de efecto invernadero sería expresar el resultado (en kilogramos de dióxido de carbono por viajero, $kgCO_2/viajero$), como resultado del producto de los siguientes factores (Figura **3**):

x Consumo (en llanta y entrada de auxiliares) por kilómetro y por unidad de masa del vehículo cargado ($kWh/t.km$). Naturalmente, este indicador puede, a su vez, desagregarse en otros indicadores incluidos en la función de consumo.

x Densidad másica del vehículo en relación con la superficie útil bruta (t/S_{ub})

x Inverso de la densidad de plazas y servicios ($plazas/S_{ubruta}$)

x Inverso del aprovechamiento ($plazas.km/viajeros.km$)

x Coeficiente de trayectoria ($kilómetros\ reales/km\ ortodrómicos_{ort}$)

x Distancia ortodrómica (km_{ort})

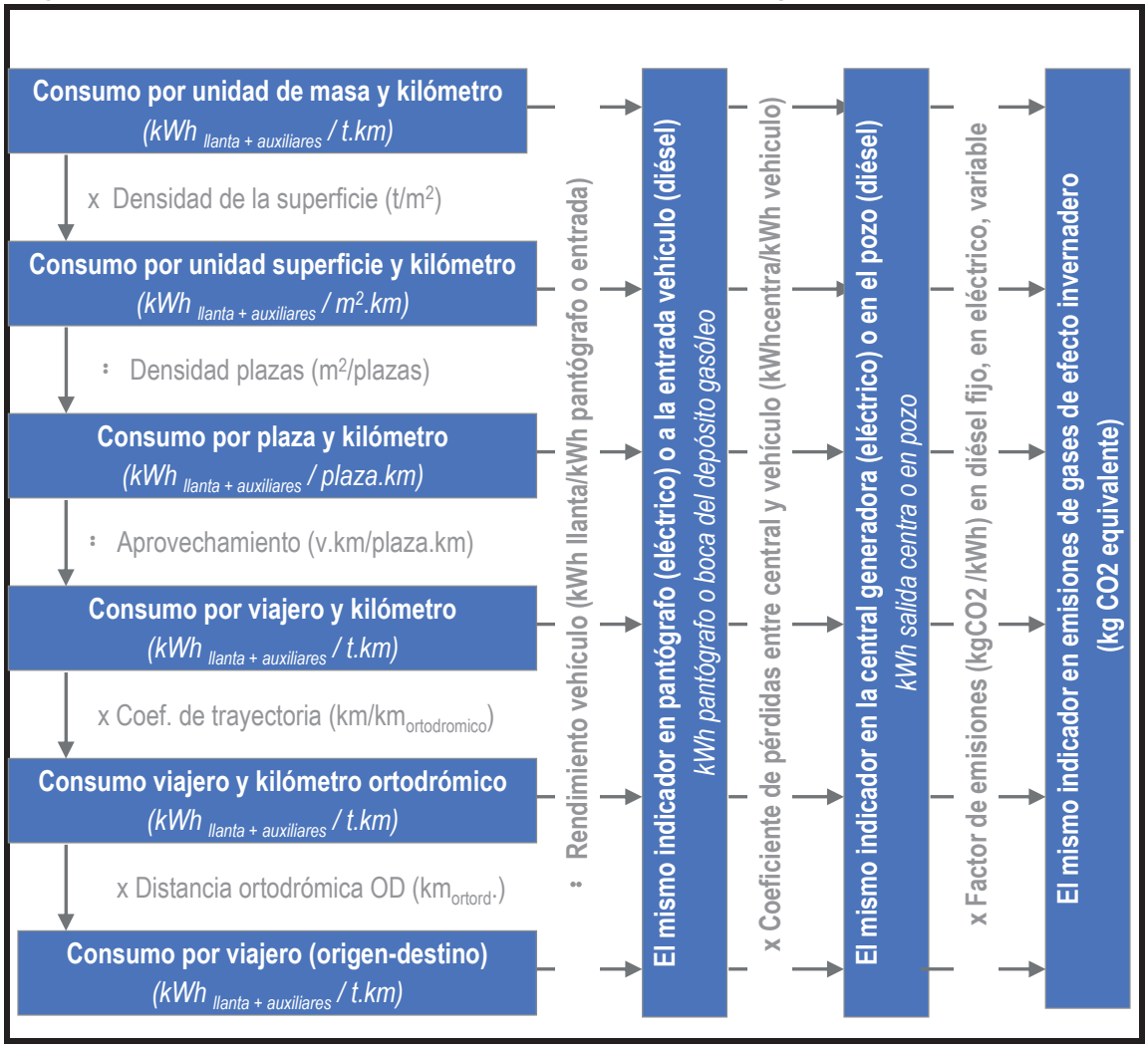
Es decir,

$$\frac{kgCO_2}{v} = \frac{kWh}{t.km} \times \frac{t}{S_{ub}} \times \frac{S_{ub}}{p} \times \frac{1}{(v.km / p.km)} \times \frac{km}{km_{ort}} \times km_{ort} \quad [3]$$

Cualquiera de los indicadores anteriores puede referirse (en lugar de a la energía medida en la llanta) también a la energía medida en otro punto o a las emisiones:

- Energía medida en el pantógrafo (en tracción eléctrica) o a la entrada del vehículo (tracción diésel).
- Energía medida a la salida de la central generadora (tracción eléctrica) o en el pozo de petróleo (tracción diésel).
- Emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 3. **Relación entre los diferentes indicadores de consumo y emisiones**



La comparación entre dos modos de transporte o vehículos debe hacerse empleando el mismo indicador. El cálculo y el uso de indicadores "en cadena" permite identificar las razones de las diferencias entre dos modos o entre dos vehículos. En la figura se ha supuesto que no hay energía regenerada.

Fuente: Elaboración propia

0.4.3. Unidades empleadas

Una vez establecido que los indicadores fundamentales que se van a emplear son indicadores específicos expresados por plaza estándar (medida en metros cuadrados de superficie útil) por kilómetro, se puede entrar en el detalle del inventario de las unidades más adecuadas para la medida de los consumos de energía, de las emisiones y de los costes de explotación.

Los indicadores y sus unidades adoptados para el presente estudio serán:

- **Consumo de energía eléctrica**: Kilovatios.hora netos (entendiendo por *netos*, los importados menos los exportados por el freno regenerativo) medidos en el pantógrafo del vehículo, por plaza estándar.kilómetro. (Para homogeneizar el consumo de trenes que funcionan a diferentes tensiones es preciso añadir las

pérdidas de energía que se producen entre la salida de la central productora o generadora de electricidad y el pantógrafo del vehículo.

- **Consumo de energía en tracción diésel**: Litros de gasóleo consumidos medidos en la boca de combustible del vehículo, por plaza estándar.kilómetro.

- **Emisiones de gases de efecto invernadero**: Kilogramos de dióxido de carbono equivalente por plaza estándar.kilómetro. Cuando se refieren a tracción eléctrica, es importante destacar que como el factor de emisiones (que relaciona la energía eléctrica generada en un sistema eléctrico) cambia de un país a otro y de un año a otro (y a veces de forma importante) conviene relacionar este resultado con el factor de emisiones empleado, de forma que permita deducir el consumo de energía eléctrica asociado a las emisiones indicadas.

- **Emisiones de otros productos contaminantes**: Kilogramos del producto de que se trate (NO_x, S,…) por plaza estándar.kilómetro.

- **Costes de explotación**: normalmente se emplea la unidad de céntimos de euro por cada plaza x kilómetro ofertada (o por cada tonelada x kilómetro de capacidad, en el caso del transporte de mercancías). Cuando es necesario hacer comparaciones intermodales (por ejemplo, trenes frente a aviones) o entre vehículos con diferentes recorridos que viajan entre los mismos puntos (por ejemplo, el tren convencional frente al de alta velocidad en la misma ruta), es preciso multiplicar por el coeficiente de trayectoria para obtener el indicador por kilómetro.

Mientras que en el caso de los costes de explotación, el indicador más adecuado parece ser sin duda el económico por unidad de oferta (por ejemplo, céntimos de euro por plaza_estandar.kilómetro), en los casos del consumo de energía y de emisiones no es tan evidente cuál es el indicador mas adecuado (de hecho, dependerá del propósito del análisis concreto de que se trate). El tema se discutirá más adelante al analizar los diversos efectos negativos que tiene el uso de la energía, lo que será útil para analizar cuál es el indicador que refleja mejor estos efectos negativos.

En muchos casos será útil conocer el consumo de energía o el coste de explotación por unidad de tráfico; es decir, referido a cada viajero transportado entre el origen y el destino (en lugar de referido a la oferta). Ello es relevante, como se ha expuesto, cuando se comparan diversos modos o sistema de transporte en una misma ruta. El cálculo es sencillo, ya que basta multiplicar el indicador señalado anteriormente por el coeficiente de aprovechamiento ($v.km/p.km$) y por el coefiente de trayectoria y por la distancia ortodrómica entre el origen y el destino del viaje (km_{ort}). En tales casos resulta muy útil expresar el resultado como producto de varios indicadores "en cadena", ya que el *factor de aprovechamiento* y el *coeficiente de trayectoria* pueden inducir sesgos en los resultados, y solamente el conocimiento de cada uno de los factores que intervienen permitirá analizar adecuadamente el resultado de la comparación.

0.5. Definiciones de la velocidad

Existen diversas acepciones de la "velocidad", y debe escogerse y definirse con precisión la que se emplea en cada caso, ya que en muchas ocasiones se producen confusiones por utilizarse el mismo término para designar velocidades diferentes.

- **Velocidad máxima (de la línea o del vehículo).-** La *velocidad máxima de una línea* ferroviaria es aquella que pueden alcanzar los trenes en explotación comercial sobre la misma. Análogamente, la *velocidad máxima de un vehículo* es aquella que puede desarrollar en sus condiciones normales de funcionamiento y en su servicio comercial. Desde luego, sobre la línea se pueden desarrollar velocidades superiores en pruebas o en condiciones especiales, y los vehículos también pueden alcanzar ocasionalmente velocidades mayores que su velocidad máxima (de hecho, en los procesos de homologación de los vehículos y de la vía es preciso circular un diez por ciento por encima de la respectiva velocidad máxima). La *velocidad máxima de un tren* (es decir, de un servicio de transporte) es la menor entre la *velocidad máxima de la línea* por la circula y la *velocidad máxima del vehículo* que utiliza.

- **Velocidad máxima (de una línea) por trazado** es aquella que permite la línea por su trazado en planta (curvas y peraltes), para la explotación comercial. Puede ser mayor que la *velocidad máxima de la línea*, ya que ésta puede incluir (además de las limitaciones impuestas por el trazado) restricciones derivadas del sistema de señalización o de protección el tren, del tipo de catenaria, etc.

- **Velocidad media estática de la línea** es la media de las velocidades máximas en cada tramo de línea, ponderadas por la longitud del tramo. Es aquella velocidad media que podía alcanzar un tren considerando hipotéticamente que pudiera acelerar y decelerar instantáneamente.

- **Velocidad media sin tiempo de paradas** es aquella que consigue un tren, contando todas las restricciones de velocidad, incluyendo la aceleración y deceleración en las estaciones con parada y el margen de regularidad, pero sin contar el tiempo de las paradas.

- **Velocidad media** o **velocidad comercial** de un tren es la que resulta de dividir el recorrido del tren por el tiempo empleado el recorrido comercial. Esta velocidad se diferencia de la *velocidad media sin paradas* en que la velocidad comercial sí incluye el tiempo de las paradas comerciales.

- **Velocidad media incluyendo el tiempo de rotación** es la velocidad resultante de dividir la longitud del recorrido por el tiempo comercial de viaje, añadiéndole el tiempo de rotación al principio o al final del recorrido. Esta velocidad es relevante para el cálculo del número de vehículos necesarios pata atender un determinado servicio.

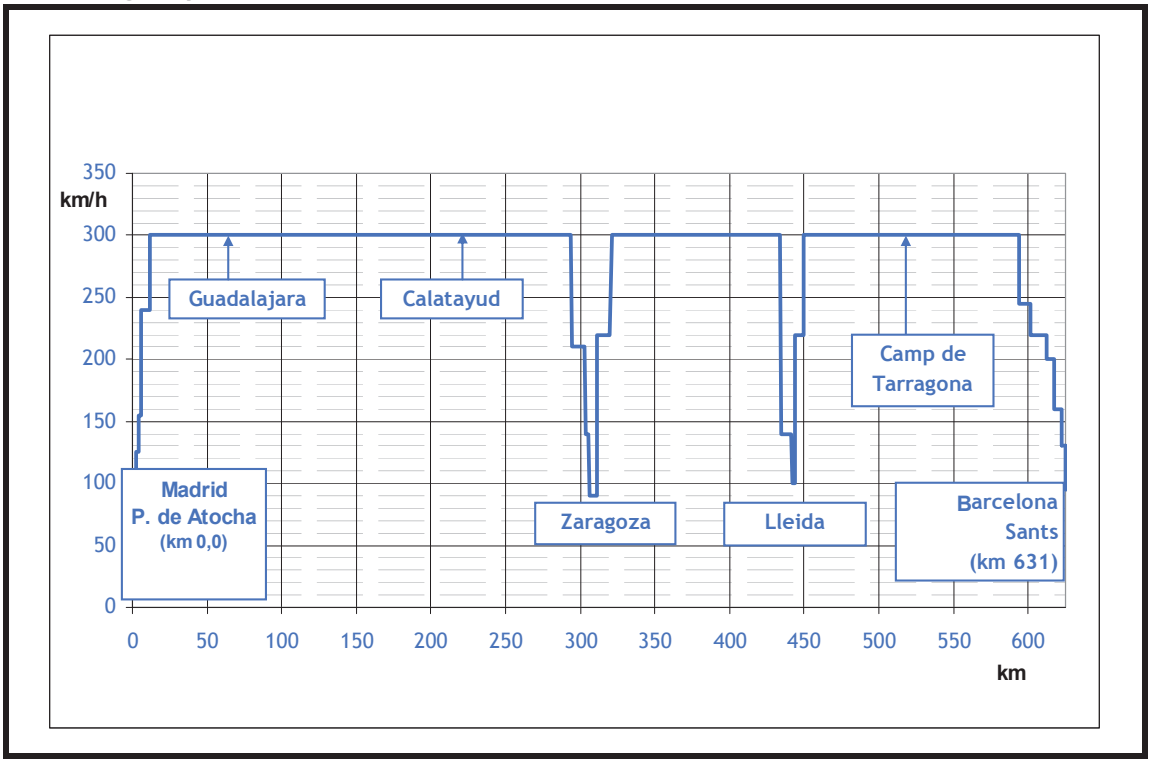
- **Velocidad máxima de uso del freno de servicio.** Es un concepto operativo que se aplica en ciertas formas de conducción de los trenes para reducir el consumo de energía. Se trata de que, por encima de esta velocidad (que se puede optimizar para cada caso en función del margen disponible y de las características del tren y de la infraestructura), no se aplica el freno de servicio (aunque sí, lógicamente, el freno de emergencia cuando es necesario), sino que se deja al tren circular "en deriva". Al llegar el tren a esa velocidad, sí que se aplica el freno para continuar el proceso de deceleración. La idea subyacente es que la circulación en deriva es eficiente por encima de cierta velocidad. En efecto, al reducir la velocidad de circulación en deriva aumenta mucho el tiempo perdido, y se reduce poco el consumo de energía.

➢ **Velocidad óptima** es un concepto teórico que se podría definir como la velocidad máxima o media que se debería alcanzar un tren para lograr un objetivo (por ejemplo, maximizar el número de viajeros, minimizar las emisiones en el corredor, optimizar el resultado económico del tren, etc.) La *velocidad óptima* se expresará normalmente en términos de velocidad media, pero a ella se asocia una determinada velocidad máxima, necesaria para lograr tal media.

Un ejemplo doble ayudará a comprender las importantes diferencias entre estos conceptos.

Supongamos la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, cuyo trazado está diseñado en la mayor parte de su recorrido para 350 kilómetros por hora, si bien por no disponer actualmente (enero de 2011) de un sistema de protección el tren de transmisión continua, está limitada a 300 km/h[3]. En la figura 4 puede verse el perfil de velocidades autorizadas en la línea.

Figura 4. **Perfil de velocidades máximas en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona por Zaragoza y Lleida (LAV 2)**



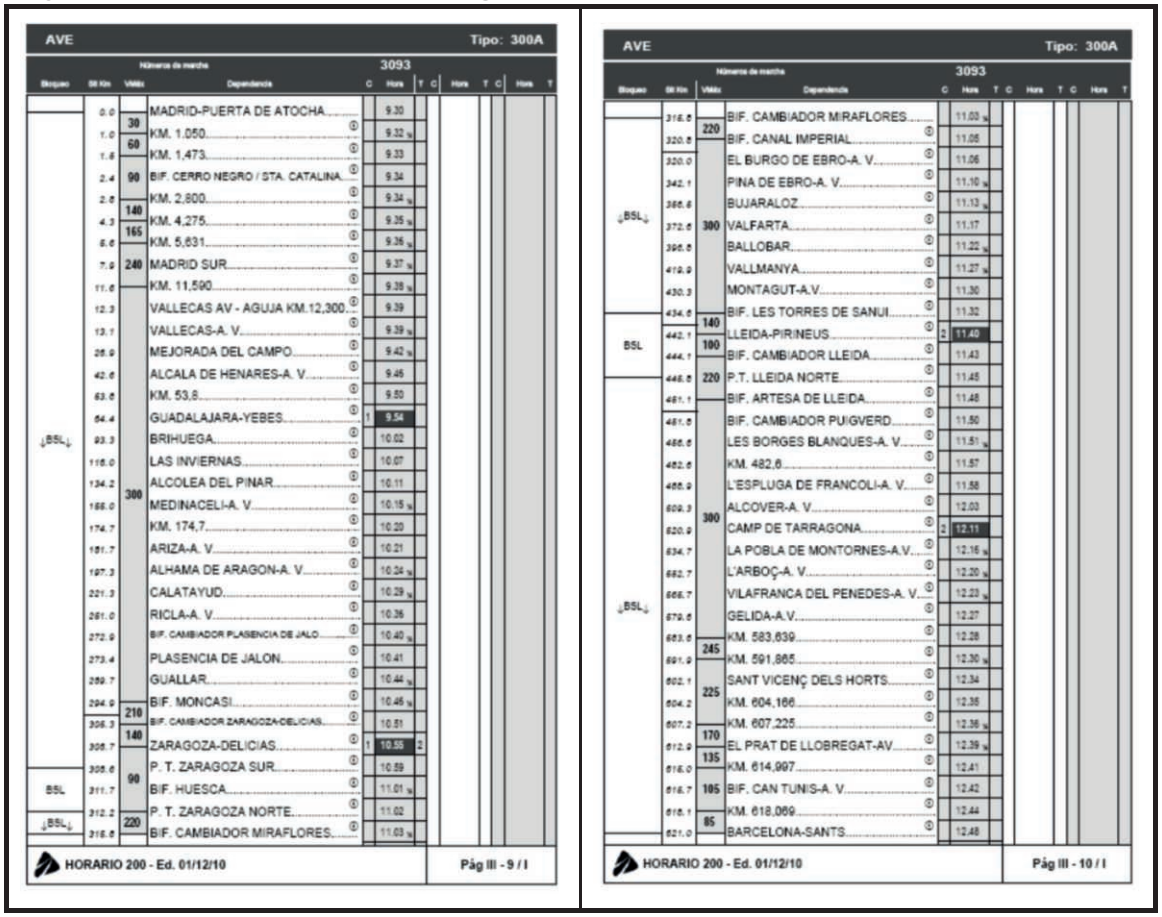
Fuente: Elaboración propia sobre el cuadro de velocidades máximas de la línea (Adif, Dirección de Gestión de Capacidades)

El tren que presta el servicio en esta línea es el AVE de la serie 103 de Renfe, fabricado por Siemens, cuya velocidad máxima es de 350 kilómetros por hora.

Tren con paradas.- Estos trenes de la serie 103 atienden, entre otros, los servicios de Madrid a Barcelona con cuatro paradas (en este caso, Guadalajara, Zaragoza, Lleida y Camp de Tarragona). La marcha de unos de estos trenes (en concreto, el designado con el número 3093) está reproducida en la figura 5.

[3] La línea se opera en esta fecha con el sistema ETCS / ERTMS 1 de transmisión puntual y supervisión continua; si bien está instalado y en pruebas el sistema ETCS / ERTMS 2 que, por ser de transmisión continua, permitirá la velocidad máxima de 350 km/h.

Figura 5. **Horario tren AVE Madrid-Zaragoza-Lleida-Barcelona**



AVE — Tipo: 300A — 3093

Bloqueo	Pk Km	Vmáx	Dependencia	C	Hora	T	C	Hora	T	C	Hora	T
	0.0		MADRID-PUERTA DE ATOCHA		9.30							
	1.0	30	KM. 1,050		9.32	½						
	1.8	60	KM. 1,473		9.33							
	2.4	90	BIF. CERRO NEGRO / STA. CATALINA		9.34							
	2.8		KM. 2,800		9.34	½						
	4.3	140	KM. 4,275		9.35	½						
	5.6	165	KM. 5,631		9.36	½						
	7.9	240	MADRID SUR		9.37	½						
	11.6		KM. 11,590		9.38	½						
	12.3		VALLECAS AV - AGUJA KM.12,300		9.39							
	13.1		VALLECAS-A. V.		9.39	½						
	26.9		MEJORADA DEL CAMPO		9.42	½						
	42.6		ALCALA DE HENARES-A. V.		9.46							
	53.6		KM. 53,8		9.50							
	64.4		GUADALAJARA-YEBES		9.54		1					
↓BSL↓	93.3		BRIHUEGA		10.02							
	116.0		LAS INVIERNAS		10.07							
	134.2	300	ALCOLEA DEL PINAR		10.11							
	155.0		MEDINACELI-A. V.		10.15	½						
	174.7		KM. 174,7		10.20							
	181.7		ARIZA-A. V.		10.21							
	197.3		ALHAMA DE ARAGON-A. V.		10.24	½						
	221.3		CALATAYUD		10.29	½						
	261.0		RICLA-A. V.		10.36							
	272.9		BIF. CAMBIADOR PLASENCIA DE JALO		10.40	½						
	273.4		PLASENCIA DE JALON		10.41							
	289.7		GUALLAR		10.44	½						
	294.9	210	BIF. MONCASI		10.46	½						
	305.3		BIF. CAMBIADOR ZARAGOZA-DELICIAS		10.51							
	305.7	140	ZARAGOZA-DELICIAS		10.55		1		2			
	305.8	90	P. T. ZARAGOZA SUR		10.59							
BSL	311.7		BIF. HUESCA		11.01	½						
↓BSL↓	312.2	220	P. T. ZARAGOZA NORTE		11.02							
	316.8		BIF. CAMBIADOR MIRAFLORES		11.03	½						

HORARIO 200 - Ed. 01/12/10 — Pág III - 9 / I

AVE — Tipo: 300A — 3093

Bloqueo	Pk Km	Vmáx	Dependencia	C	Hora	T	C	Hora	T	C	Hora	T
	316.8		BIF. CAMBIADOR MIRAFLORES		11.03	½						
	320.8	220	BIF. CANAL IMPERIAL		11.05							
	320.0		EL BURGO DE EBRO-A. V.		11.06							
	342.1		PINA DE EBRO-A. V.		11.10	½						
	366.6		BUJARALOZ		11.13	½						
↓BSL↓	372.6	300	VALFARTA		11.17							
	396.5		BALLOBAR		11.22	½						
	412.9		VALLMANYA		11.27	½						
	430.3		MONTAGUT-A.V.		11.30							
	434.6		BIF. LES TORRES DE SANUI		11.32							
	442.1	140	LLEIDA-PIRINEUS		11.40		2					
BSL	444.1	100	BIF. CAMBIADOR LLEIDA		11.43							
	446.8	220	P.T. LLEIDA NORTE		11.45							
	451.1		BIF. ARTESA DE LLEIDA		11.48							
	451.5		BIF. CAMBIADOR PUIGVERD		11.50							
	456.6		LES BORGES BLANQUES-A. V.		11.51	½						
	462.6		KM. 462,6		11.57							
	468.9		L'ESPLUGA DE FRANCOLI-A. V.		11.58							
	509.3		ALCOVER-A. V.		12.03							
	520.9	300	CAMP DE TARRAGONA		12.11		2					
	534.7		LA POBLA DE MONTORNES-A.V.		12.16	½						
	552.7		L'ARBOÇ-A. V.		12.20	½						
	566.7		VILAFRANCA DEL PENEDES-A. V.		12.23	½						
	579.6		GELIDA-A.V.		12.27							
↓BSL↓	583.6		KM. 583,639		12.28							
	591.9	245	KM. 591,865		12.30	½						
	602.1	225	SANT VICENÇ DELS HORTS		12.34							
	604.2		KM. 604,166		12.35							
	607.2		KM. 607,225		12.36	½						
	612.9	170	EL PRAT DE LLOBREGAT-AV.		12.39	½						
	616.0	135	KM. 614,997		12.41							
	616.7	105	BIF. CAN TUNIS-A. V.		12.42							
	618.1		KM. 618,069		12.44							
	621.0	85	BARCELONA-SANTS		12.48							

HORARIO 200 - Ed. 01/12/10 — Pág III - 10 / I

Nótese que aunque la posición de la estación de Barcelona es el kilómetro 621, la distancia de Madrid a Barcelona, pasando por Zaragoza y Lleida, es de 631 kilómetros.

Fuente: Adif, Dirección de gestión de capacidades, "Libro Horario 200, Trenes AVE-LD Renfe" de 1 de diciembre de 2010, actualizado al Anejo 4. Págs. III-9/1 y III- 10/1.

En este ejemplo, encontramos las siguientes velocidades:

- **Velocidad máxima de la línea por trazado**: 350 kilómetros por hora (los radios mínimos de las curvas son de 6.700 metros, lo que permite que ésta sea la velocidad de diseño de la línea).
- **Velocidad máxima de la línea**: 300 kilómetros por hora (es menor que la velocidad máxima de la línea por trazado, ya que está limitada en septiembre de 2011 por el sistema de protección del tren empleado: ETCS/ERTMS nivel 1). (En la figura 5 se puede ver en la tercera columna)
- **Velocidad máxima del vehículo**: 350 kilómetros por hora (es la velocidad de diseño y para la que está homologado el tren Siemens de la serie 103).
- **Velocidad máxima del servicio**: 300 kilómetros por hora (es la menor entre la velocidad máxima de la línea -300 kilómetros por hora- y la velocidad máxima del vehículo -350 kilómetros por hora). (En la figura 5 se designa en la cabecera: "Tipo: 300A")
- **Velocidad media estática de la línea**: 282,7 kilómetros por hora (media de la velocidad admitida en cada tramo ponderada por la longitud del tramo).

- **Velocidad media sin paradas**: 198,84 kilómetros por hora (630 kilómetros/(198 – 8 minutos de paradas/60)).
- **Velocidad media** o **velocidad comercial**: 190,9 kilómetros por hora (630 km/(198 min/60)).
- **Velocidad media considerando el tiempo de rotación**: 152,4 kilómetros por hora, estimando un tiempo de rotación en cabecera de 50 minutos (630 km /(198+50 min/60)).

Tren directo.- En la misma línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona un tren directo sin paradas que no pasa por Zaragoza ni por Lleida (con un recorrido de 620 kilómetros) y que emplea 2 horas y 30 minutos (tiempo de viaje desde el 24 de octubre de 2011) tiene las siguientes velocidades:

- **Velocidad máxima de la línea por trazado**: 350 kilómetros por hora.
- **Velocidad máxima de la línea**: 300 kilómetros por hora.
- **Velocidad máxima del vehículo**: 350 kilómetros por hora (es la velocidad de diseño y para la que está homologado el tren Siemens de la serie 103).
- **Velocidad máxima del servicio**: 300 kilómetros por hora (la menor entre la máxima de la línea -300 kilómetros por hora- y la velocidad máxima del vehículo -350 kilómetros por hora).
- **Velocidad media estática de la línea**: 290,41 kilómetros por hora (media de la velocidad admitida en cada tramo ponderada por la longitud del tramo).
- **Velocidad media sin paradas,** que en este caso coincide con la **Velocidad media o velocidad comercial**: 248 kilómetros por hora (620 km/(150 min/60)).
- **Velocidad media considerando el tiempo de rotación**: 186 kilómetros por hora, considerando un tiempo de rotación en cabecera de 50 minutos (620 km /(150+50 min/60)).

Relación entre las diferentes velocidades

No hay reglas fijas para determinar los cocientes entre las diferentes velocidades, pues dependen de numerosas circunstancias propias de cada caso. Aún así pueden esbozarse algunas reglas generales:

➢ La *velocidad media sin paradas* y la *velocidad comercial* se relacionan más con la *velocidad media estática* de la línea que con la *velocidad máxima del servicio*, pues puede ocurrir que ésta se alcance en una parte muy pequeña del recorrido. (Es el caso de la línea de alta velocidad de Madrid a Sevilla, donde la velocidad máxima del servicio es de 300 kilómetros por hora, pero solo se alcanza en 9 kilómetros, mientras que en la mayor parte del recorrido la velocidad máxima es de 270 o 250 kilómetros por hora, lo que lleva a una velocidad media estática de 246,8 kilómetros por hora).

➢ La relación entre la *velocidad media estática* y la *velocidad media sin paradas* depende del número de paradas y de la homogeneidad del perfil de velocidades. Es sensiblemente más baja en las líneas convencionales mejoradas que en las nuevas líneas de alta velocidad.

En el caso del ejemplo Madrid-Barcelona, algunos cocientes entre las diferentes velocidades son los siguientes:

- Velocidad media estática / Velocidad máxima del servicio: 282,7/300 = 0,94.
- Velocidad media sin paradas / Velocidad media estática: 198,8/282,7 = 0,70.

- Velocidad media o comercial / Velocidad media estática: 190,9/282,7 = 0,67.
- Velocidad comercial / Velocidad máxima del servicio: 190,9/300 = 0,63
- Velocidad media considerando el tiempo de rotación / velocidad media estática: 152,4/282,7 = 0,54.

Seguidamente se presentan las velocidades en diversos servicios españoles de alta velocidad, sobre las nuevas grandes líneas de alta velocidad construidas, así como sobre la línea convencional mejorada del Corredor Mediterráneo (Alicante-Barcelona, tabla 4).

Tabla 4. **Velocidades en diversos servicios españoles de alta velocidad**

		Madrid Sevilla	Madrid Barcelona	Madrid Valladolid	Madrid Valencia	Alicante Barcelona
	Distancia (km)	*470,5*	*621(1)*	*179*	*391*	*538*
	Velocidad máxima trazado	300	350	500	350	220
	Velocidad máxima línea	300	300	300	300	220
	Velocidad máxima tren	300	350	300	330	200
	Velocidad del servicio	300	300	300	300	200
Sin paradas	Veloc. media estática	246,8	290,6	277,3	287,6	171,4
	Vel.med est./ vel. servicio	*0,823*	*0,969*	*0,924*	*0,959*	*0,857*
	Vel.med.sin tiem. paradas	201,7	235,8	191,8	246,9	127,1
	Vel.sin t.p../Vel.med.est.	*0,817*	*0,811*	*0,691*	*0,858*	*0,741*
Servicio con paradas	*Distancia entre paradas (km)*	*117,6*	*126,2*	*89,5*	*130,3*	*135,0*
	Veloc. media estática	246,8	282,7	277,3	287,6	171,4
	Vel.med est./vel. servicio	*0,823*	*0,942*	*0,823*	*0,858*	*0,857*
	Vel.med.sin tiem. paradas	188,2	198,8	173,2	217,2	120,0
	Vel. sin par./ Vel. med.est.	*0,763*	*0,703*	*0,624*	*0,742*	*0,700*
	Vel. media o comercial	182,1	190,9	168,8	213,3	114,1
	Vel.com./ vel med.est.	*0,738*	*0,675*	*0,618*	*0,742*	*0,666*

Las velocidades se expresan en kilómetros por hora y corresponden la situación de oferta e infraestructuras en enero de 2011. Notas: (a) en el caso de Madrid a Barcelona, para los trenes con paradas, la distancia es de 631 kilómetros; (b) Entre Alicante y Barcelona no hay trenes sin paradas y por ello el tiempo para este tipo de trenes se ha estimado.

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, en las líneas españolas de alta velocidad, la relación entre la *velocidad máxima* y la *velocidad media estática* es muy variable, pero con tendencia a situarse entre el 92 y el 97 por ciento en las nuevas líneas y con valores entre el 80 por ciento en la línea de Sevilla (diseñada para 250 kilómetros por hora y luego elevada "artificialmente" en un corto tramo a 300 kilómetros por hora) y el 86 por ciento en la línea convencional mejorada del Corredor Mediterráneo.

Con respecto a la relación entre la *velocidad media sin paradas* y la *velocidad media estática*, para los trenes directos se sitúa con bastante estabilidad en el entorno del 81 al 86 por ciento en las líneas de alta velocidad (con la excepción de la línea de Madrid a Valladolid con un recorrido corto, relativamente accidentado y con vía única a la entrada de Valladolid), mientras que en la línea convencional mejorada se reduce hasta el 74 por ciento.

1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE ALTA VELOCIDAD Y SU BALANCE ECONÓMICO-SOCIAL

1.1. Definición de la alta velocidad en sus diversas categorías

Dada la relevancia del "sistema de alta velocidad" en la tesis, parece necesario profundizar en el concepto y los límites precisos entre los que se despliega dicho sistema.

Es preciso advertir previamente que no hay una definición única de validez universal, y que normalmente se entiende que el sistema de alta velocidad abarca las líneas ferroviarias de nueva construcción y los trenes que circulan regularmente sobre ellas con velocidades máximas de 250 kilómetros por hora o superiores en la mayor parte de línea.

Iñaki Barrón, director de Pasajeros de la Unión Internacional de Ferrocarriles, señala al respecto que existen diferentes definiciones de alta velocidad con un contenido más o menos político o formal, y que consideran además criterios de todo tipo. Sin embargo, y desde el punto de vista técnico, y con diferentes matices, puede decirse que la alta velocidad empieza aproximadamente a partir de los 250 kilómetros por hora, lo que siempre requiere líneas nuevas, diferentes de las preexistentes. "Aproximadamente" quiere decir que no hay reglas fijas ni exactas para ello. Teniendo en cuenta que las líneas ferroviarias "clásicas", la señalización "clásica" (es decir la que utiliza señales laterales) y los trenes "clásicos" (es decir los que están formados por una o varias locomotoras y una serie de coches remolcados) se pueden considerar aptos para operar hasta 200 o 220 kilómetros por hora (excepcionalmente incluso algo más), podemos aceptar que la alta velocidad ferroviaria empieza en el entorno de los 250 kilómetros por hora. (García Álvarez et al., 1998).

Desde este punto de vista, una línea no deja de ser de alta velocidad porque en una parte de su recorrido su velocidad máxima sea inferior a 250 kilómetros por hora; ni tampoco un tren que en estas líneas circula a tal velocidad deja de ser un tren de alta velocidad si además circula por otras líneas a velocidades inferiores.

La definición subyacente de las ETIs.- Una definición de alta velocidad más formal (aunque no mucho mas concreta) desde el punto de vista de la infraestructura se puede encontrar en la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) de 20 de Diciembre 2007, relativa al subsistema de infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad (Comisión de las Comunidades Europeas, 2008b). En esta norma, para definir en qué casos es aplicable (y por exclusión en cuáles no es aplicable la norma de infraestructura convencional), indica que hay tres categorías de líneas de alta velocidad:

1. Categoría I: líneas construidas especialmente para alta velocidad, equipadas para velocidades generalmente iguales o superiores a 250 kilómetros por hora;
2. Categoría II: líneas mejoradas especialmente para alta velocidad, equipadas para velocidades del orden de 200 kilómetros por hora;
3. Categoría III: líneas mejoradas especialmente para alta velocidad o especialmente construidas para alta velocidad que tienen características especiales debido a condicionamientos topográficos, urbanísticos o de relieve, en las que la velocidad tiene que adaptarse a cada caso.

Los valores de los parámetros especificados en la ETI son válidos hasta una velocidad máxima de 350 kilómetros por hora (por ello, esta es la velocidad máxima

contemplada en la actualidad como "alta velocidad" (de hecho, solo se alcanza en algunas líneas de China). Velocidades por encima de 350 kilómetros por hora pueden ser considerados como otra categoría que sería la de "muy alta velocidad" para que aún no existen normas internacionales (la ETI de material se remite a las normativas nacionales para este rango de velocidades).

En cuanto a los vehículos, la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI), de 21 de febrero 2008, (Comisión de las Comunidades Europeas, 2008a) relativa al subsistema material rodante del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, se aplica a las siguientes clases de material rodante, evaluados como ramas (indivisibles en servicio) o como vehículos individuales, en formaciones definidas de vehículos motorizados y no motorizados. Se aplica por igual a todos los vehículos, ya sean de transporte de viajeros o no. Establece dos clases de vehículos de alta velocidad:

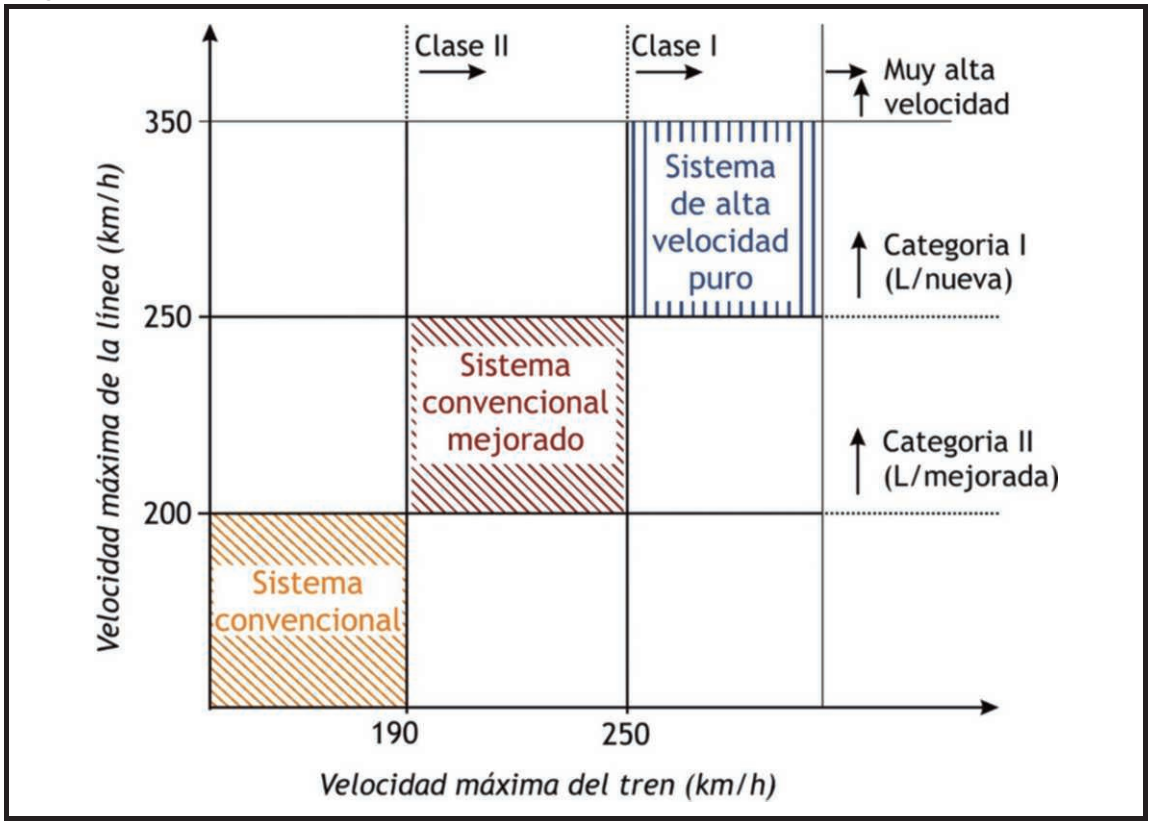
1. Clase 1: Material rodante de velocidad máxima igual o superior a 250 kilómetros por hora.
2. Clase 2: Material rodante con velocidad máxima de más de 190 kilómetros por hora, pero inferior a 250 kilómetros por hora.

Esta ETI se aplica al material rodante mencionado en el apartado 2 del anexo I de la Directiva 96/48/CE modificada por la Directiva 2004/50/CE que tenga una velocidad máxima de al menos 190 kilómetros por hora. Ahora bien: si la velocidad máxima de un vehículo es superior a 351 kilómetros por hora, se aplicará la ETI, pero serán necesarias especificaciones adicionales que no se detallan en la ETI, sino que se mantiene como "cuestión pendiente": en ese caso se aplicarán las normas nacionales.

Por ello podrían esquemáticamente representar hasta tres diferentes sistemas de alta velocidad en función de las combinaciones de las velocidades máximas del tren y de la línea (Figura 6):

- Muy alta velocidad: Trenes y líneas por encima de 350 kilómetros por hora.
- Alta velocidad propiamente dicha ("sistema puro"), con líneas nuevas de Categoría I y trenes Clase 1.
- Alta velocidad en líneas convencionales mejoradas Categoría II y trenes de Clase 2.

Figura 6. **Ámbito de los sistemas de alta velocidad**



Fuente: Elaboración propia

1.2. La alta velocidad como sistema

La primera aplicación práctica de la alta velocidad sobre nuevas líneas tal y como la conocemos fue en Japón en 1964, con los trenes "Shinkansen" a una velocidad máxima de 210 kilómetros por hora. Cuando años después los ferrocarriles franceses (1981) pusieron en funcionamiento el primer sistema europeo de alta velocidad definieron los servicios realizados con los trenes "TGV" pintados de un llamativo color naranja como un nuevo modo de transporte totalmente compatible con los ferrocarriles clásicos.

Tras numerosos intentos de alcanzar altas velocidades con mejoras parciales de las líneas y trenes existentes se llegó a la conclusión de la necesidad de un sistema nuevo que utilizase principios y sistemas específicos de la alta velocidad, e incluso algunos que son más propios de la aviación, pero que todo caso se apoyan en los esquemas fundamentales de los ferrocarriles clásicos.

El salto que representa traspasar el umbral que da entrada a la "alta velocidad" se puede considerar equivalente al salto que representa en aviación traspasar la barrera del sonido, a partir de la cual aparecen nuevos fenómenos, y por lo tanto la concepción del sistema debe ser completamente diferente.

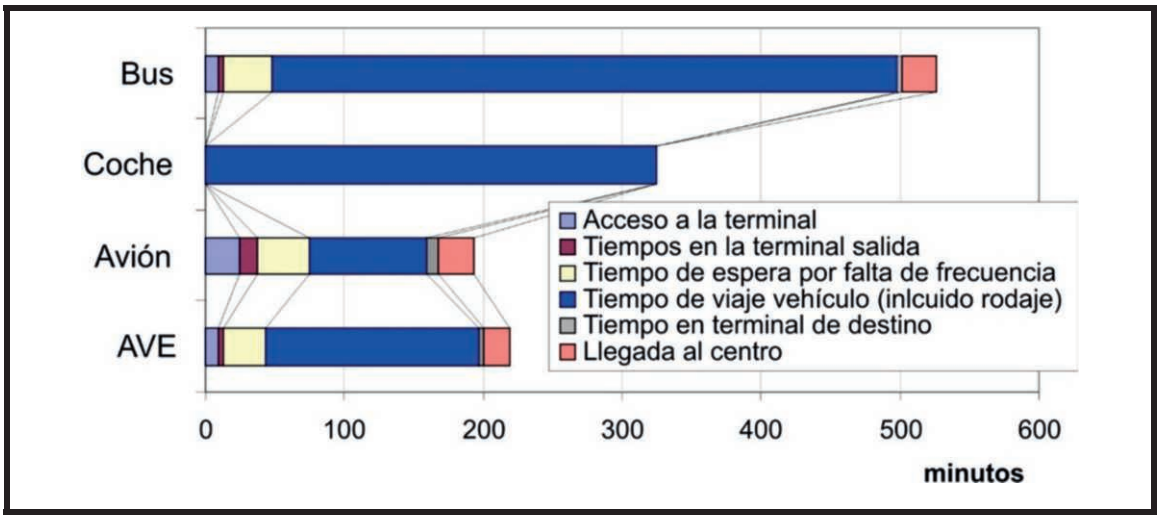
A pesar de que a menudo se identifica la alta velocidad con un determinado modelo de tren, o con una línea, o simplemente con una imagen comercial, la alta velocidad ferroviaria es el resultado de utilizar al mismo tiempo una innumerable cantidad de elementos, todos ellos coordinados y todos ellos a su más alto nivel.

Concebir y construir un sistema de alta velocidad requiere utilizar al mismo tiempo la mejor infraestructura, la mejor vía, el mejor sistema de electrificación, señalización y comunicaciones; los mejores y más potentes trenes, las mejores estaciones (por su número, situación, funcionalidad, explotación,…); el mejor sistema de mantenimiento, la mejor comercialización, el mejor sistema financiero, la mejor gestión, etc.

Es importante destacar que el tiempo de viaje propiamente dicho suele ser menor en el avión que en tren de alta velocidad (en las distancias en las que comparan), pero el tren de alta velocidad puede acercarse al avión en el tiempo global "puerta a puerta" (Figura 7) empleado para el desplazamiento por la centralidad y mejor accesibilidad de la estaciones, menores trámites, más ágil acceso a los trenes, etc.

La consideración en su conjunto de todos los elementos que componen el sistema y la relación entre ellos es fundamental para poder caracterizar un verdadero "sistema de alta velocidad". Y ello incluso teniendo en cuenta que, en el ámbito europeo y según los sistemas organizativos, pueden ser distintos actores los que se ocupen de la operación de los trenes, de la gestión de la infraestructuras y en algunos casos de la gestión de las estaciones, del mantenimiento de vías y trenes, etc.

Figura 7. **Tiempo generalizado entre Madrid y Sevilla en diversos modos de transporte**



El tiempo que emplean los viajeros para su desplazamiento es la suma de numerosos tiempos parciales. El tiempo de viaje en el vehículo es solo uno de ellos, y el tren de alta velocidad necesita reducir los tiempos de trámites, esperas y accesos y ofrecer una alta frecuencia para acercarse al avión.

Fuente: Elaboración propia.

Un par de ejemplos tomados de (García Álvarez, Barrón de Angoiti, Puente Domínguez, & Martín Cañizares, 2009) ilustrarán mejor lo que se acaba de exponer.

- En 1998, en los comienzos de la explotación de los servicios de alta velocidad "Thalys" a 300 kilómetros por hora, que permiten viajar entre París y Bruselas (330 kilómetros) en apenas 1 hora y 25 minutos, se produjeron diversas dificultades para la reserva de plazas y la venta de billetes. El resultado quedó reflejado con amargura en la carta de un "eurodiputado" a un diario francés: "El servicio me ha parecido impecable y el tiempo de viaje sumamente competitivo, pero ello no me ha compensado los 40 minutos que he pasado en la taquilla para adquirir mi billete ni la hora que he tenido que esperar para tomar un taxi a mi llegada a destino". Actualmente los billetes para los "Thalys" ("electrónicos" en soporte papel) se adquieren por Internet y un servicio de reserva de taxis desde el tren es ofrecido a los viajeros de primera clase sin coste adicional. Los servicios "Thalys" transportan la mitad de los viajeros que se desplazan entre las dos capitales, incluyendo todos los modos de transporte.
- En 2006 los ferrocarriles italianos pusieron en funcionamiento, después de largos años de trabajos, la nueva línea de 300 kilómetros por hora entre Roma y Nápoles (240 kilómetros aproximadamente). El tiempo de viaje se redujo desde 1 hora 50 minutos hasta 1 hora 35 minutos. El motivo por el que solamente se ganaron 15 minutos con la nueva infraestructura era que los accesos a Nápoles no se habían terminado a tiempo y una gran parte del tiempo ganado en viajar a 300 kilómetros por hora se pierde en el sinuoso trazado de una línea regional que los trenes emplean hasta llegar al centro de la ciudad. Con el nuevo acceso esté terminado, el tiempo de viaje será de apenas una hora, lo que es mucho más coherente con las prestaciones de la línea y de los trenes.

➢ Diversas interpretaciones de la alta velocidad

Debido a que el sistema de alta velocidad está constituido por numerosos elementos, la forma de combinarlos puede dar lugar a muy diversas maneras de concebir el sistema.

Ello es aplicable a cualquier sistema ferroviario, pero el hecho de utilizar todos los elementos a la vez, y a su máximo nivel de desarrollo, le confiere a la alta velocidad unas características especiales.

En (López Pita, 2010) puede encontrarse un completo analisis de la visión en cada uno de los países en que se han construido nuevas líneas de alta velocidad y puede apreciarse cómo estos enfoques divergentes tienen mucho que ver con la estructura territorial y demográfica del país y con las características, prestaciones y necesidades de la red ferrovaria preexistente.

Al analizar las diversas interpretaciones de la alta velocidad desde un punto de vista estrictamente comercial, se pueden ofrecer los servicios de altas prestaciones, bien como un modo de transporte posicionado como de gama alta (como es el caso de España, donde los servicios AVE fueron concebidos como productos de transporte a la imagen del avión en los años 90, de alto nivel, con azafatas, comida incluida en el precio del billete en clase preferente y club, franquicias de aparcamiento, bebidas, gratuitas, etc.); o bien pueden posicionarse como cualquier otro tren.

Y dentro de ese "cualquier" otro tipo de tren existen asimismo numerosas opciones: con o sin reserva obligatoria; limitando o no la posibilidad de que alguien viaje de pié (el primer caso correspondería a Francia, el segundo a Alemania y uno intermedio a Italia o Japón); con o sin control previo de acceso (es decir, con o sin la posibilidad de que el interventor recorra el tren pidiendo los billetes a los viajeros, lo que no ocurre en ningún otro modo de transporte), etc.

Cualquiera de las modalidades que se adopten influirá de manera directa en la forma de viajar el cliente; y sobre todo en las disposiciones logísticas que el operador (y en su caso el gestor de la infraestructura y el de las estaciones) deberá tomar para facilitar en servicio en las cabeceras de los trenes.

Otro elemento esencial es la política tarifaria, donde las opciones van desde el precio único por clase (como, por ejemplo, en Japón) hasta la mayor flexibilidad, como la que ofrece el sistema de "yield management" que emplean los ferrocarriles franceses. En cada caso se dispondrá de una forma diferente del conocimiento en tiempo real de la demanda y de la posibilidad de reaccionar ante ello, con las consiguientes repercusiones en la concepción del sistema y en su explotación.

Desde un punto de vista más técnico, la explotación de trenes de alta velocidad sobre una línea nueva de alta velocidad requiere de una minuciosa planificación y concepción de las instalaciones y de la gestión de la capacidad. No es lo mismo concebir y explotar una línea en la que todos los trenes van a circular a la misma velocidad, a intervalos cortos y sin paradas intermedias (por ejemplo, las líneas francesas, donde apenas hay vías de apartado y se dispone de muy pocos aparatos de vía) que explotar una línea donde se prevean unos trenes directos y otros con paradas (como, por ejemplo, en Japón); o bien una línea en la que quepa la posibilidad de entrar y salir de ella con cierta frecuencia (como ocurre en los casos de Alemania e Italia).

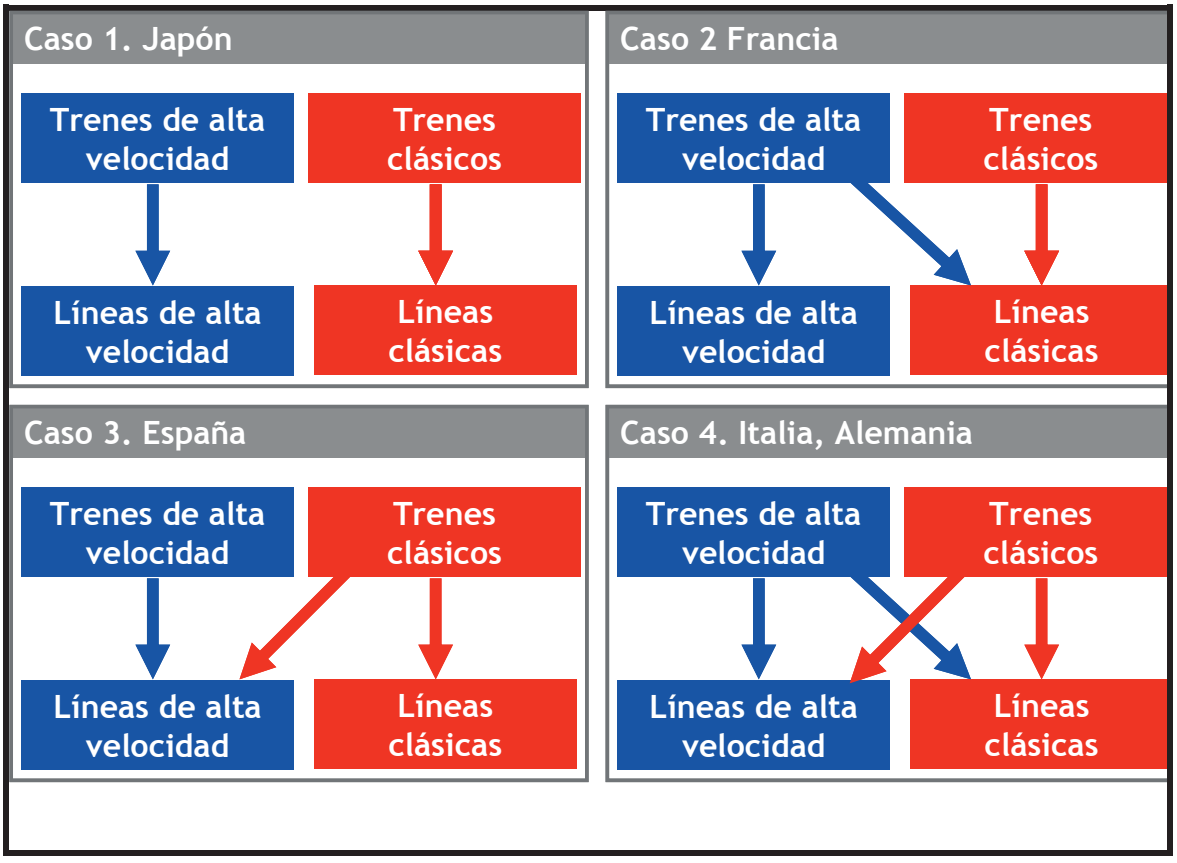
Una decisión estratégica a adoptar desde el primer momento de la concepción del nuevo sistema debe ser la definición o especificación del (o de los) tipos de tren que van a operar sobre la infraestructura. Al igual que con la cuestión de la velocidad máxima y las paradas, el explotar diferentes tipos de tren en la misma línea puede tener consecuencias en el mantenimiento, la explotación, la capacidad, etc. Sobre las nuevas líneas francesas y japonesas solamente circulan trenes de alta velocidad.

En las líneas italianas y algunas españolas se pueden encontrar además otros tipos de trenes de viajeros; en algunas líneas alemanas –en fin- circulan determinados trenes de mercancías durante la noche, y en España lo hacen en la sección entre Barcelona y la frontera francesa, así como en la línea internacional de alta velocidad de Figueres a Perpignan.

Los parámetros de concepción del trazado y de las instalaciones de vía, catenaria y señalización pueden ser muy diferentes en cada caso. Como consecuencia, la capacidad de la infraestructura será asimismo muy distinta, tanto en lo que respecta al número de trenes admitidos como en cuanto al coste de las inversiones, del mantenimiento y de los costes de explotación.

Existen también diversas formas de extender las ventajas de las nuevas líneas de alta velocidad al resto de la red, lo que da lugar a la aparición de cuatro posibles casos teóricos recogidos por (Barrón de Angoiti, 2005). (Figura 8).

Figura 8. **Diferentes forma de explotación de la alta velocidad según la combinación de trenes y líneas**



Hay varias combinaciones posibles en el uso de las líneas de alta velocidad (por trenes clásicos o de alta velocidad y para la utilización de los trenes de alta velocidad (en líneas clásicas o de alta velocidad). En esta figura, la denominación "clásico" equivale a la de "convencional".

Fuente: (Barrón de Angoiti, 2005)

1.3. Aportaciones de valor de la alta velocidad

La rápida expansión del sistema de alta velocidad en el mundo obedece al valor que ofrece a la sociedad en general y al sistema de transporte en particular. Las aportaciones de valor de la alta velocidad se pueden clasificar en dos grandes grupos, que podríamos denominar "aportaciones económico-operativas" y "aportaciones económico-sociales".

Las aportaciones de valor económico-operativas se pueden resumir en tres:

1. Al aumentar la velocidad, crece el atractivo del ferrocarril para los viajeros, ya que éstos pueden combinar las tradicionales ventajas del tren (comodidad, seguridad, libertad de movimientos) con una significativa reducción del tiempo de viaje, y normalmente con una alta frecuencia que es posible gracias al gran número de viajeros que es capaz de convocar el sistema de alta velocidad.
2. Como una consecuencia de ello, se transportan más viajeros e incluso estos viajeros podrían estar dispuestos a pagar más por el billete. A igualdad de precio, se producen crecimientos aún mayores del número de viajeros.
3. El aumento de la velocidad supone una reducción (manteniendo los demás factores) de los costes de explotación como se mostrará más adelante: para hacer el mismo servicio (en términos de capacidad ofertada y frecuencia) se precisan menos trenes; menos maquinistas y, en general menos personas que prestan servicios a bordo. Los costes de mantenimiento de las líneas y de los trenes, así como el consumo de energía son, normalmente, más reducidos.

Como consecuencia de estas aportaciones económicas y operativas, aparecen las que podríamos llamar "aportaciones económico-sociales" del ferrocarril de alta velocidad. Es importante destacar la vertiente económica de estas aportaciones de valor, pues no solo se concretan en aumento del bienestar de las personas o en el reequilibro territorial, o en redistribución de renta, sino que tienen una repercusión económica (directa o indirecta) evidente:

1. El tren de alta velocidad es capaz de reducir el tiempo de viaje de las personas, y como la reducción del tiempo de viaje se traduce en una mejora de la productividad, se convierte en valor económico-social. Por esta vía del ahorro del tiempo los ferrocarriles de alta velocidad aportan una parte significativa de sus ventajas.
2. El tren de alta velocidad (gracias precisamente a la velocidad) es capaz de captar un número importante de viajeros del avión y del coche particular, lo que hace que el tren de alta velocidad contribuya a la reducción del consumo de energía y de las emisiones del sistema de transporte, ya que el tren tiene (para el mismo recorrido) un consumo de energía y emisiones muy inferior al del avión y al coche particular. Esto es muy importante ya que únicamente con velocidades altas el tren es capaz de captar viajeros de estos modos (y normalmente mayores velocidades medias suponen mayor nivel de captación), por lo que existe una evidente relación entre el aumento de la velocidad del ferrocarril y la reducción del consumo de energía del sistema de transporte. Mientras el ferrocarril no ha sido capaz de dar un salto importante en tiempos de viaje, ha ido perdiendo cuota de mercado a favor de otros modos de transporte menos eficientes ambientalmente.

3. El tren de alta velocidad, por los motivos indicados anteriormente y porque puede ofrecer una alta frecuencia, es capaz de captar un número importante de viajeros de coche particular. Esto se traduce en una reducción de la siniestralidad del transporte y por tanto evita la pérdida de muchas vidas humanas. Nuevamente se puede comprobar que mientras el tren ha mantenido velocidades "convencionales" (hasta 160 kilómetros por hora) o incluso "mejoradas" (hasta 200 kilómetros por hora) no ha podido evitar la pérdida de sus viajeros a favor del coche particular. Solo con velocidades a partir de 300 kilómetros por hora, con altas frecuencias y una política tarifaria adecuada, el tren es capaz de captar cuota significativa del coche particular.

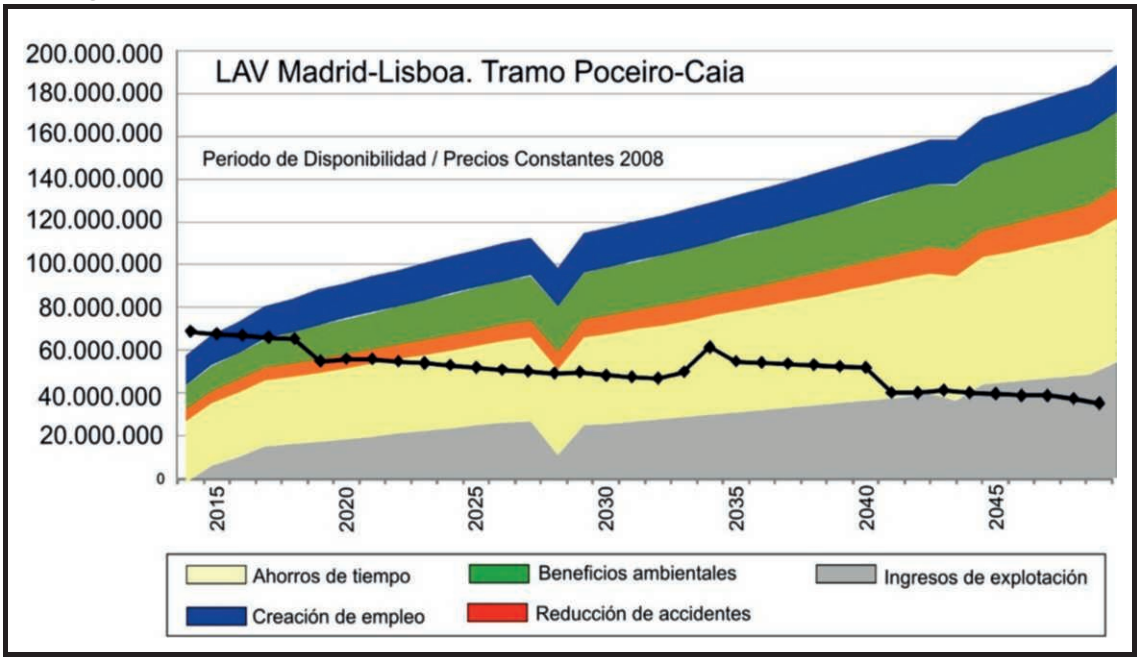
Es importante destacar que estas aportaciones de valor no se producen en todos los casos. La alta velocidad despliega sus ventajas en corredores que superan una demanda mínima, pues en ausencia de una demanda potencial o en corredores con demanda muy débil y escasa movilidad no se pueden justificar, ni aún recurriendo en la aportación de valor económico-social, las inversiones necesarias, ni se alcanzan los tamaños mínimos para el funcionamiento eficiente.

En algunos casos (Albalate & Bel i Queralt, 2010) se ha señalado la cifra de 9 millones de viajeros para que una línea de alta velocidad pueda cubrir todos sus costes; sin embargo, en el caso particular de las nuevas líneas españolas de alta velocidad (con la excepción de la de Madrid a Valladolid) que tienen una media de unos 4,8 millones de viajeros al año, han arrojado un resultado económico positivo en el año 2010, si bien hay que tener en cuenta que la construcción de las líneas españolas ha sido significativamente más barata que en otros países y además en una parte han sido construidas con fondo europeos.

1.3.1. Aportaciones al conjunto de la sociedad

Los ahorros de tiempo y las ventajas ambientales son beneficios que se obtienen con una línea de alta velocidad y cuyos valores convertidos a unidades monetarias superan con mucho a los resultados económicos de la explotación (Figura 9).

Figura 9. **Costes para el Estado frente a ingresos y beneficios sociales en una línea portuguesa de alta velocidad**



En la figura puede observarse cómo el análisis de rentabilidad social del tramo Poceira Caia de la LAV de Madrid a Lisboa, además de ser creciente en el tiempo, tiene en los ahorros de tiempo el sumando más importante.

Fuente: Carlos Fernández (2008): "O Proyecto de Alta Velocidad en Portugal", conferencia en el "I Curso de especializado en alta velocidad ferroviaria", Lisboa noviembre de 2008

Es importante remarcar que los beneficios de la alta velocidad que justifican las fuertes inversiones públicas realizadas en la construcción de las líneas (y que solo en algunos casos se recuperan íntegramente con los ingresos de explotación) son en su mayor parte beneficios sociales, no solo son beneficios económicos.

Aportación de valor y tarifas

Ello es relevante porque para que se produzcan los beneficios sociales es necesario que el tren de alta velocidad capte una parte importante de los viajeros del avión y, sobre todo, de la carretera, ya que sólo así se consiguen los beneficios sociales que justifican la construcción de la línea. En este sentido (Bustinduy, 2008) ha señalado que "de la tarifa [del servicio de alta velocidad] depende la rentabilidad social, pues cuanto mayor sea la tarifa, menor será el volumen de viajeros transportado, reduciendo su rentabilidad y los pretendidos impactos positivos en ahorros energéticos, de emisiones, de accidentes, de tiempo, etc."

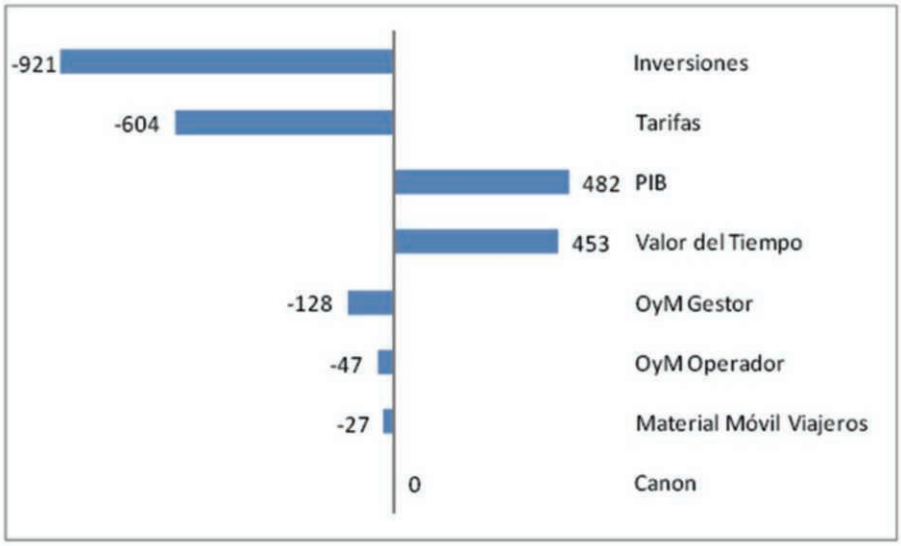
Una política de explotación de las líneas que busque maximizar el resultado económico directo (es decir, lograr la mayor diferencia entre los ingresos de explotación y los costes corrientes) no garantiza necesariamente el mayor beneficio

social, ya que para que éste se produzca es preciso captar el número de viajeros previsto.

La optimización social requiere el uso máximo de la capacidad de la infraestructura de la línea con trenes de alta capacidad, de forma que sea posible transportar el número máximo posible de viajeros.

En (Jaro Arias, 2011b) se presenta un análisis de sensibilidad del valor actual neto socioeconómico de las inversiones en alta velocidad en el que se aprecia que un aumento del 10 por ciento de las tarifas produce una reducción del 6 por ciento del VAN socioeconómico (Figura 10).

Figura 10. **Sensibilidad de Valor Actual Neto (VAN) socioeconómico de una línea con respecto a la variación de diversos parámetros, entre ellos la tarifa cobrada al viajero.**



Variación del VAN al aumentar en 1000 unidades cada variable.
Fuente: (Jaro Arias, 2011b)

Aportación de valor de los viajeros captados del coche particular

Es importante destacar que para alcanzar su punto óptimo de funcionamiento, el tren de alta velocidad debe captar viajeros de todos los modos de transporte (Tabla 5). Los efectos del trasvase de viajeros del avión son evidentes, y por ello en muchas ocasiones se fija la aviación como "vivero" fundamental de los viajeros a captar por el tren de alta velocidad. Sin embargo, la aportación de valor de un viajero captado del coche es mayor normalmente que la de un viajero captado del avión.

Tabla 5. **Efectos económico-sociales de la transferencia de viajeros de diversos modos de transporte al tren de alta velocidad**

Efecto / Viajeros captados del	Reducción de accidentes	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	Ahorro de tiempo
Avión	Despreciable	**Muy importante**	No significativo
Coche	**Importante**	**Importante**	**Importante**

Autobús	Débil	Débil	**Muy importante**

Los viajeros que dejan el coche particular y se pasan al ferrocarril de alta velocidad son los que aportan un mayor beneficio a la sociedad; en general, incluso mayor que los que se pasan del avión.

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido señala (Jaro Arias, 2011b) que [el tren de alta velocidad] debe profundizar su competitividad en los modos de transporte de la carretera, el coche fundamentalmente, pero también el autobús, pues no sólo los datos de demanda señalan un importante nicho de mercado, aún con la alta velocidad en funcionamiento, sino que los análisis socioeconómicos, identifican un claro diferencial de los ahorros a favor del viajero captado a la carretera frente al viajero captado al avión. Añade que "a nivel conjunto, el volumen total de ahorros respecto al coche es entre 4 y 8 veces superior que respecto al avión", y que "frente al coche hay ahorros [en el tren de alta velocidad] en cualquiera de los aspectos considerados, siendo 1/3 de los ahorros procedentes del tiempo y 2/3 a partes iguales entre accidentes (20%), ambientales (20%) y de funcionamiento (22-25%)" (Tabla 6).

Tabla 6. **Ahorros por viajero de la alta velocidad frente resto de modos**

Modo de origen… / Ahorro por…	Coche	Bus	Avión
Tiempo	15 - 20	30 - 35	-10/5
Accidentes	9 - 10	1 - 2	-
Costes de funcionamiento	10 - 12	-10 / -12	10-15
Ambientales	8 - 10	4 - 6	10-12
Rango	**42 - 52**	**25 - 31**	**10 - 32**
Media	**47**	**28**	**21**

Unidad: euros por viajero captado por el tren de alta velocidad

Fuente: (Jaro Arias, 2011a)

Ejemplo de evaluación del impacto económico social de la línea de alta velocidad

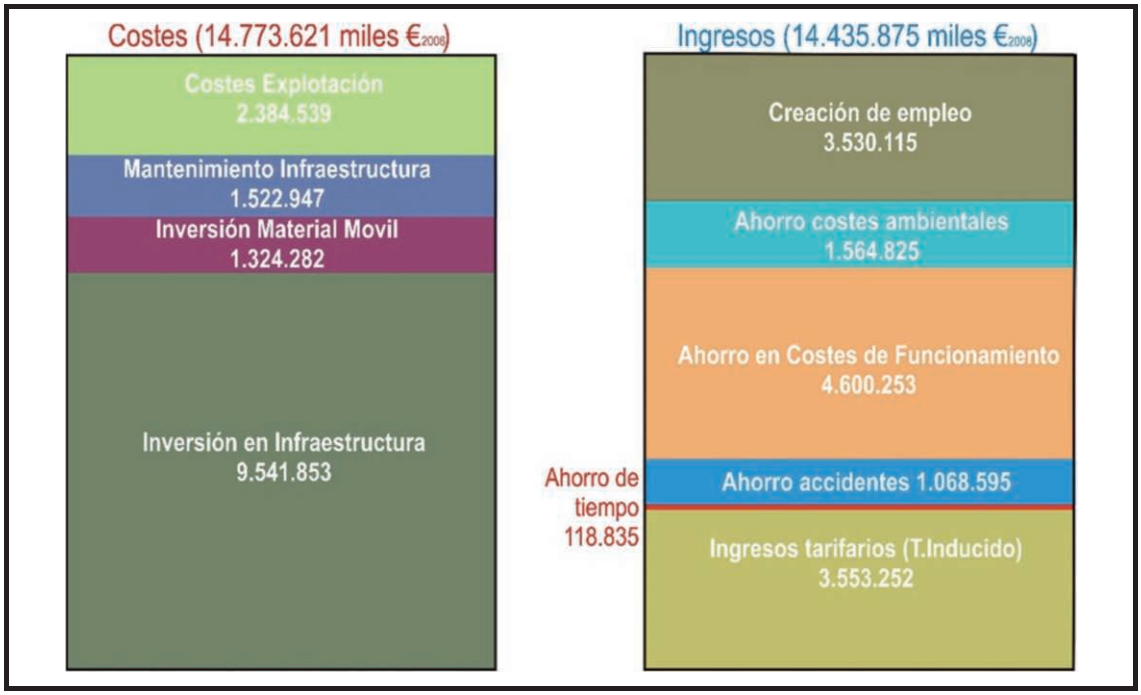
A modo de ejemplo, en el caso de la línea de alta velocidad Madrid-Levante (en servicio desde diciembre de 2010), la valoración previa de los beneficios económicos, sociales y ambientales se traducen en términos reales, en las siguientes medias anuales:

- Un ahorro de 590.000 horas en el tiempo de viaje por los usuarios de la alta velocidad ferroviaria, básicamente derivadas de la mayor velocidad frente al coche particular que dominaba el corredor.
- Una disminución anual de más de 30 víctimas mortales y 1.100 heridos de diferente consideración en accidentes de carretera.
- Un ahorro de consumo energético de más de 120 millones de litros de combustible en el tráfico por carretera y más de 25 millones de litros para el tráfico aéreo.
- Una reducción de las emisiones de efecto invernadero de aproximadamente 300.000 toneladas de dióxido de carbono.

- La creación neta media de 11.600 empleos-año directos durante los 10 años de la fase de construcción.

Como resumen de las aportaciones de valor, los sistemas ferroviarios de alta velocidad ofrecen capacidad, reducido tiempo de viaje, respeto al medio ambiente y seguridad. Todo ello en la práctica se traduce para la sociedad en una notable mejora de la sostenibilidad de la movilidad. Seguidamente analizaremos con mayor detalle las aportaciones de valor expuestas. (Figura 11).

Figura 11. **Evaluación del impacto económico-social de la LAV Madrid Levante**



Balance socioeconómico del la línea de alta velocidad Madrid-Levante (2011-2040).

Fuente: Adif, Dirección General de Planificación Estratégica (diciembre 2009), "Estudio de mercado y rentabilidad económica-social y financiera de la línea de alta velocidad Madrid-Levante".

1.3.2. El atractivo comercial de la alta velocidad

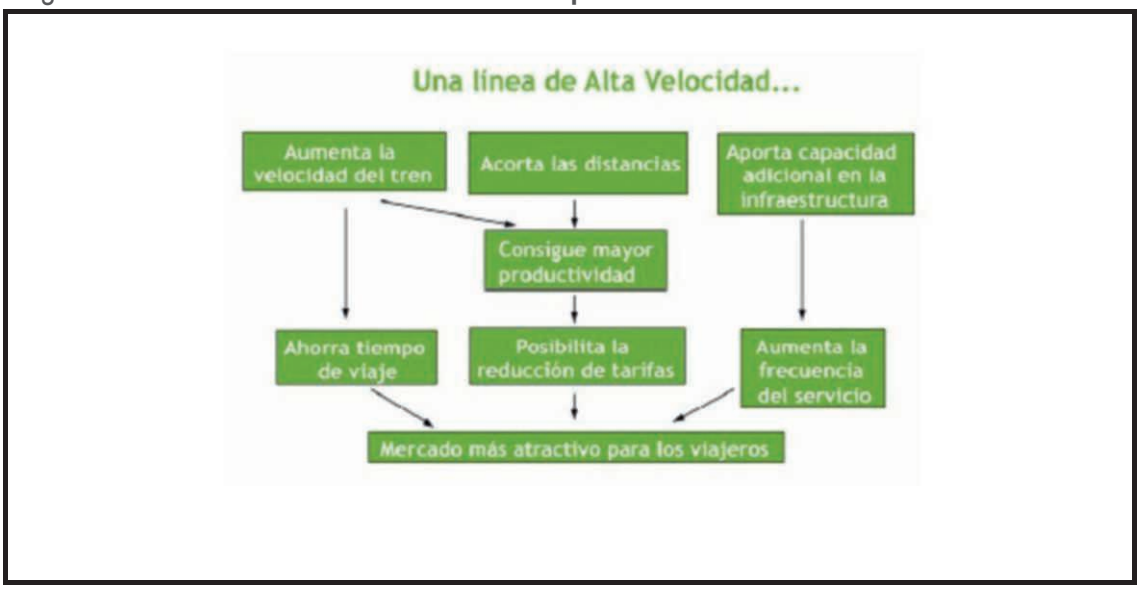
El ferrocarril, desde sus orígenes y hasta la primera mitad del siglo XX, era el modo de transporte dominante, puesto que era el único que ofrecía una alta capacidad de transporte y unos tiempos de viaje "reducidos". Después, la expansión de los otros modos de transporte, singularmente del coche particular y del avión, ofreció alternativas que hicieron perder al tren una gran parte de sus tráficos.

El tren siempre retuvo atributos relacionados con la comodidad, como la posibilidad de moverse por su interior, de aprovechar el tiempo de viaje, un mayor confort (básicamente debido a una menor aceleración centrífuga soportada por los viajeros y una mayor homogeneidad de las velocidades), etc. Sin embargo, el viaje en ferrocarril suponía una gran pérdida de tiempo para los clientes que lo utilizaban. Ello era debido, por una parte, a que las velocidades medias del tren evolucionaron lentamente y desde luego no podían competir con las del avión. Además, la reducida frecuencia del servicio ferroviario, especialmente apreciable en el caso de España (lo que a la postre supone perder tiempo "esperando al tren") también empeoraba su

posición competitiva, especialmente frente al automóvil que ofrece una disponibilidad casi permanente, lo que equivale a una "frecuencia infinita".

La reducida frecuencia del servicio ferroviario convencional tiene su origen en la debilidad de la demanda (que no propicia una elevada frecuencia), así como en algunos casos, en la falta de capacidad de la infraestructura. La construcción de nuevas líneas de alta velocidad, no solo permite reducir el tiempo de viaje, sino que aporta capacidad adicional de infraestructura, lo que se traduce en la posibilidad de implantar nuevos servicios que antes no existían, aumentar la frecuencia de los existentes, y además tiene otras ventajas indirectas como liberar capacidad en las líneas clásicas para los servicios de cercanías o de mercancías. (Figura 12).

Figura 12. **El atractivo de la alta velocidad interpretado en Francia**



La alta velocidad resulta mas atractiva para los viajeros al permitir, a la vez, ahorrar tiempo de viaje, posibilitar de reducción de tarifas y aumentar la frecuencia del servicio, según la visión de (Leboeuf, 2010)

Debe advertirse, sin embargo que el atractivo que aporta la reducción del tiempo de viaje no es lineal. Es apreciada especialmente por los viajeros de larga distancia cuando sitúa el tiempo del viaje del ferrocarril entre las dos y las tres horas: mientras los tiempos de viaje están muy por encima o muy por debajo de estos tiempos, las mejoras de la velocidad tienen poca repercusión en la cuota de mercado (especialmente en la rutas en las que existe competencia con el avión).

Se ha ido produciendo, por otra parte, un aumento del nivel de renta (que ha sido una constante en las sociedades occidentales en las últimas décadas), que ha hecho que aumente el valor del tiempo de las personas: los viajeros están dispuestos a pagar más a cambio de perder menos tiempo en las actividades no lúdicas. Ello ha perjudicado seriamente a la competitividad del ferrocarril, que ofrecía comodidad pero no era capaz de ofrecer tiempos de viaje atractivos "puerta a puerta".

Un incremento de la velocidad tiene el resultado directo de reducir el tiempo de viaje. En el caso del tren, esa reducción permite incrementar el número de viajeros por cuatro razones:

1. Le permite captar una parte importante de los viajeros del avión, ya que con la alta velocidad, en distancias de hasta 600-700 kilómetros, el tiempo "puerta a puerta" de ambos modos puede resultar semejante.

2. La velocidad atrae nuevos viajeros para los que la combinación de velocidad y precio de las ofertas existentes no resultaba atractiva, y el tren con la alta velocidad ofrece una oportunidad nueva.
3. El tren de alta velocidad puede tener menores costes de explotación. Eso permite, teóricamente (y en función del canon que se establezca por el uso de la infraestructura), fijar el umbral mínimo de los precios (que es el coste marginal) más bajo que el tren convencional, lo que aumenta el atractivo para ciertos segmentos de viajeros. El aumento de viajeros que supone la nueva velocidad (además de la posibilidad de aumentar la frecuencia) permite ofrecer trenes de mayor capacidad y obtener además un mejor aprovechamiento, lo que implica obtener, respectivamente, "economías de tamaño" y "economías de densidad".
4. Finalmente, con altas velocidades y en distancias largas (a partir de 300-400 kilómetros), el tren de alta velocidad puede ofrecer un tiempo de viaje "puerta a puerta" más competitivo que el coche, puesto que aunque la frecuencia el coche es "infinita" (y ello hace que tiempo de espera se pueda considerar inexistente), en distancias largas se diluye esta ventaja del automóvil que es compensada por la mayor velocidad del ferrocarril.

Por otra parte, y como se demostrará más adelante, el tren de alta velocidad tiene normalmente unos costes de explotación menores que los del tren convencional, lo que le permite establecer unos precios bajos (como de hecho ocurre en numerosos países) y, con ello, captar una parte de los viajeros que emplean el coche particular. Debe tenerse en cuenta que en el coche, cuyo coste marginal (que es realmente el que perciben los viajeros y el que influye en la elección del modo de transporte) es bajo, especialmente si lo utilizan dos o más personas. Esto motiva en muchos casos que se prefiera el coche a otros modos de transporte colectivos, a pesar de que ofrece tiempos de viaje superiores. La posibilidad que tiene el ferrocarril de alta velocidad de establecer precios atractivos le abre la oportunidad de competir en estos segmentos.

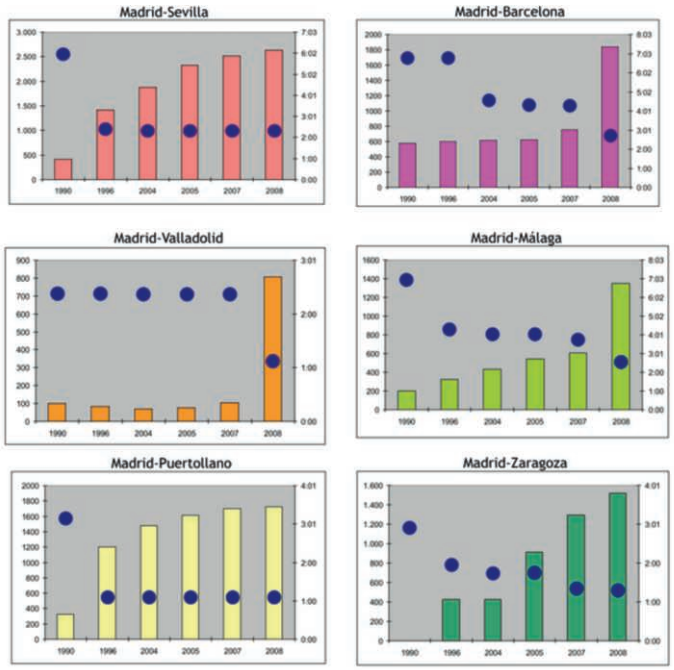
No linealidad de la relación entre los viajeros del ferrocarril de alta velocidad y su velocidad

Es importante mencionar un hecho de la mayor importancia en lo que se refiere a la relación entre la velocidad comercial del tren y el número de viajeros que es capaz de captar. Esta relación no es lineal y aunque en general se produce un incremento del número de viajeros al aumentar la velocidad solo cuando se consiguen tiempos de viaje por debajo de las tres horas se aprecia un incremento importante en el numero de viajeros.

Este hecho ya se apreció en Francia después del proceso de modernización y adaptación de las líneas a 200 kilómetros por hora. Así, como señala (López Pita, 2010), en la ruta de París a Burdeos el 1979 el ferrocarril ofrecía un tiempo de viaje de 3 horas y 50 minutos, lo que proporcionaba para los 581 kilómetros que las separaban una casi increíble velocidad comercial de 152 km/h para una línea construida en el siglo XIX. A pesar de este nivel de prestaciones, en los años siguientes (1979-1985) el tráfico por ferrocarril permaneció estancado, mientras que trafico aéreo duplicaba su volumen de viajeros", y ello a pesar de que el avión presentaba una tarifa netamente superior a la ofrecida por el ferrocarril. Sin embargo, en las nuevas líneas de alta velocidad sí se alcanzaron incrementos importantes del número de viajeros, que se multiplicaron por 1,8 entre 1981 y 1988.

La figura 13 proporciona, para algunas rutas españolas, con y sin servicios de alta velocidad, la evolución del tráfico de viajeros por ferrocarril en el periodo 1990-2008 en relación con la evolución del tiempo de viaje en la ruta respectiva.

Figura 13. **Evolución del número de viajeros y del tiempo de viaje desde Madrid a diferentes destinos con y sin alta velocidad**



Como puede observarse, las reducciones de tiempo de viaje derivadas de la puesta en servicio de líneas o tramos de alta velocidad se traducen en incrementos de número de viajeros. Puede también observarse) que el incremento es modesto cuando el tiempo de viaje se reduce al entorno de las cuatro horas, pero pasa a ser muy importante cuando baja de tres horas (véanse al respecto los casos de Málaga o Barcelona).

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3. El aumento de viajeros y de las percepciones económicas

Parece necesario hacer una rápida incursión en la teoría económica para recordar que cualquier comprador busca maximizar el valor que percibe ("utilidad") y minimizar el coste o el esfuerzo que debe realizar ("desutilidad"). La conocida "ley de la demanda" muestra que cuanto mayor es la desutilidad (asociada generalmente al precio), menor es la demanda (es decir, la cantidad consumida) del bien o servicio, y viceversa

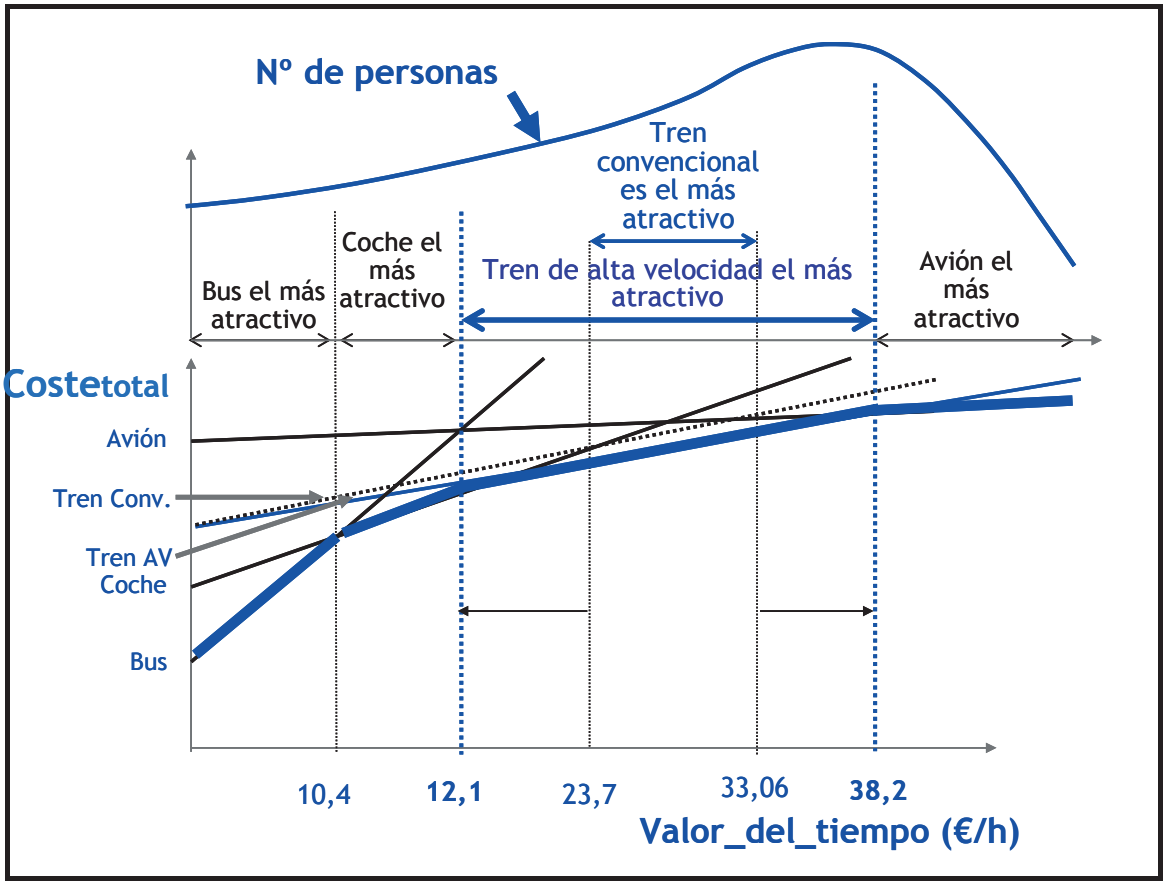
Así, en general, cuando se compra un bien o servicio concreto, el comprador busca el precio más reducido para ese bien. Un aumento de calidad o de las prestaciones del bien o servicio puede traer consigo un aumento del precio, ya que al obtener más a cambio de su dinero, el comprador está dispuesto a "sacrificar" más dinero.

En el transporte de viajeros existe un factor diferencial y de la máxima importancia: para trasladarse de un lugar a otro, el viajero no sólo debe pagar el precio del billete

(y otros costes monetarios asociados) sino que además debe "aportar" su propio tiempo. Las personas perciben que su tiempo tiene un valor, e implícitamente (de forma inconsciente en la mayor parte de los casos) lo "monetarizan" o lo convierten en equivalente a dinero. Es decir, se comportan como si razonaran, por ejemplo, que estarían dispuestos a pagar por un servicio de transporte veinte euros más si el tiempo del viaje se redujera una hora. En ese caso, están atribuyendo implícitamente un *valor a su tiempo* de veinte euros por hora.

En definitiva, los viajeros (como todos los compradores) están dispuestos a comprar más (en este caso, a viajar más) si se reduce la "desutilidad", o el coste que deben soportar. El coste total (también llamado "coste generalizado") incluye, en el caso del transporte, no solo el precio del billete y otros costes monetarios (como desplazamientos a las terminales, comidas, etc.); sino también el "tiempo de viaje" (que se reduce al aumentar la velocidad); y el "tiempo de espera" (que disminuye al aumentar la frecuencia) (Figura 14).

Figura 14. **"Coste generalizado" en diversos modos de transporte en función del valor del tiempo. Efecto en la competitividad del tren de un aumento de su velocidad**



El modelo del coste generalizado explica que cada persona (que tiene un "valor del tiempo" diferente del de las demás personas) escoge el modo de transporte que le supone menor coste total o generalizado. El coste total o generalizado tiene una parte fija (independiente del valor del tiempo) que es el coste monetario (precio del billete, básicamente), y además hay que sumar el coste del tiempo sacrificado. El coste del tiempo, para cada persona es el producto del tiempo empleado para el desplazamiento (que depende de la velocidad) por su "valor del tiempo". En la gráfica puede verse cómo (con el mismo precio) el tren de alta velocidad es más atractivo y capta mas viajeros que el tren convencional. Un aumento de su velocidad permite aumentar el número de personas para las que es el modo de menor coste generalizado.

Fuente: Adaptado de (García Álvarez, 2009).

Ello supone que si el tiempo de viaje se reduce (por ser mayor la velocidad del servicio) el viajero sufre un menor sacrificio o tiene un menor "coste generalizado" por viajar, por lo que (a igualdad del precio) aumenta el número de viajeros. También puede ocurrir que la reducción del tiempo venga acompañada de un aumento del precio; en este caso, lógicamente, el aumento de viajeros será menor que en el caso de que el precio se mantenga o incluso se reduzca.

Puede suceder que para algunos viajeros el aumento del precio sea menor que el valor de la reducción del tiempo, por lo que viajan más. Para otros viajeros puede que sea igual, en cuyo caso el número de viajes es el mismo. Finalmente, para ciertos pasajeros, el aumento del precio será mayor que el valor de la reducción del tiempo, en cuyo caso se reduce el número de viajes.

➢ El efecto de la velocidad para los diferentes valores del tiempo

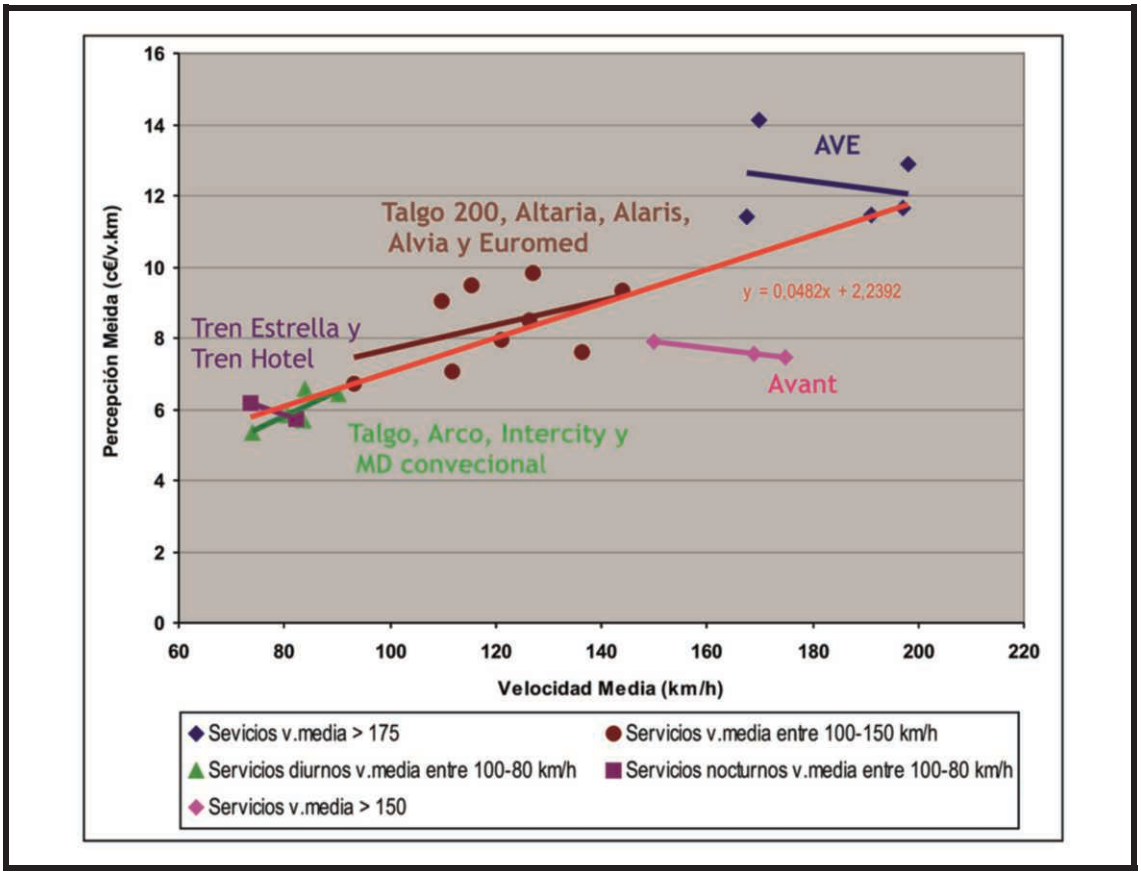
Para cada persona el *valor del tiempo* es diferente (es decir, cada persona está dispuesta a pagar cantidades diferentes por una reducción del tiempo de viaje de una hora). Por ello, una misma reducción del tiempo de viaje, y un mismo precio nuevo puede provocar los tres efectos descritos a la vez.

Para comprender mejor la cuestión supongamos que un servicio ferroviario tiene un tiempo de viaje inicial de tres horas y un precio de 50 euros. Se produce una mejora de la velocidad que conduce a un nuevo tiempo de viaje de dos horas (con reducción de una hora) y, a la vez, se aumenta el precio del billete en 20 euros, fijándose en 70 euros. Entre los viajeros, anteriores o potenciales, pueden presentarse tres casos:

1. Habrá personas que tienen un "valor del tiempo" muy bajo. Para ellas, probablemente el aumento de precio sea mayor que el valor del tiempo que se reduce (por ejemplo, para las personas cuyo valor del tiempo es de 10 euros por hora, el coste anterior era de 50 euros y tres horas, es decir, de 80 euros; y el coste nuevo es de 70 euros y dos horas, es decir, de 90 euros). Para estas personas, el viaje les resulta ahora más caro (tiene mayor "desutilidad") y por ello, no viajan en el tren. Esto explica que cuando los precios del tren de alta velocidad son altos se expulsan viajeros hacia la carretera (tanto hacia el autobús como hacia el coche particular), por su menor coste económico, aunque tengan un mayor tiempo de viaje.
2. En el caso de las personas cuyo "valor del tiempo" coincida exactamente con el valor del tiempo ganado (en este caso con un valor del tiempo de 20 euros por hora), el coste generalizado (la "desutilidad") del viaje no cambia, y por ello la demanda no experimenta variación alguna.
3. Para las personas con un "valor de tiempo" muy alto, el aumento del precio puede ser menor que el valor del tiempo ahorrado, y por ello aumenta el número de viajes. En el ejemplo, para una persona con valor del tiempo de 30 euros por hora, el coste anterior será de 50 euros y tres horas, es decir, de 140 euros; y el nuevo coste es de 70 euros y dos horas, es decir, de 130 euros. Siendo ahora menor coste que soportan, aumenta el número de viajes que realizan. Este es normalmente el caso de los viajeros del avión, que se caracterizan por tener un alto "valor del tiempo", y que por ello pueden pasar al tren de alta velocidad, incluso con precios altos de éste.

En la práctica, la reducción de los tiempos de viaje que supone la alta velocidad suele venir acompañada de un aumento del precio de los billetes, lo que es compatible con un aumento, normalmente importante del número de viajeros. Ello significa que en la realidad los trenes de alta velocidad permiten aumentar el tráfico y, a la vez, aumentar el precio pagado por los viajeros (Figura 15).

Figura 15. **Relación entre la percepción media y velocidad media por productos de transporte por ferrocarril en España en 2007**



Valores de la percepción media (en céntimos de euro por viajero kilómetro) en diversos trenes en españoles en función de su velocidad media. De la ecuación de la línea de ajuste puede deducirse que, aproximadamente, por cada 20 kilómetros por hora de incremento de velocidad media, la percepción media aumenta 1 céntimo de $euro_{07}$.

Fuente: (García Álvarez & Luceño Ramos, 2011)

Y esto implica que, en términos económicos, el excedente que produce la velocidad (que coincide con el valor del tiempo ahorrado por los viajeros), se reparte en la realidad entre el operador (en forma de precios más altos) y los viajeros (que aún así, en general, tienen un menor coste total por su viaje y aumentan la demanda de viajes.)

Otro fenómeno importante de la reducción de los tiempos de viaje es el del "efecto umbral", por el cual se puede cambiar la concepción del viaje. Partiendo del principio de que un desplazamiento de ida y vuelta durante el día puede admitirse con un tiempo de viaje de menos de tres horas por sentido (algo más en algunos casos), si el ferrocarril es capaz de ofrecer un tiempo inferior podrá competir con el avión. En caso contrario, para competir con el avión deberá poder ofrecer unas condiciones globales de viaje (precio, valor añadido, etc.) que le hagan compensar los costes de alojamiento, comidas, etc., además del hecho de pernoctar fuera de casa.

1.3.4. Trazados más cortos entre los mismos puntos

Muchas de las ventajas económicas y ambientales del sistema de alta velocidad se derivan del hecho de que, en la mayor parte de los casos, las distancias de las líneas

de alta velocidad son menores que las de las líneas convencionales entre los mismos puntos. Ello es una de las características "intrínsecas" del sistema de alta velocidad.

Y si entre los mismos puntos la distancia es menor, el consumo de energía será menor en esa misma proporción, a igualdad de todos los demás factores. Lo mismo ocurrirá con los costes de mantenimiento de los vehículos y los propios de mantenimiento de la infraestructura: se reducirán conforme lo haga la distancia por la línea de alta velocidad con respecto a distancia por la línea convencional.

Las razones por las que los trazados de la alta velocidad son más cortos que los de las líneas convencionales tienen que ver con la necesidad de trazados rectos para poder desarrollar las altas velocidades. Cuando, en el siglo XIX, se construyó la mayor parte de la red ferroviaria clásica, la estrategia para salvar las cordilleras era rodearlas para así buscar los puntos de cota mínima y trazar unas pendientes con gradientes relativamente modestos: las máquinas de vapor no podían superar rampas demasiado fuertes. Con esas condiciones, los trazados normalmente zigzagueaban siguiendo las curvas de nivel, y la longitud de la línea aumentaba con cada giro. Incluso en terrenos suaves, las curvas de 300 o 400 metros de radio (que solo permitían 80 o 90 kilómetros por hora) eran frecuentes para adaptarse mejor a la orografía.

Un buen ejemplo lo tenemos en los pasos ferroviarios de la Sierra del Guadarrama. Los del siglo XIX por La Cañada y Tablada dan grandes rodeos antes de llegar a Ávila y Segovia respectivamente; tienen túneles relativamente cortos y situados en cotas elevadas. El paso de la línea Madrid-Burgos, diseñado ya en el siglo XX, supone un túnel largo (el de Somosierra) que hace posible un recorrido relativamente más directo. Finalmente, los túneles de base de Guadarrama (de 29 kilómetros) en la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid permiten que la distancia de Madrid a Segovia sea de tan solo 68 kilómetros, muy inferior a los 102 kilómetros del ferrocarril del siglo XIX e incluso a los 96 kilómetros de la carretera.

Un detallado estudio de las distancias por ferrocarril en España se encuentra en la Nota Técnica EnerTrans/5 "Estudio sobre las variables que influyen los incrementos de recorrido e incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario" (García Álvarez & Fernández González, 2007). Los principales resultados se sintetizan en la tabla 7 y se muestran gráficamente en la figura 16.

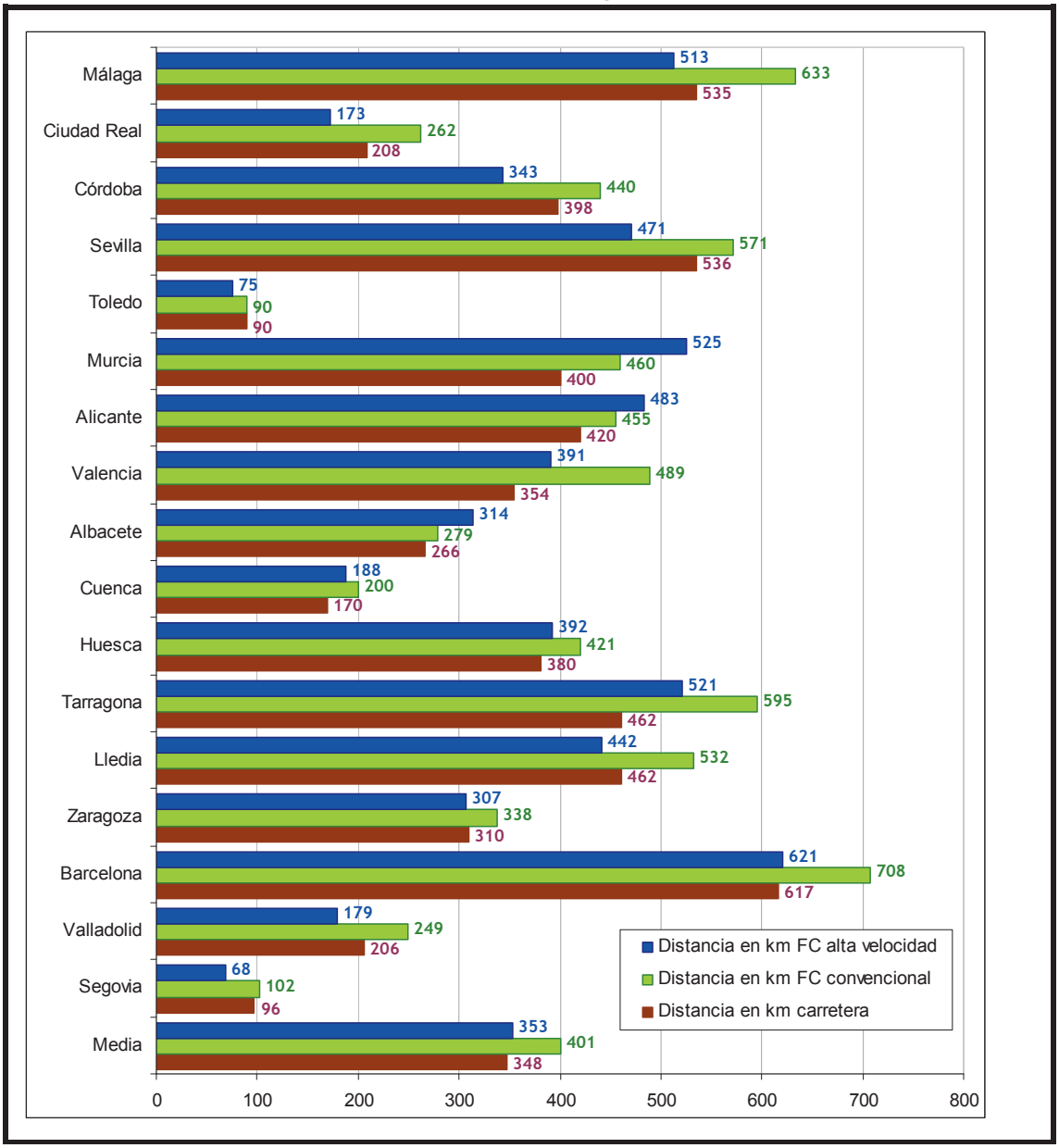
Tabla 7. **Distancias entre Madrid y otras ciudades por diferentes modos de transporte: ferrocarril alta velocidad, ferrocarril convencional y carretera**

	Distancias				Coefientes de trayectoria			
Madrid a	Desplazamiento	Distancia Carretera	FC Convencional	FC LAV	CT av	CT FC convencional	FCav /FConv.	FCav/ Carret.
Segovia	63,0	96,0	101,6	68,3	*1,08*	*1,61*	*0,67*	*0,71*
Valladolid	153,0	206,0	249,4	179,2	*1,17*	*1,63*	*0,72*	*0,87*
Barcelona	502,3	617,0	708,0	621,0	*1,24*	*1,41*	*0,88*	*1,01*
Zaragoza	260,0	309,8	338,0	306,7	*1,18*	*1,30*	*0,91*	*0,99*
Lledia	370,0	461,6	532,0	442,0	*1,19*	*1,44*	*0,83*	*0,96*
Camp de Tarragona	410,0	461,6	595,0	521,0	*1,27*	*1,45*	*0,88*	*1,13*
Huesca	320,0	380,4	421,0	392,0	*1,23*	*1,32*	*0,93*	*1,03*
Cuenca	130,0	169,8	200,0	188,1	*1,45*	*1,54*	*0,94*	*1,11*
Albacete	221,8	266,0	278,7	314,0	*1,42*	*1,26*	*1,13*	*1,18*
Valencia	301,2	354,0	489,1	390,8	*1,30*	*1,62*	*0,80*	*1,10*
Alicante	360,0	420,0	454,7	483,0	*1,34*	*1,26*	*1,06*	*1,15*
Murcia	350,0	400,0	459,9	525,0	*1,50*	*1,31*	*1,14*	*1,31*
Toledo	66,2	89,6	90,2	75,2	*1,13*	*1,36*	*0,83*	*0,84*
Sevilla	387,0	535,8	571,0	470,5	*1,22*	*1,48*	*0,82*	*0,88*
Córdoba	277,0	398,4	440,0	343,0	*1,24*	*1,59*	*0,78*	*0,86*
Ciudad Real	150,0	208,3	262,0	173,0	*1,15*	*1,75*	*0,66*	*0,83*
Málaga	393,0	535,3	633,0	512,9	*1,31*	*1,61*	*0,81*	*0,96*
LAV 1					*1,13*	*1,62*	*0,70*	*0,79*
LAV 2					*1,22*	*1,38*	*0,88*	*1,02*
LAV 3					*1,40*	*1,40*	*1,01*	*1,17*
LAV 4					*1,21*	*1,56*	*0,78*	*0,87*
Coefiente de trayectoria estático medio					***1,26***	***1,47***	***0,87***	***1,00***
Coefiente de trayectoria efectivo medio					***1,27***	***1,45***	***0,89***	***1,02***

Comparación entre las distancias por línea de alta velocidad, por línea ferroviaria convencional, en línea recta ("desplazamiento") y por carretera en las rutas españolas de alta velocidad. Fuente:(García Álvarez & Fernández González, 2008)

En la tabla puede observarse que en España, las líneas de alta velocidad tienen un recorrido medio menor en un 13% que el de las líneas ferroviarias convencionales entre los mismos puntos si se mide en términos estáticos (como media simple de los coeficientes de las rutas). Esta diferencia es del 12% si se mide el *coeficiente de trayectoria efectivo* (es decir, ponderando los coeficientes por los viajeros.kilómetro previstos en cada ruta).

Figura 16. **Distancias entre Madrid y otras ciudades por diferentes modos de transporte: ferrocarril de alta velocidad, ferrocarril convencional y carretera**



Fuente: (García Álvarez & Fernández González, 2008)

Se aprecia que en algunas rutas, como la de Madrid a Segovia, la distancia por línea de alta velocidad llega a ser inferior en un 23 por ciento, y solo en algunas rutas hacia Levante (Albacete, Murcia, Alicante) es mayor en alta velocidad, aunque en este caso ello es debido a la peculiar topología troncal de este árbol de nuevas líneas.

1.4. Evaluación cuantitativa de la aportación de valor del sistema de alta velocidad

La Unión Europea recomienda la realización análisis coste-beneficio para algunos de los proyectos que requieren su co-financiación. Según la "Guía ACB de la UE", el Análisis Coste-Beneficio es obligatorio para todos los grandes proyectos que son aquellos en todos los sectores, salvo el medio ambiente, cuyo coste de inversión supera los 50 millones de euros. Entre las evaluaciones posibles se plantean cuatro valoraciones monetarias y una valoración cualitativa, integrada por diversos indicadores. Estas evaluaciones son:

1. Evaluación financiera para el administrador de la infraestructura
2. Evaluación financiera para la empresa Ferroviaria
3. Evaluación financiera conjunta (administrador y empresa ferroviaria)
4. Evaluación económico-social, en términos monetarios y cualitativos.

En cada uno de ellos, se comparan dos escenarios: uno con la nueva infraestructura en funcionamiento, y otro con la "situación tendencia" que se produciría previsiblemente sin la construcción de la nueva infraestructura.

Cada una de estas parejas de balances consideran los costes e ingresos en el momento temporal en el que se producen; y analizan el resultado a través de las técnicas económicas del "valor actual neto" (la inversión sería interesante si el valor actual neto –VAN- de los flujos de fondos descontados con una tasa determinada resulta positivo); o de la tasa interna de rentabilidad –TIR- (la inversión sería interesante si dicha tasa alcanza el valor deseado).

La abundante investigación y los numerosos estudios sobre la materia se han concretado en diversos manuales o documentos-guía para realizar la valoración de las inversiones. Vase, por ejemplo, el documento "Rail Pag" (Steering Committee for the Transport Infrastructure Needs Assessment, 2004).

En general, todos ellos tienen en común incluir los análisis del efecto financiero y del económico social, y hacerlo con técnicas de VAN y de TIR, pero en cada uno en los se abordan con detalle (y en ocasiones con diferente enfoque) materias tales como el plazo de análisis, y –muy relacionado con ello- el tratamiento del valor residual; la conveniencia del uso de "precios sombra" (y en su caso la forma de determinarlos); la toma en consideración de las subvenciones a la construcción, del IVA, etc.

Sin embargo, casi todos emplean valores medios (o en algunos casos "bandas"), tanto para estimar los costes de explotación como el consumo de energía y de las emisiones que se imputan al sistema de transporte.

Ello sugiere que, para entornos diferentes, los valores medios que se empleaban en los modelos vigentes (obtenidos de la experiencia de construcción y explotación anterior) deben ser revisados, no tanto en lo que se refiere a su cuantía, sino en cuando a su variabilidad en función de la velocidad y de las características de la propia infraestructura y de la explotación.

Una las mayores aportaciones de valor de la alta velocidad procede de los ahorros netos de tiempo de viaje que se calculan como diferencia entre el tiempo de viaje en situación de referencia para su desplazamiento en el modo utilizado en ese supuesto,

y el tiempo de viaje en ferrocarril utilizado para su desplazamiento si se construye la nueva línea. Por último, se multiplican los ahorros obtenidos (en unidades de tiempo, por ejemplo, en horas) por un valor monetario por unidad de tiempo (euros por hora).

En España (Ministerio de Fomento, 2008) utiliza en la evaluación de inversiones los siguientes *valores de tiempo* para el año 2007: Viajes por motivo de trabajo y negocios: 28,63 euros por hora; Viajes por otros motivos, 17,44 euros por hora. Estos valores del tiempo se deben incrementar a lo largo del periodo de evaluación, suponiendo que crecen al mismo ritmo que la renta real per cápita. Otros estudios recomiendan realizar un análisis de sensibilidad con elasticidades-renta que varían entre 0,7 y 1 (Jaro Arias, 2011b).

Los valores de los costes externos que se emplean en los análisis españoles son los indicados en la tabla 8.

Tabla 8. **Valor medio de los costes externos aplicados en España en los análisis costes beneficio**

	Carretera			Ferroca-rril	Avión	Total general	Diferencias con el ferrocarril		
	Automóvil	Autobús	Moto				Automóvil	Autobús	Avión
Accidentes	25,1	3,0	236,3	1,0	0,5	27,9	14,9	2,0	-0,5
Muertos	22,1	2,7	208,5	0,9	0,4	24,7	13,2	1,8	-0,5
Heridos	3,0	0,4	27,8	0,1	0,1	3,3	1,8	0,3	0,0
Ruido	6,5	1,6	20,0	4,9	2,3	5,3	1,6	-3,3	-2,6
Polución atmosfér.	15,9	25,9	4,8	8,6	3,0	12,5	7,3	17,3	-5,6
Cambio climático									
Escen. superior	22,1	10,4	14,7	7,8	57,9	29,7	14,3	2,6	50,1
Escen. inferior	3,1	1,5	2,1	1,1	8,3	4,3	2,0	0,4	7,2
Nat+Efec Urb.	5,6	1,4	4,0	2,4	1,0	3,9	3,2	-1,0	-1,4
Natural. y paisaje	10,5	0,9	2,6	0,8	1,0	2,5	2,8	0,1	0,2
Efectos urbanos	2,0	0,5	1,4	1,6	0,0	1,4	0,4	-1,1	-1,6
Total	**75,2**	**42,3**	**279,8**	**24,7**	**64,7**	**79,3**	**41,3**	**17,6**	**40,0**

Valores en euros 2007 por cada mil viajeros.kilómetro.
Fuente: (Jaro Arias, 2011b)

Puede observarse cómo en el caso español no se distingue entre el ferrocarril convencional y el de alta velocidad, lo que supone que se le atribuyen a ambos los mismos valores de accidentalidad, efectos ambientales, etcétera.

Sin embargo, además del ahorro de tiempo de los viajeros, los sistemas ferroviarios de alta velocidad tienen menor accidentalidad que los convencionales, y (como se mostrará) normalmente tienen menores costes de funcionamiento y menores efectos ambientales, lo que aumentaría la rentabilidad económico-social del ferrocarril. De ello se desprende la necesidad de conocer con detalle las diferencias en costes externos entre el ferrocarril convencional y el de alta velocidad.

2. RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL FERROCARRIL

2.1. Transporte y energía

La necesidad de usar energía en algunas de sus diversas formas es consustancial a casi toda actividad humana, y muy especialmente a la industrial o de prestación de servicios. En el transporte en concreto, la aportación de energía es singularmente relevante por cuanto todo transporte implica movimiento de las personas y de las mercancías transportadas, y normalmente (salvo en caso del transporte por cinta o por tubería) de los vehículos de transporte. Y movimiento significa uso de energía.

Es importante reflexionar sobre el hecho de que en el transporte, además de la necesidad de energía para el propio movimiento de las personas o de las mercancías a transportar, se requiere otra cantidad adicional de energía para el movimiento y el funcionamiento de los vehículos en los que viajan las personas o las mercancías. Con frecuencia estos vehículos tienen una masa muy superior al de las personas o mercancías que transportan y por ello, el consumo[4] de energía se amplifica.

La utilización de energía supone unos efectos negativos que se analizarán con detalle seguidamente y que se pueden concretar en la contribución al agotamiento de las energías no renovables; la contribución al efecto invernadero; y la contaminación local producida por diversas emisiones del transporte. En los países que no disponen de recursos energéticos fósiles, singularmente de petróleo o de gas (como es el caso de España) el uso de energía supone generalmente la necesidad de importarla, y por ello, tiene un efecto económico negativo adicional en la balanza de pagos.

Estos efectos negativos se deberían traducir en un precio adecuado de la energía a pagar por quien la usa, y por lo tanto debería trasladarse en forma de costes a la cuenta de resultados de las empresas que utilizan la energía. Ocurre, sin embargo, que el precio de la energía no refleja en la actualidad todos los costes sociales que su uso produce, ya que algunos de los efectos negativos de la energía no están internalizados, sino que en el balance económico-social de la actividad del transporte aparecen como "costes externos" que se imputan a la sociedad en su conjunto.

El análisis de la energía utilizada por el tren de alta velocidad (como cualquier otro modo de transporte) debe partir de una reflexión sobre los efectos negativos que tiene el uso de la energía. Esta reflexión tiene como aplicación práctica la determinación de las magnitudes y unidades a emplear en el estudio de la energía.

Como los flujos de la energía son muy diversos y se producen pérdidas, emisiones y otros efectos negativos en los procesos de transporte y transformación de la energía desde las ubicaciones y formas de la energía primaria hasta el punto y vector energético de utilización, es conveniente repasar estos procesos y las pérdidas que se producen ya que toda comparación (ya sea entre diferentes modos de transporte, ya sea entre sistemas o vehículos del mismo modo de transporte) requiere la toma en consideración de todas las pérdidas y emisiones producidas "aguas arriba".

[4] Debe advertirse que, cuando en esta tesis nos referimos al "consumo" de energía, en realidad estamos aludiendo al consumo o pérdida de la utilidad de la energía o a su degradación; ya que, como enseña el primer principio de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye (y por ello, en rigor, no se consume). Si bien, como matiza el segundo principio, la entropía tiende a aumentar, es decir, disminuye con el uso la utilidad de la energía. Mantenemos sin embargo el término "consumo de energía" ya que está muy consolidado y no conduce a error; al contrario, pone de relieve el grave problema que representa en la práctica la degradación de la energía.

Seguidamente analizaremos estos procesos siguiendo la monografía (García Álvarez & Martín Cañizares, M. del P., 2009) que puede consultarse para cualquier detalle sobre los usos de la energía en el transporte.

2.1.1. Efectos negativos del uso de la energía

Los costes del uso de la energía no son sólo económicos, sino que también hay que tener en cuenta otros efectos negativos que se producen por el hecho de utilizar energía. Son los denominados "costes sociales" o "costes externos", que no son soportados por el usuario del transporte, sino por el conjunto de la sociedad.

Se pueden identificar fundamentalmente (como ya se expuso) tres tipos de costes externos o efectos negativos del uso de la energía en el transporte:

1. Contribución al agotamiento de las fuentes no renovables de energía (carbón, petróleo, gas, ...)
2. Emisión de gases de efecto invernadero (en el transporte, fundamentalmente, dióxido de carbono que procede de la combustión de combustibles fósiles). Estas emisiones son de efecto global; es decir, sus efectos negativos se despliegan por todo el planeta con independencia del lugar en el que se haya producido la emisión.
3. Emisión de otros productos contaminantes que afectan a la calidad del aire (azufre, partículas, etc.) Estas emisiones son de efecto local, ya que solo afectan a los territorios próximos al lugar en que se produce la emisión.

A la escasez de disponibilidad de recursos para hacer frente a la demanda de energía y al impacto ambiental ocasionado por los medios utilizados para su suministro y consumo. (Pérez Arriaga, Pilo de la Fuente, E., & López del Hierro Ausín, I. de L., 2009) añaden la "*enorme falta de equidad en el acceso a la energía, que constituye un elemento imprescindible para el desarrollo humano en la actualidad*".

Como indican, en el caso del transporte de viajeros, el incremento que se observa en la movilidad a medida que crece la renta va en contra de los esfuerzos de control de la explotación de los recursos no renovables, de la lucha contra el efecto invernadero y de los esfuerzos por reducir la contaminación local. Y ello es así porque para llevar a cabo el transporte –especialmente con las tecnologías actuales- es necesario sacrificar recursos naturales, que en su mayor parte no son renovables, contribuyendo de esta forma al agotamiento de las reservas de estas fuentes de energía. Además, en los procesos asociados al consumo de energía destinada al transporte se producen emisiones con costes ambientales relevantes ((Pérez Arriaga, Pilo de la Fuente, E. et al., 2009)).

La actividad del transporte es, como señala (Pérez Arriaga, Lumbreras Martín, & Equipo del Ayuntamiento de Madrid, 2009) uno de los factores de mayor peso en la falta de sostenibilidad del actual modelo de civilización, sobre todo bajo el punto de vista de utilización de recursos energéticos e impacto sobre el cambio climático. "*Y España* (añade) *es un caso paradigmático dentro de los países industrializados*".(Pérez Arriaga et al., 2009)

El agotamiento de los combustibles fósiles era (hasta el descubrimiento del problema del cambio climático), la principal preocupación en lo que se refiere al consumo de energía en general y del transporte en particular, por su vinculación al uso de petróleo.

En la actualidad, las emisiones de gases de efecto invernadero constituyen la principal preocupación, quizás con la excepción del transporte marítimo en el que el principal problema es el de las emisiones de otros contaminantes, como el azufre.

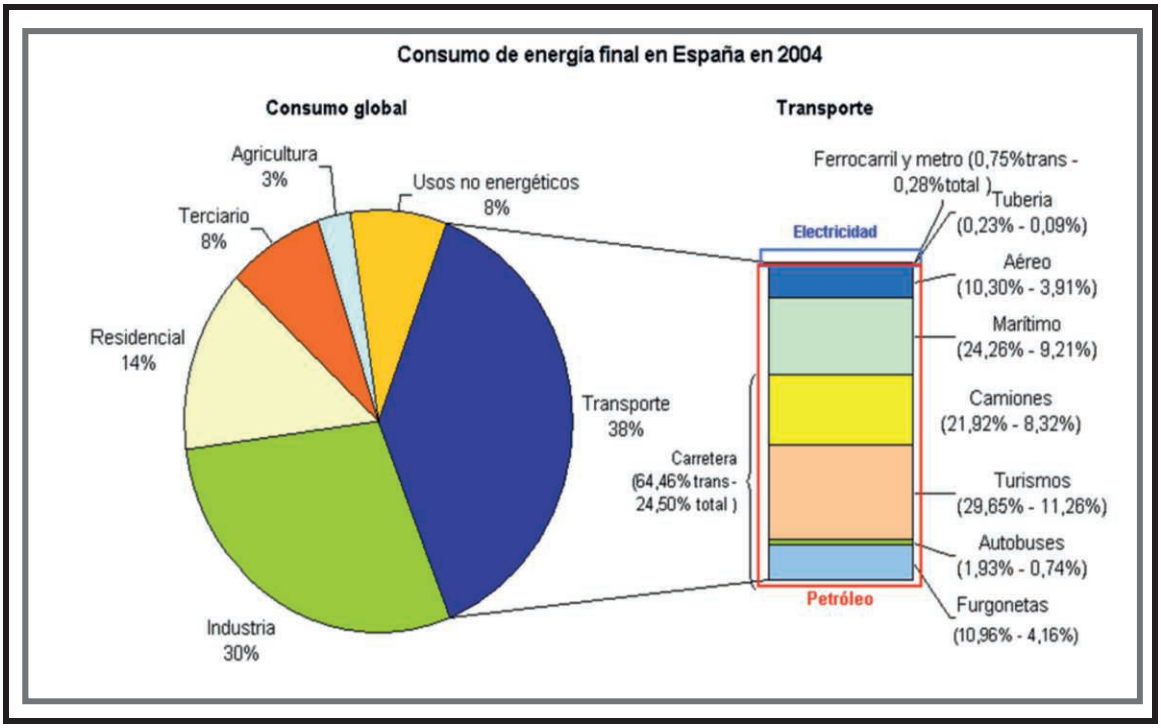
➢ Contribución al agotamiento de las reservas naturales

El transporte es uno de los principales consumidores de energía y, debido a las tecnologías que emplea y a la distribución del tráfico entre los diversos modos, emplea fundamentalmente combustibles derivados del petróleo, tanto para el transporte por carretera como para el marítimo y el aéreo. Solo el transporte por ferrocarril y el transporte por tubería emplean energía eléctrica (una parte de la cual es generada con combustibles fósiles, parte que es diferente según países y años).

En España, el 65 por ciento del petróleo importado se emplea para el transporte y el 99,4 por ciento de la energía consumida en el transporte procede del petróleo.

En concreto en España en 2004, según Ministerio de Fomento (2005), se consumieron para el transporte 46,3 millones de toneladas de derivados de petróleo y tan solo 3,3 TWh de energía eléctrica, lo que significa que la electricidad (en tera-julios equivalentes) sólo tiene un peso del 0,6% del total de la energía consumida para el transporte (Figura 17).

Figura 17. **Consumo global de energía final y en el transporte en España, por modo de transporte en 2004**



Fuente: Elaboración propia a partir del Anuario "Los transportes y los servicios postales" del Ministerio de Fomento (2005)

La demanda de energía para el transporte, sobre todo de productos derivados del petróleo, es una de las principales causas de agotamiento de los recursos naturales. El ferrocarril eléctrico y el transporte por tubería también contribuyen (aunque en menor medida) al agotamiento del carbón, del gas y del petróleo por la parte de la generación de electricidad que emplea estos combustibles. Esta parte es variable según años y países, y tiende a reducirse, pese a lo cual en el sistema eléctrico peninsular español suele estar cerca del 50 por ciento y nunca ha bajado del 40 por ciento.

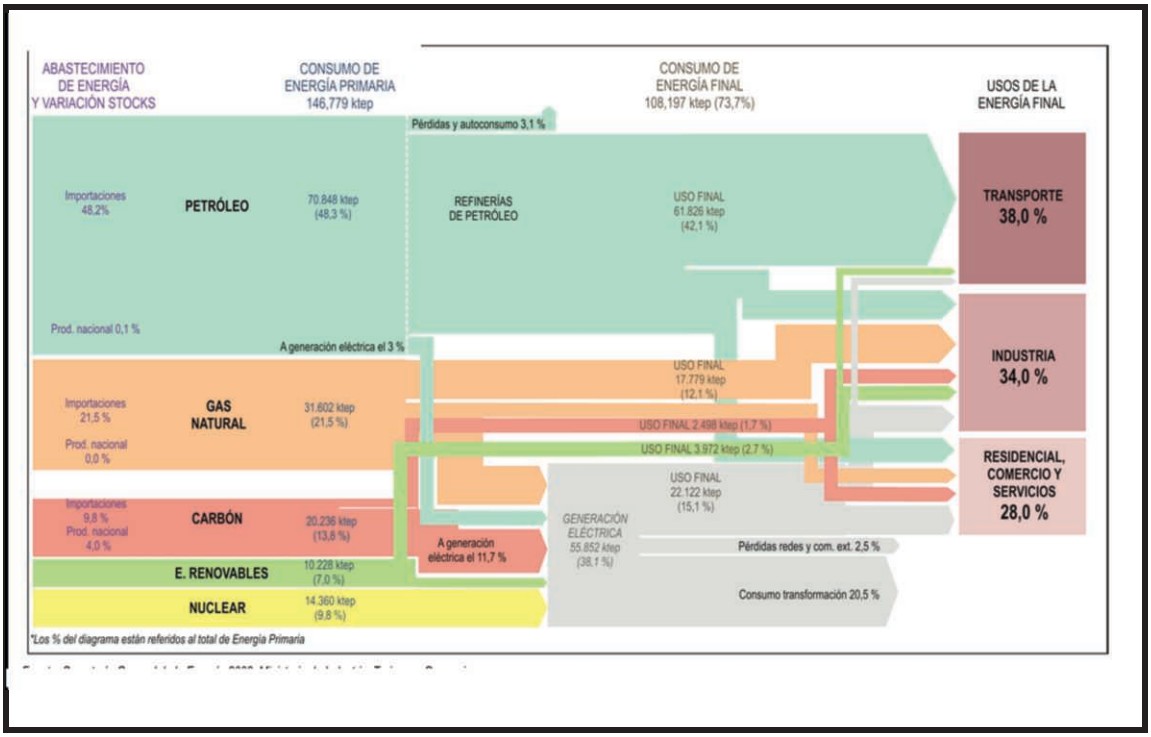
La reducción de la contribución al agotamiento de las energías no renovables puede venir, desde luego, por la disminución de la cantidad de energía consumida (ya sea

por reducción de la movilidad, ya sea por mejora de la eficiencia energética o por ambas causas). Además de ello, sólo el aumento de peso relativo del transporte realizado con energía eléctrica, la mejora del "mix" de generación de ésta y el empleo de otros tipos de combustibles pueden reducir la contribución al agotamiento de las reservas naturales. (Pérez Arriaga, Pilo de la Fuente, E. et al., 2009).

➢ Dependencia exterior

En ciertos países, como es el caso de España (Figura 18), el empleo de energía procedente de fuentes fósiles no solo tiene el efecto de contribuir a su agotamiento, sino que además le produce una fuerte dependencia del exterior (y normalmente de países poco estables) y por ello un desequilibrio en la balanza de pagos.

Figura 18. **Flujos de la energía en España en 2008**



Puede observarse cómo la mayor parte de la energía que se utiliza en España procede del petróleo (de importación) y el transporte depende casi totalmente del petróleo.

Fuente: Secretaria General de la Energía, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 2008.

En el caso de España (2007) la dependencia exterior es del 79,5 %, ya que solo produce carbón e importa la totalidad del petróleo y del gas que consume. La dependencia está muy por encima de la media europea que es del 53,6 % (Tabla 9).

Tabla 9. **Dependencia de las importaciones energéticas en 2007 en algunos países europeos**

	TOTAL	Combustibles Fósiles	Petróleo	Gas
España 2007	79,50%	66,60%	99,70%	98,90%
EU-25	53,60%	41,40%	82,90%	61,00%
Dinamarca	-25,40%	100,40%	-67,90%	-99,70%
Polonia	25,50%	-15,50%	102,20%	66,70%
Holanda	38,60%	105,30%	92,80%	-64,30%

Fuente: (European Commission, 2011)

En cuanto a los países de origen de la energía empleada en Europa, Rusia es el principal exportador de petróleo (34%), de gas (40,8%) y de carbón (26,2%).

El transporte tiene un peso muy importante en el consumo total de energía, y este peso en España es mayor que en el conjunto europeo (Tabla 10).

Tabla 10. **Consumo de energía final por sectores y subsectores en 2007 en algunos países europeos**

	TOTAL	INDUSTRIA	TRANSPORTE	Carretera	Ferrocarril	Aéreo	Naveg.interior	HOGARES Y SERVICIOS	Hogares	Agricultura	Otros
España	100	27,1	42,7	34,1	1,1	6,0	1,5	30,3	16,1	3,0	11,1
Alemania	100	27,3	29,7	24,4	0,9	4,3	0,1	43,0	28,7	1,2	13,1
Gran Bretaña	100	22,1	38,0	27,3	0,9	8,8	1,0	39,9	27,5	0,5	11,9
EU-27	100	27,9	32,6	26,7	0,8	4,6	0,5	39,5	24,6	2,4	12,5

Las cifras expresan porcentajes.
Fuente: (European Commission, 2011): "EU transport in figures: Statistical Pocketbook 2010".

➢ Emisiones de gases de efecto invernadero con ámbito global

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) produce el calentamiento global del planeta, con las consecuencias negativas que se derivan de este calentamiento.

El principal de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera por el hombre es el dióxido de carbono (CO_2) que es consecuencia de la quema de combustibles fósiles utilizados principalmente en el transporte y para la producción de energía. Además del dióxido de carbono, existen otros gases de efecto invernadero:

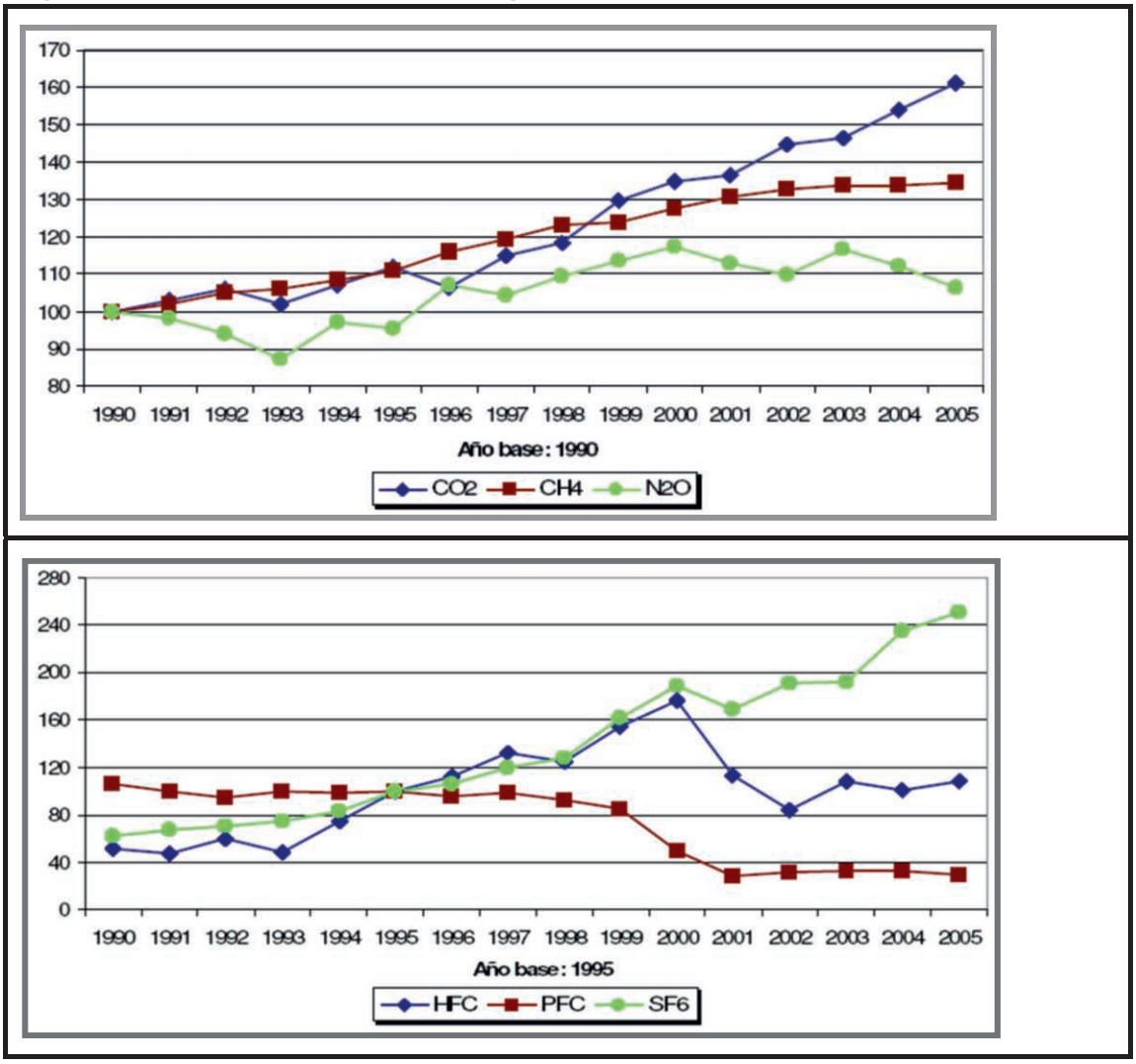
- Gases no fluorados: metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)
- Gases fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruros de azufre (SF_6).

Estos gases envuelven el planeta reteniendo la energía térmica en la capa inferior de la atmósfera terrestre. Si los niveles de estos gases ascienden demasiado, se produce un aumento global de la temperatura del aire que perturba las pautas naturales del clima con los consiguientes efectos negativos.

El dióxido de carbono en la atmósfera se ha incrementado un 34 por ciento desde la revolución industrial (finales siglo XIX) y las concentraciones de CO_2 en la atmósfera en la actualidad superan las que ha habido en los últimos 20 millones de años.

Las gráficas de la figura 19 muestran la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España en el periodo comprendido entre 1990 y 2005.

Figura 19. **Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España 1990-2005**



Fuente: (MMA (Ministerio de Medio Ambiente de España), 2007)

Las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa (EU-25) se han reducido un 8,9% entre 1990 y 2007 (pasando de 4.414 a 4.017 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono). En el mismo periodo, en España han crecido un 60,4 % (pasando de 228,4 a 366,4 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono).

En el sector transporte en Europa (EU-25) han aumentado un 25,8 % entre 1990 y 2007 (pasando de 767,5 a 966 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono) y el peso relativo del transporte en el total de emisiones ha pasado del 18,9% al 25,1%. En España, las emisiones debidas al transporte han crecido un 94,9 % (pasando de 75,1 a 146,4 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono) y la cuota de participación del transporte en estas emisiones se sitúa en el 32,5%.

Dióxido de carbono equivalente.- Cuando se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generalmente se consideran, además del dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), prescindiendo de los gases fluorados. El efecto invernadero de cada gas se mide en toneladas de CO_2 equivalente, para

cuyo cálculo se consideran los potenciales de calentamiento atmosférico siguientes: CO_2: 1; CH_4: 21; y N_2O: 310; es decir, el efecto del metano es 21 veces superior al del dióxido de carbono.

Las emisiones de gases de efecto invernadero de un determinado combustible se calculan de la siguiente forma:

$$Emisiones_GEI = \sum \left(FactorEmisión_{gas} \times PotCalentamiento_{gas} \right) \quad [4]$$

Siendo $FactorEmisión_{gas}$ las emisiones de cada uno de los gases que se emiten en la combustión y $PotCalentamiento_{gas}$ el potencial de calentamiento atmosférico de dichos gases.

En el caso del transporte, prácticamente no se emiten gases de efecto invernadero diferentes del propio dióxido de carbono. Por ello, a efectos prácticos, puede establecerse una paridad entre el CO_2 y el CO_2 equivalente.

Sin embargo, recientemente, se ha puesto de relieve la posible contribución específica de la aviación comercial en la acumulación de contaminantes derivados de su actividad y su depósito más cerca de las capas altas de la atmósfera. Se estima que a diez kilómetros de altura las emisiones de CO_2 equivalente de la aviación son tres veces más nocivas. Esta altitud se alcanza en la fase de crucero de vuelos cuyo recorrido se encuentra entre 400 y 500 kilómetros, según se indica en el documento metodológico de "Ecopassenger" (Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, 2010)

➢ Emisiones con impacto en la calidad del aire y de efecto local

Las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire (EICA) corresponden a los gases que se derivan de una combustión real. Las sustancias nocivas que se producen son:

- Monóxido de carbono (CO)
- Compuestos hidrocarburos sin quemar (HC)
- Partículas (PM) u hollín
- Óxidos de nitrógeno (NO_X)
- Dióxido de azufre (SO_2)

La emisión de estos gases tiene un efecto local; es decir, sus efectos negativos afectan a la zona próxima al punto de emisión. Por ello, tienen especial importancia y efectos negativos en el transporte urbano, ya que en este caso se emiten en entornos muy poblados y con una fuerte incidencia sobre la salud de muchas personas. Por ejemplo, las emisiones de gases tóxicos por un autobús urbano en el centro de Madrid producen más daño que la emisión de los mismos gases en una central termoeléctrica que quema fuelóleo en una zona apenas poblada y que genera la electricidad que se emplea en el Metro de Madrid. Esta es la razón por la que en muchos casos en el transporte urbano se emplean autobuses propulsados por gas natural (con menos emisiones), aún cuando el rendimiento térmico sea menos favorable que el de los motores diesel.

Especial relevancia en esta materia tienen las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO y N_2O) por los vehículos de gasóleo en las grandes ciudades. Se da la paradoja que la compra de vehículos de gasóleo está incentivada frente a los de gasolina (con un menor impuesto de matriculación) debido a sus menores emisiones de gases de efecto invernadero (y además pagan un menor impuesto de hidrocarburos). Sin embargo, los vehículos de gasóleo causan, por sus emisiones de gases de efecto local,

una profunda preocupación a los responsables de la calidad del aire de las principales ciudades españolas.

En el caso del transporte marítimo son objeto de preocupación las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire en las zonas próximas a la costa por el alto contenido en azufre de algunos de los combustibles que se emplean. Sin embargo, al tratarse de contaminantes de efecto local, las normas son más laxas en alta mar.

Efectos de las emisiones de efecto local sobre la salud

La contaminación atmosférica producida por las emisiones de efecto local del transporte y de otros emisores constituye un grave problema de salud y causa la muerte prematura de mucha personas. España se encuentra en un nivel intermedio de contaminación y pierde anualmente casi 15.000 ciudadanos de forma prematura sólo por las emisiones de las pequeñas partículas en suspensión.

En la Unión Europea cada año fallecen de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica 225.000 personas, y de la estadística del ministerio español de Medio Ambiente se deduce que fallecen en España anualmente 15.000 personas, casi cinco veces más de las que perdieron la vida en 2005 en accidentes de circulación (3.329). Estos datos revelan además que el 90% de estas muertes se concentran en las ciudades con mayor población, tráfico rodado y actividad industrial. (García Álvarez, 2011c)

2.1.2. Unidades a emplear en el estudio del consumo de energía en el transporte

La cantidad de energía primaria consumida (medida, por ejemplo, en toneladas equivalentes de petróleo –tep-, o de carbón -tec, o en terajulios) para el transporte en su conjunto o para un servicio de transporte determinando, no es actualmente un resultado relevante, ya que ese dato en sí mismo no refleja la totalidad de los efectos negativos sociales y ambientales que conlleva el uso de la energía (Figura 19). No tiene nada que ver este indicador con las emisiones de gases de efecto invernadero ni tampoco con las emisiones contaminantes de efecto local; y ni siquiera refleja la contribución al agotamiento de las fuentes de energía fósil, ya que la energía primaria incluye todas las fuentes energéticas, tanto las fósiles (con diferentes escenarios de agotamiento) como las no fósiles.

Para la misma cantidad de energía primaria consumida, los efectos negativos de su uso pueden ser muy diferentes según cuál sea su origen y cuáles los procesos intermedios que ha sufrido. Y es que, como exponen (Aparicio Izquierdo & López Martínez, 2004), “el consumo energético y las emisiones de efecto invernadero deben analizarse en un contexto global “del pozo a la rueda” (“well to tank”, WTW) para una valoración justa entre los distintos acoplamientos sistema de propulsión-combustible”.

Puesto que la energía primaria no es una buena medida de los efectos negativos del uso de la energía (pues no refleja adecuadamente las emisiones de gases de efecto invernadero, ni las de efecto local, ni el potencial agotamiento de los fósiles), es preciso buscar un indicador más adecuado.

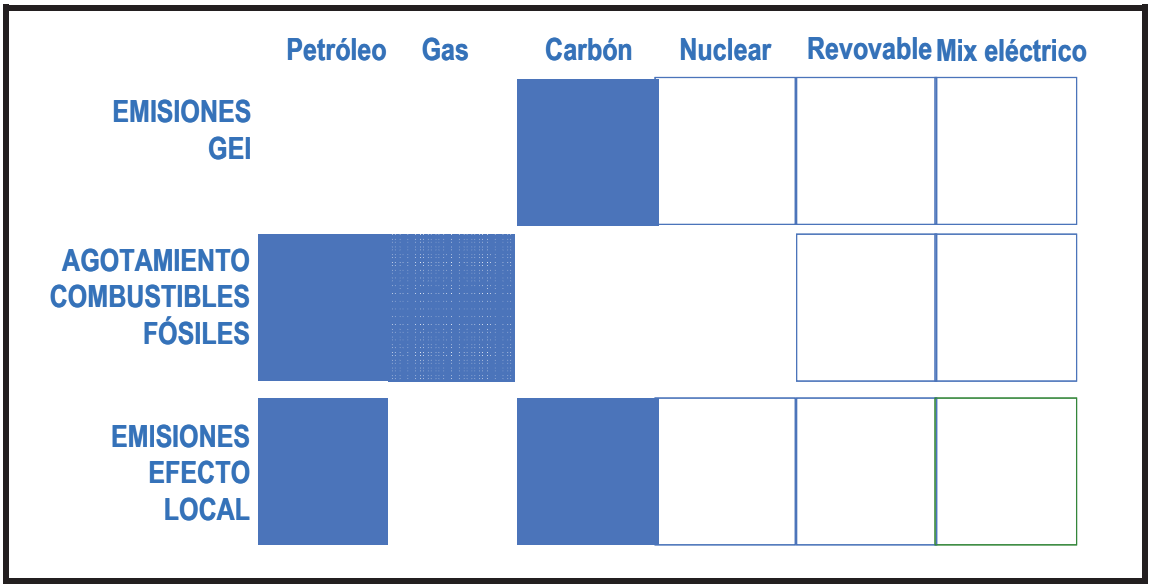
Las emisiones de gases de efecto invernadero, en concreto las emisiones de dióxido de carbono, sí que dan un mejor indicador de los efectos negativos del uso de la energía. Miden adecuadamente el más importante de estos efectos, que es la contribución al calentamiento global, y dan además indicios razonables tanto sobre las emisiones de productos contaminantes de efecto local, como sobre el

agotamiento de las energías fósiles porque son precisamente estas energías las que producen emisiones de gases de efecto invernadero.

Por lo tanto, se empleará el indicador de "kilos de dióxido de carbono equivalente" para medir los efectos negativos del uso de la energía. Para no perder información sobre la cantidad de energía empleada (debido al muy cambiante factor de emisiones) se figura como subíndice el número de gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora utilizado en la conversión.

En la figura 20 se simboliza el peso en cada uno de los efectos negativos según el tipo de energía.

Figura 20. **Efectos negativos del uso de la energía usada en el transporte según fuente primaria utilizada**



Significado: Fondo blanco: sin efecto apreciable significativo, y los distintos tonos van indicando efectos más severos al aumentar la densidad del color.

Fuente: (García Álvarez, 2010a)

2.1.3. Consumo y flujos de energía en el transporte

El transporte requiere una aportación de energía para muy diversos usos, y cada uno de ellos puede realizarse en forma de diversos vectores energéticos (gasóleo, electricidad, gas) y en diferentes lugares. En los procesos de transformación y transporte de la energía desde sus yacimientos y formas primarias hasta el vector energético oportunamente situado en su punto de empleo, producen pérdidas de energía y generan emisiones que deben tenerse en cuenta en un análisis global del fenómeno.

Por ello, parece oportuno revisar los diversos usos de la energía en el transporte (figura 20), así como los caminos que recorre y los procesos por lo que transita ésta desde sus yacimientos a los puntos y formas de uso para comprender y analizar las pérdidas y emisiones asociadas que deben añadirse en cada caso a los consumos y emisiones directamente imputables al proceso de transporte.

➢ Actividades en el transporte que consumen energía

Dentro de los procesos de transporte, se pueden distinguir tres tipos de actividades que consumen energía:

- **Construcción y mantenimiento de infraestructuras**. Es necesario el empleo de energía para la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras del transporte, ya sea caminos o terminales. En este apartado se puede incluir la energía necesaria para el movimiento de tierras, para la excavación de túneles, para el traslado de las tierras excedentes a vertederos o a puntos de aporte, para la fabricación de cemento, acero y hormigón, etc. Como estos consumos de energía son realizados por empresas constructoras dentro de su actividad ordinaria, en las estadísticas no son imputados al sector transporte, sino al de la construcción.
- **Construcción, final de vida y mantenimiento de vehículos**. Para la fabricación, desguace o reciclado y mantenimiento de vehículos también se emplea energía, incluyendo la necesaria para la extracción y elaboración de las materias primas; para la fabricación y el transporte de piezas y componentes; para el montaje del vehículo; para el transporte del mismo antes de su entrega, etc. Debe incluirse también la energía necesaria para su desguace o fragmentación final. Estos consumos aparecen estadísticamente imputados al sector industrial, con la excepción del consumo de energía de los talleres de mantenimiento de trenes, aviones y barcos, que en ocasiones se imputan al transporte.
- **Explotación del transporte**. El consumo de energía para la explotación del transporte es el que produce directamente movimiento de los vehículos y otros servicios auxiliares, tanto en los propios vehículos (calefacción, aire acondicionado, iluminación), como en la infraestructura (terminales, señalización, etc.)

Los consumos de los vehículos, tanto para el movimiento como para los auxiliares pueden ser "directos" (entendiendo por tales los producidos por un servicio comercial); o "indirectos" (los que se producen en movimientos en vacío, o en el estacionamiento de los vehículos entre servicios).

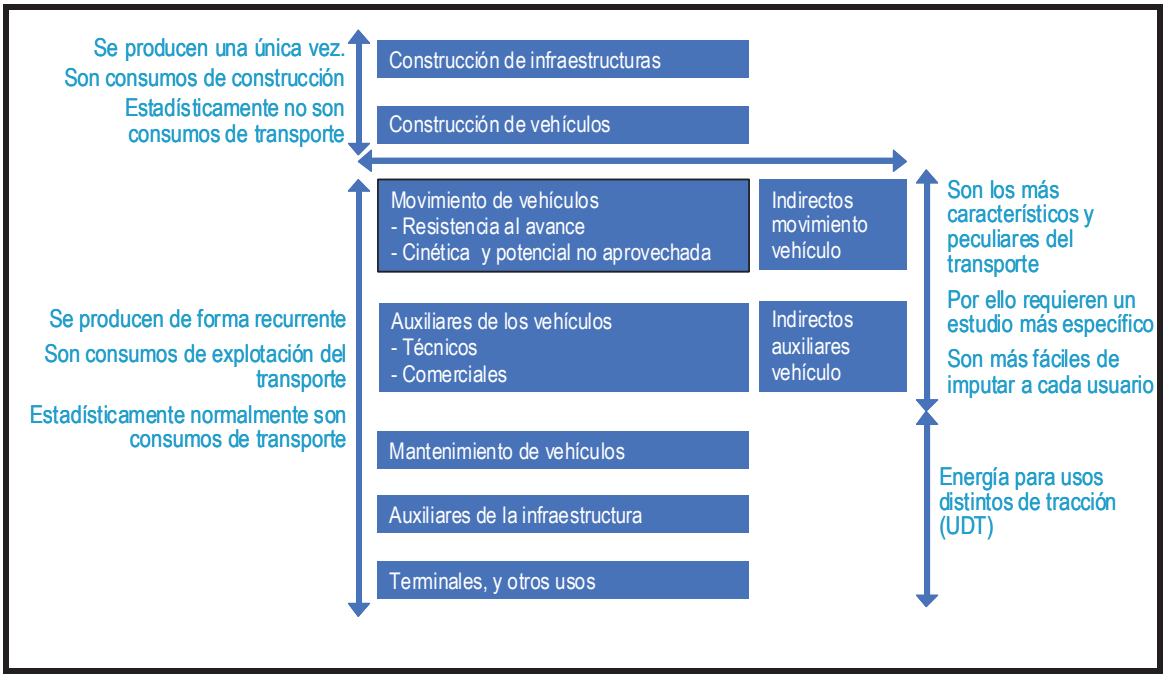
Los consumos de explotación, que se caracterizan (a diferencia de los de la construcción de la infraestructura o los de la fabricación de los vehículos) por ser recurrentes o repetitivos, y se producen en cuatro ámbitos o tipos de actividades:

- **Energía para el movimiento de los vehículos** (o para la impulsión del fluido o gas en la tubería). Esta parte del consumo de energía es la más importante cuantitativamente y la más característica del transporte. Por ello, a ella se le dedicará la mayor atención en esta tesis.
- **Energía para los servicios auxiliares de los vehículos**. Se entiende por servicios auxiliares en los vehículos, tanto que denominaremos "técnicos", que los necesarios para el funcionamiento de vehículos (ventiladores de los motores, los compresores, etc.); como los "comerciales", que son los requeridos para el confort de los viajeros o la conservación de la carga (calefacción, refrigeración, iluminación, funcionamiento de la cafetería, etc.). En el pasado, estos servicios eran muy reducidos, pero el aumento de los requerimientos de confort a bordo de los vehículos ha hecho que este consumo pase a ser significativo. El suministro de esta energía se va confundiendo cada vez más con el de la energía requerida para el movimiento de los vehículos, por lo que su estudio requiere un conocimiento adecuado de uno y otro.
- **Energía para servicios auxiliares de la infraestructura**. Incluyen, por ejemplo, los consumos de iluminación de túneles o de tramos de la vía, la calefacción de agujas del ferrocarril, los paneles informativos luminosos en carreteras, la alimentación a sistemas de señalización y comunicaciones, etc.

- **Energía para el funcionamiento de terminales y otros usos.** Se incluyen en este apartado el consumo de energía para iluminación y climatización de aparcamientos, terminales y estaciones, talleres y oficinas; y en general todos los consumos del sistema de transporte que se requieren para su funcionamiento ordinario y que no están incluidos en los anteriores. Estos consumos no tienen un gran peso relativo dentro del conjunto (con algunas excepciones como ciertos ferrocarriles metropolitanos) ni, en general, presentan rasgos diferenciales en cuanto a su gestión en el transporte respecto a otros sectores, por lo que sólo se hará mención a ellos cuando se estime que ello es relevante por alguna razón.

Los dos primeros tipos de los consumos de explotación pueden denominarse como *consumos de los vehículos* y los dos últimos como *consumos diferentes de los de los vehículos*. El consumo de energía por los vehículos (para tracción y servicios auxiliares), que impropiamente suele denominarse como "consumo de energía para tracción", supone la mayor parte del consumo energético del transporte. El resto de de los consumos de explotación suele denominarse "energía para usos distintos de tracción" (energía UDT). En la figura 21 se presentan esquematizados los diversos usos de la energía en el transporte.

Figura 21. **Usos de la energía en el transporte**



Fuente: *Elaboración* propia (García Álvarez & Martín Cañizares, M. del P., 2009)

➢ Energía necesaria para el mantenimiento y otros consumos indirectos

Además de los consumos directos de energía para el movimiento del vehículo o para alimentar sus servicios auxiliares, el uso de los vehículos de transporte produce un consumo de energía "indirecto" que no puede imputarse a un servicio concreto. Dependiendo del objeto del estudio puede ser conveniente tener en cuenta estos consumos indirectos, aplicando un coeficiente de mayoración al consumo necesario para el movimiento y los auxiliares en servicios comerciales.

Consumos de energía para el mantenimiento

Una parte de la energía que se emplea para el mantenimiento de los vehículos depende directamente de su uso. Por ejemplo, la energía necesaria para fabricar el aceite de lubricación; los neumáticos de los vehículos de carretera o las ruedas de los vehículos ferroviarios, que deben ser reemplazadas cada cierto número de kilómetros. Igual ocurre con algunos costes de mantenimiento de las infraestructuras.

Por otra parte, el uso de los talleres e instalaciones de mantenimiento es, en general, proporcional al recorrido del vehículo, por lo que el consumo de los talleres también puede ser considerado un consumo indirecto proporcional al recorrido comercial. Dependiendo del objeto del análisis, podría ser necesario añadir al consumo derivado de la circulación del vehículo los consumos energéticos marginales producidos por el mantenimiento del vehículo y en su caso, de la infraestructura.

Movimientos en vacío

Además de los consumos directos producidos por el movimiento comercial, en los vehículos existen otros consumos de explotación que no pueden imputarse directamente a un servicio concreto. Así ocurre con la energía empleada en los movimientos "en vacío" de los trenes (movimientos a talleres o garajes o puntos de estacionamiento; retornos en fechas punta, viajes de posicionamiento, etc.)

También se consume energía por los auxiliares de los vehículos cuando éstos se encuentran detenidos pero con una parte de los servicios auxiliares en funcionamiento (en limpieza, en los talleres, o simplemente en espera de un servicio).

➢ Consumo y emisiones asociadas a la fabricación de los vehículos

Se pretende dar un orden de magnitud a los valores de consumo y emisiones asociados a la fabricación y final de vida útil de vehículos para los distintos modos de transporte, de manera que los resultados obtenidos se puedan añadir, en el caso que se estime relevante, a los consumos y las emisiones generadas en la explotación de los mismos a lo largo de su vida útil y compararlos con ellos. Según (López Martínez, Sánchez Alejo, & Mora Sotomayor, 2009) en la Monografía 11 del proyecto EnerTrans (ayudados en el cálculo por la herramienta informática GaBi 4, desarrollada por la Universidad de Stuttgart) los consumos y emisiones en estas etapas pueden no ser despreciables, especialmente cuando el vehículo recorre pocos kilómetros en su vida útil. El consumo en la fabricación puede llegar a suponer más del veinte por ciento del consumo total que presenta un vehículo en la explotación durante toda su vida.

Consideramos como consumo y emisiones asociados a la "fabricación" (entendida en un sentido amplio), la suma de los consumos y emisiones producidos en las siguientes tareas:

- Producción de materiales (acero, aluminio, cobre, etc.), desde la extracción de los minerales primarios hasta su procesado en plantas.
- Montaje y ensamblaje. Incluyendo desde el transporte de los materiales a las plantas de producción hasta que el vehículo llega al operador, pasando por todos los procesos de fabricación de piezas, montaje de las piezas en componentes y montaje de los componentes en el vehículo.
- Final de vida. Comprende el transporte del vehículo al desguace y la fragmentación, en la cual se pueden reciclar los materiales.

El consumo de energía y las emisiones que se originan en la producción de los materiales son, con mucho, la parte más importante de las que se producen en la fabricación de los vehículos. Estos consumos y emisiones dependen del material

empleado: hay una gran diferencia entre la "densidad energética" del aluminio (que es el que requiere más energía), que es de 214,5 MJ/kilogramo (y se emiten en su producción 0,86 kilogramos de dióxido de carbono por kilogramo de tara), y la del acero en chapa, que es el material más empleado en muchos vehículos de transporte (27,72 kilovatios.hora por kilogramo de tara 1,82 kilos CO_2 por kilogramo de tara). Dependiendo de la composición en cuanto a los materiales de cada vehículo, se puede estimar con relativa aproximación su densidad energética que en su mayor parte (alrededor del 85 por ciento) procede de la energía incorporada en los materiales empleados en su fabricación.

➢ Flujos de energía para el transporte

El flujo de la energía, en cada una de sus formas, incluye la fuente de producción, la distribución y transporte al punto de entrega al sistema de transporte y el uso final. El conocimiento del flujo permite analizar los rendimientos y emisiones de cada uno de los procesos. El punto de suministro de la energía al sistema es relevante tanto para conocer su coste (si es preciso hacer transformaciones y transportes), como para saber qué pérdidas se incluyen dentro el sistema y cuáles se producen fuera del mismo. La estructura de producción de la energía eléctrica (en cada año y en cada país) permite conocer el consumo de energía primaria, de energías renovables, las emisiones y la contaminación, considerando el conjunto del flujo.

Este análisis del conjunto del flujo es relevante, ya que hace posible el conocimiento de los costes totales del empleo de energía en el transporte, que no resultan evidentes si sólo se analiza el coste económico y los consumos del sistema sin atender a su origen y a los procesos previos de transformación y transporte. En efecto, el rendimiento energético de la tracción eléctrica en el vehículo es mayor que en la tracción diesel y además no contamina ni tiene emisiones. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la producción de energía eléctrica requiere el empleo de cantidades variables de petróleo, carbón o gas en las centrales térmicas, resulta que este tipo de tracción sí que tiene un efecto contaminante, y que su rendimiento global en términos de energía primaria puede no ser tan diferente del de la tracción

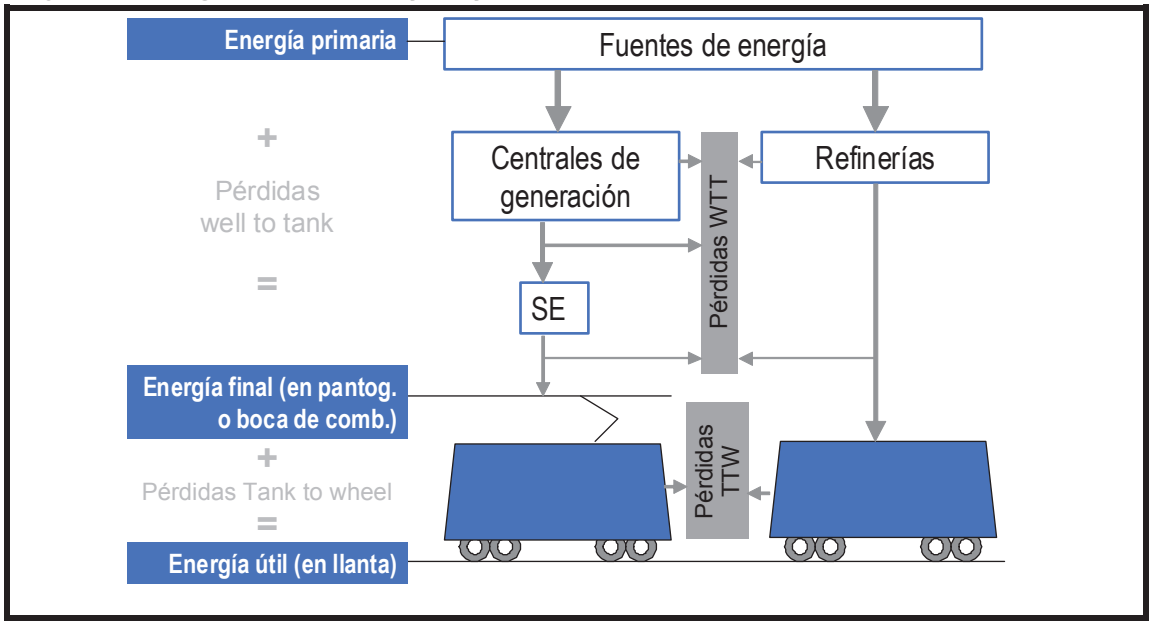
Para el análisis del consumo de energía en el transporte (en lo que se refiere a la energía consumida por los vehículos), resulta básico disponer de una visión de conjunto sobre los diferentes tipos de tracción y del suministro a los servicios auxiliares; los vectores energéticos utilizados en cada caso; y las fuentes de energía empleadas. Así se hace en (García Álvarez & Martín Cañizares, M. del P., 2009), que seguiremos para el análisis y descripción de estos flujos. Este tipo de análisis es de singular importancia por cuanto el suministro de energía es una "cadena" cuyos efectos deben analizarse en su conjunto. Así, es engañoso pensar que un vehículo es especialmente eficiente porque lo sea su sistema de propulsión si emplea un vector energético que se produce con un rendimiento muy bajo o con un nivel de emisiones alto. Ello resulta especialmente relevante cuando se compara la tracción eléctrica con la producida por los motores térmicos (diesel o de gasolina, por ejemplo). En el primer caso, los vehículos son muy eficientes, pero el rendimiento energético global se ve muy condicionado por la estructura de generación de electricidad y por las pérdidas en el transporte de electricidad. Según los casos, pueden llegar a apreciarse rendimientos globales similares en ambos sistemas.

Puntos de medida y control de la energía

Para una mejor compresión del problema, el flujo de energía consumida por los vehículos puede medirse de forma genérica para todos los modos de transporte y tipos de tracción, en cuatro "puntos de control" que, comenzado a describirlos desde el fin de la cadena (en coherencia con el enfoque "de abajo a arriba" de ese trabajo), serían los siguientes (Figura 22):

- **Energía útil**, sería la energía realmente utilizada para el movimiento del vehículo (medida en las llantas, en la hélice, en rueda o en ala); y la energía empleada para los servicios auxiliares (medida en la entrada de los equipos consumidores de esta energía).
- **Energía final** sería la energía que entra al vehículo, que es el resultado de sumar a la energía útil, la energía que se pierde en los procesos de transformación y cambio de características que se producen dentro del vehículo. Entre estas pérdidas pueden citarse las del motor, de la transmisión del vehículo, las de generación de energía embarcada, de almacenamiento, de transformación de energía, etc.
- **Energía suministrada al sistema de transporte**, que es diferente de la anterior en los casos en que se requiere un transporte o almacenamiento previo a la entrada de la energía en el vehículo (por ejemplo, en el caso de los aprovisionamientos a flotas desde depósitos centrales o de la energía eléctrica que se suministra a la compañía ferroviaria en las subestaciones de tracción). Realmente, la medida de esta energía no es relevante desde el punto de vista del consumo energético, pero sí puede serlo desde el punto de vista del coste económico soportado por el operador del transporte, ya que es la energía por la que paga, y además en muchas ocasiones es la única que puede medirse de forma fidedigna.
- **Energía primaria**: es el resultado de sumar a la energía suministrada al sistema de transporte la que se pierde en los procesos de extracción, transporte, generación (en el caso de la eléctrica) o de refino (en el caso de derivados del petróleo); y en la conversión que se producen desde las fuentes primarias hasta el punto de entrega al sistema de transporte.

Figura 22. **Energía primaria, final y útil y pérdidas**



Fuente: Elaboración propia (García Álvarez, 2010a)

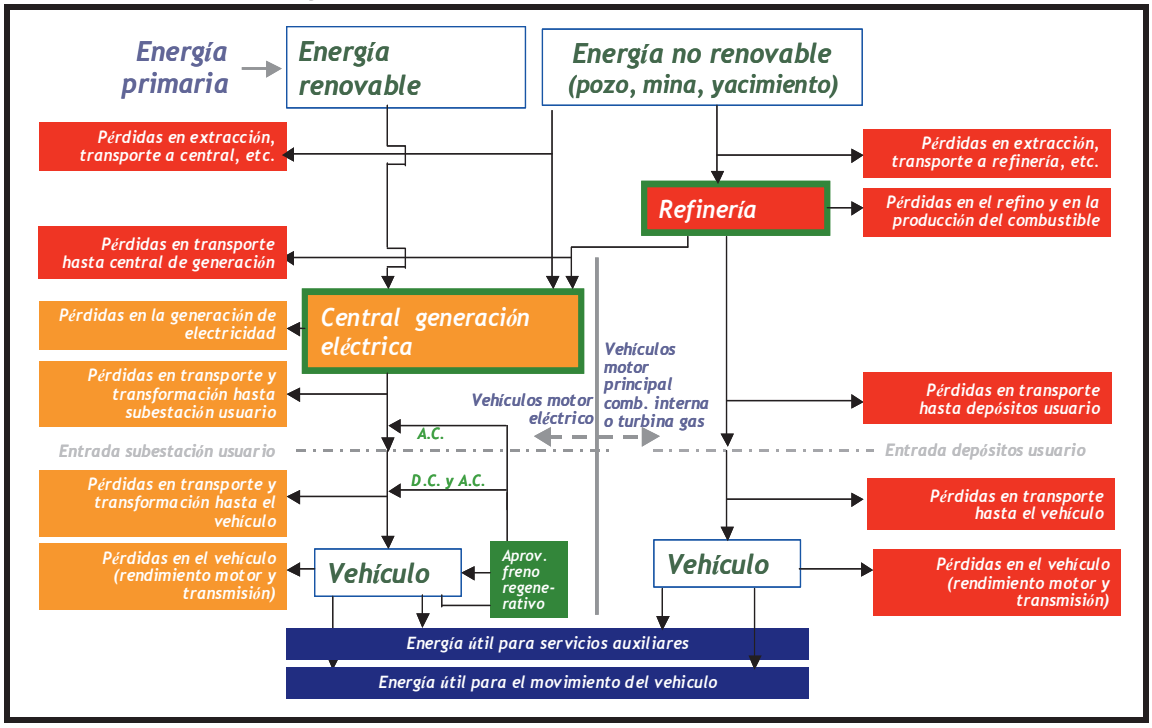
Esquema de flujos de la electricidad y el petróleo

Como se expondrá más adelante, y si se prescinde de los nuevos combustibles o sistemas de propulsión, existen tres vectores energéticos para suministrar energía al vehículo:

- Electricidad, que alimenta a motores eléctricos
- Productos derivados del petróleo, que alimentan a motores de explosión y turbinas de gas
- Gas, empleado en ocasiones para la propulsión en coches, autobuses y en gasoductos.

En la figura 23 se muestra el flujo energético para los vehículos, distinguiendo entre energías renovables y no renovables, y se pueden localizar las pérdidas que tienen lugar desde la extracción de la energía hasta que ésta llega al vehículo.

Figura 23. **Flujos de la energía empleada para el transporte y pérdidas asociadas a los procesos de transporte y transformación.**



Fuente: (García Álvarez, 2010a)

Pérdidas de energía

Las pérdidas de energía se producen en los procesos de transformación o de transporte de ésta. En efecto, la energía, como se ha expuesto, se encuentra inicialmente en un lugar y con una forma diferente de los que se requieren para su uso final. Por ello se llevan a cabo procesos de transporte y transformación (refino, generación de electricidad,...) en los cuales se producen pérdidas. Además, una vez que la energía llega a los sistemas de transporte, se producen pérdidas asociadas a las máquinas rotativas y otras maquinas de transformación.

Las pérdidas de energía, empleando la terminología empleada en el transporte por carretera (que es aplicable a otros modos de transporte), se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de dónde se produzcan tales pérdidas:

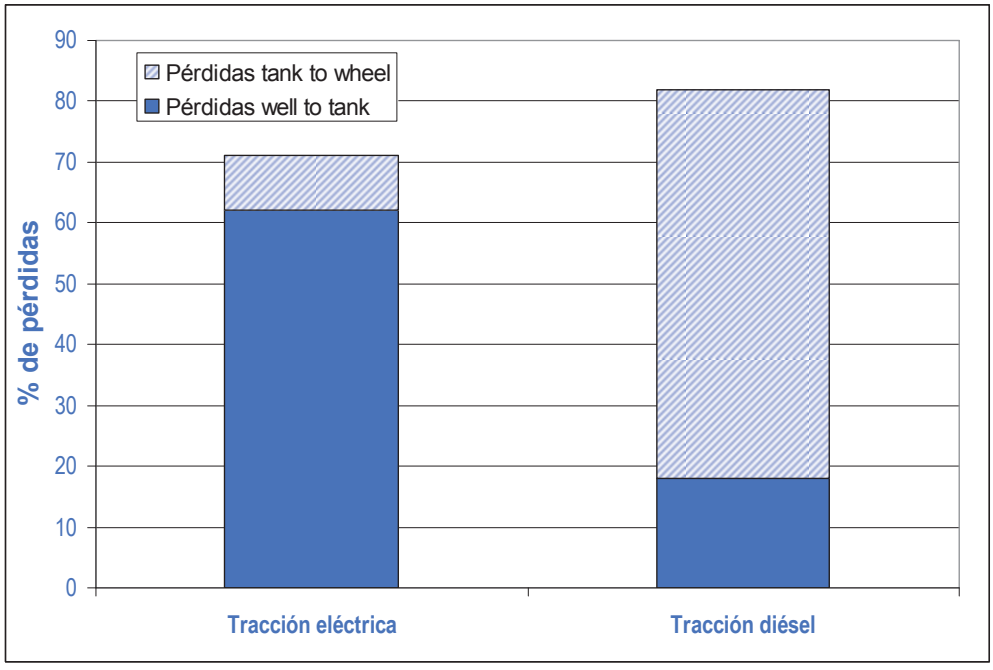
- **Pérdidas well to tank (WTT):** son las pérdidas que se producen desde el pozo (*well*) de petróleo (es decir, desde la fuente de energía primaria) hasta el aprovisionamiento al vehículo (*tank*).

- En el caso de tracción con derivados del petróleo, comprenden la energía necesaria para la extracción, refino, el transporte, etc. y suponen un rendimiento equivalente de alrededor del 81 al 88%
- En tracción eléctrica incluyen las pérdidas en la generación de la electricidad y en el transporte hasta el punto de suministro, y representan un rendimiento equivalente del orden del 37 al 43% correspondiendo las mayores pérdidas en la generación de electricidad.

- **Pérdidas tank to wheel (TTW)**: son las pérdidas desde el suministro al vehículo (*tank*) hasta las ruedas del vehículo (*wheel*).
  - En el caso de tracción con derivados del petróleo comprenden las pérdidas en el motor y en la transmisión, y equivalen a un rendimiento de alrededor del 23 al 35%, produciéndose las mayores pérdidas en el motor térmico.
  - Para la tracción eléctrica, son las pérdidas en el motor y en la transmisión, y suponen un rendimiento equivalente de un 78 a un 92%.

Las pérdidas totales son la suma de las pérdidas *well to tank* y las *tank to wheel*, y el rendimiento equivalente total es, en cada caso, el producto de los dos rendimientos (Figura 24). El flujo cualitativo de la energía procedente de derivados del petróleo y de la eléctrica es semejante; y, como se puede observar en la siguiente figura, las pérdidas globales son del mismo orden de magnitud, aunque no así las pérdidas parciales en cada una de las dos etapas.

Figura 24. **Orden de magnitud de las pérdidas "well to tank" y "tank to wheel" según tipo de tracción aplicada en el transporte**



Las pérdidas en los procesos de transformación y transporte de la energía están por encima del 70 por ciento de la energía primaria. En tracción eléctrica son grandes antes de llegar al vehículo y pequeñas en el propio vehículo. En tracción diésel ocurre al revés.

Fuente: Elaboración propia ((García Álvarez, 2010a)

2.1.4. Cuantificación de las pérdidas emisiones según vectores energéticos

➢ Emisiones y pérdidas de los combustibles fósiles

Emisiones en la combustión.- En el caso de los combustibles fósiles, los factores de emisiones de CO_2 y SO_2 son constantes. Por tanto, la cantidad emitida es directamente proporcional a la cantidad de combustible consumido. La tabla 11 muestra los factores de emisión en unidades de masa de cada uno de los contaminantes por litro y por kilogramo de combustible.

Tabla 11. **Factores de emisión de los derivados de petróleo (en masa por kilogramo y masa por litro)**

	CO_2	SO_2	CO_2	SO_2
	kg/kg	*g/kg*	*kg/l*	*g/l*
Gasolina	3,18	0,3	2,162	0,24
Gasóleo	3,14	0,7	2,625	0,59
Queroseno	3,15	0,97	2,363	0,73

Densidades consideradas: gasolina 0,68 g/cm^3, gasóleo 0,836 g/cm^3, queroseno 0,75 g/cm^3.
Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de óxidos de nitrógeno y de partículas no tienen unos factores de emisión fijos, ya que dependen del combustible y otros aspectos como son la cilindrada del vehículo y la normativa aplicada en el diseño del motor.

Emisiones y pérdidas en los procesos de transporte y transformación antes de llegar al vehículo.- Los productos derivados del petróleo sufren diversas pérdidas y producen emisiones en los procesos de transporte y transformación desde el yacimiento hasta llegar al vehículo ("well to tank") (Tabla 12). Estas pérdidas para el caso de los combustibles empleados en España han sido estudiados en profundidad por (López Martínez, Sánchez Alejo, & Fernández, 2009) en el marco del proyecto EnerTrans y según sus resultados son del orden del 15 al 20 por ciento.

Tabla 12. **Pérdidas de energía y emisiones en los procesos de transformación y transporte de los combustibles fósiles desde el yacimiento hasta el vehículo**

	Emisiones CO_2 (gramos / litro)	Pérdidas de energía (MJ / MJ)
Gasolina	4,79	0,179
Gasóleo	5,15	0,204
Queroseno	4,73	0,159

Fuente: Elaboración propia sobre (López Martínez, Sánchez Alejo, & Fernández, 2009)

➢ Emisiones y pérdidas en la generación de electricidad

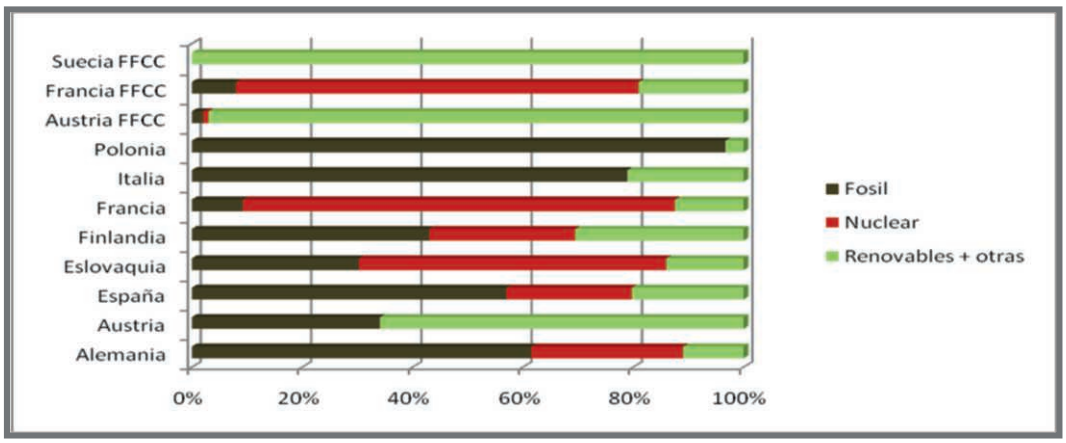
Los factores de emisiones en la generación de energía eléctrica varían de un año a otro y según los países, ya que son dependientes de la combinación de tecnologías

(*mix)* en la *generación* de electricidad empleada en cada año por el sistema eléctrico de que se trate.

Incluso el *mix* de generación varía hora a hora (especialmente entre el día y la noche), y según sea verano o invierno. Y ello, porque en cada una de las 8.760 horas del año se emplean las tecnologías de generación más baratas (incluyendo en el coste el pago por los derechos de emisión) para atender a la demanda de esa hora concreta.

El método generalmente aceptado para estimar los factores de emisión asociados a la producción de electricidad es utilizar el *mix* de generación medio para cada año y país[5]. En la figura se puede ver, para varios países, cómo se combinaron en 2004 los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables. En algunos de estos países la generación de electricidad destinada al ferrocarril es independiente de la red eléctrica nacional, como es el caso de Suecia, Alemania o Austria, y el mix de generación correspondiente también se muestra en la figura. Las diferencias son notables; por ejemplo, Polonia tiene un 97% de utilización de combustibles de origen fósil, mientras los ferrocarriles austriacos emplean un 97% de energías renovables.

Figura 25. **Mix de tecnologías empleadas para la generación de electricidad (2004) para el ferrocarril en diversos países.**



Fuente: (Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, 2010)

La eficiencia o rendimiento en la producción de electricidad (es decir, el número de megajulios de energía primaria que deben emplearse para generar un megajulio de electricidad) también es variable. En el caso de las centrales térmicas se suele situar entre el 30 y el 40 por ciento, dependiendo de los países. Las nuevas centrales de ciclo combinado pueden llegar al 55 por ciento. Para otros tipos de generación de electricidad (nuclear e hidráulica) no se puede calcular la eficiencia porque la energía de entrada no tiene contenido energético químico; pero en la práctica, en las estadísticas internacionales se asume como eficiencia de las centrales nucleares el 33% y de las centrales hidráulicas el 100%. Para más detalle y la concreción al caso español puede verse la monografía desarrollada en el marco del proyecto (Pilo de la Fuente, E., Pérez Arriaga, Hierro Ausín, I. de L., & Jiménez Octavio, 2009) donde

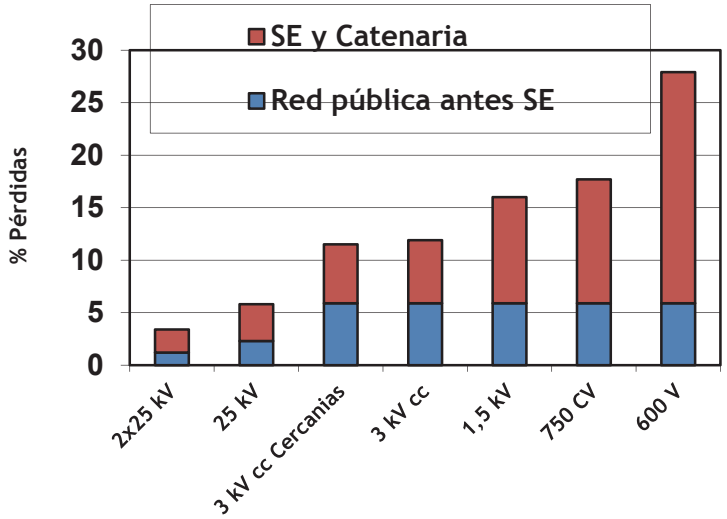
[5] Esta es una cuestión ciertamente discutible, pues los sistemas eléctricos de muchos países (por ejemplo, casi todos los centroeuropeos) están fuertemente interconectados (por lo que quizá habría que utilizar un factor de emisiones europeo). Por otro lado, en presencia de importantes aumentos de la demanda de electricidad (si por ejemplo si se electrificasen masivamente los automóviles o se aumentase significativamente el tráfico del ferrocarril eléctrico) podría ser conveniente emplear el factor de emisiones marginal en cada hora, en lugar del factor de emisiones medio.

también pueden encontrarse valores de las pérdidas de energía desde la central de generación hasta el pantógrafo del vehículo. (Tabla 13 y figura 26).

Tabla 13. **Coeficientes de pérdidas entre la central generadora de electricidad y el pantógrafo el tren según tensión**

Tensión electrificación	Tensión acometida	Coef. Distrib + Transp	Coef. Red Ferroviaria	Coeficiente Total
2x25kV CA	400kV	101,2%	102,2%	**103,5%**
1x25kV CA	220kV	102,3%	103,5%	**105,9%**
3000V CC (Cercanías)	1kV < V < 36kV	105,9%	105,6%	**111,8%**
3000V CC (tráfico normal)	1kV < V < 36kV	105,9%	106,0%	**112,2%**
1500V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	110,1%	**116,6%**
750V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	118,2%	**125,2%**
600V CC	1kV < V < 36kV	105,9%	122,0%	**129,2%**

Figura 26. **Pérdidas en energía entre la central generadora y el pantógrafo del tren según el nivel de tensión**



A medida que aumenta la tensión de suministro al tren, las pérdidas de energía disminuyen. En la tensión de 2 x 25 kV, propia de las líneas de alta velocidad, las pérdidas son del 3,5%, pero a 600 voltios, tensión de algunos ferrocarriles metropolitanos, se elevan al hasta el 29,2 5%.
Fuente: (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009)

Las emisiones de dióxido de carbono atribuibles a la generación de la electricidad varían, igualmente, de país a país y de año en año. Las diferencias se deben (al igual que en el caso del rendimiento) a las variaciones en el mix de generación, ya que mientras la electricidad generada con carbón y fuel produce muchas emisiones de gases de efecto invernadero, estas emisiones son más reducidas en el caso de la energía generada con gas en centrales de ciclo combinado, y son nulas en el caso de la energía eléctrica generada en centrales nucleares y con energías renovables (hidráulica, eólica, solar, etc.)

En la tabla puede observarse la dispersión de valores existente, que oscila entre los 5 gramos por kilovatio hora de Suiza y los 6 gramos por kilovatio.hora de Noruega hasta los 1.042 gramos por kilovatio.hora de Grecia.

En los países nórdicos las emisiones medias de dióxido de carbono correspondientes al periodo 2000-2004 fueron de 96 gramos por kilovatio-hora, según (Lukaszewicz & Andersson, 2006).

Tabla 14. **Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la generación de electricidad por países**

País	Kg / kWh	País	Kg / kWh	País	Kg / kWh
Austria	0,067	Francia	0,069	Noruega	0,006
Bélgica	0,253	Grecia	1,042	Polonia	0,986
Bulgaria	0,484	Croacia	0,445	Portugal	0,635
Suiza	0,005	Hungría	0,499	Rumania	0,781
Rep. Checa	0,565	Irlanda	0,793	Rusia	0,936
Alemania	0,592	Italia	0,64	Suecia	0,015
Dinamarca	0,346	Luxemburgo	0,755	Eslovenia	0,716
España	0,48	Montenegro	0,834	Eslovaquia	0,186
Finlandia	0,384	Países Bajos	0,407	Reino Unido	0,569

Fuente: (Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, 2010) en el informe metodológico del proyecto EcoPassenger.

En España en el año 2006, las emisiones de dióxido de carbono en la generación de electricidad fueron de 337 gramos de CO_2 por kilovatio hora y han seguido una tendencia descendente hasta llegar en 2010 a los 166 gramos por kilovatio.hora (Tabla 16). En España siempre ha habido fuertes oscilaciones debidas al diferente nivel de precipitaciones en cada año, lo que conduce a una muy variable capacidad de generación con energía hidráulica. Sin embargo, en los últimos años se ha producido un aumento muy importante de la generación con gas en centrales de ciclo combinado (con un factor de emisiones muy inferior al carbón, al que han desplazado en parte desde la aplicación del sistema de comercio de derechos de emisión). Además ha aumentado de forma significativa en España la generación de electricidad con fuentes renovables. En 2010, por otra parte, la demanda de energía ha sido menor debido a la crisis económica, por lo que se han empleado tecnologías de generación más eficientes que en años anteriores, reduciéndose, por ello, el factor de emisiones.

Tabla 15. **Evolución del factor de emisiones de dióxido de carbono en la generación de electricidad en España en el periodo 2005-2010**

Año	**Factor de emisiones** *(gramos CO_2/kWh)*
2005	372
2006	335
2007	343
2008	278
2009	233
2010	166

Fuente: (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009) actualizado con datos de www.adena.es

2.1.5. Rendimientos y pérdidas el vehículo ferroviario

En los vehículos ferroviarios (como en los de cualquier otro modo de transporte) se producen pérdidas ("tank to wheel") debidas a la transformación de la energía en los motores, máquinas y equipos ubicados en el propio vehículo. Como consecuencia de ello, el rendimiento del conjunto de la cadena de tracción es menor que la unidad. Las pérdidas (y por ello los rendimientos) son muy diferentes en tracción eléctrica y en tracción diésel como se expondrá seguidamente siguiendo a (García Álvarez & Martín Cañizares, M. del P., 2009).

➢ Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica

El rendimiento de la cadena de tracción es el producto del rendimiento de los motores, del convertidor y de las reductoras.

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

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

Los valores orientativos del rendimiento de la cadena de tracción para la electrificación en corriente continua y en corriente alterna se pueden estimar de acuerdo con los datos ofrecidos en la monografía del proyecto *ElecRail* (FFE & IDAE, 2011), ajustados con retoques obtenidos de medidas de Metro de Madrid y Renfe-Cercanías, y son los recogidos en las tablas 16 y 17:

Tabla 16. **Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua**

Motor (tipo y potencia)	Motor cc (500 kW)	Motor cc (1500 kW)	Síncrono ac (500 kW)	Síncrono ac (1500 kW)	Asíncrono ac	Imanes permanentes
Transformador	0,99	0,99	1	1	1	1
Convertidor	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Motor	0,915	0,935	0,93	0,945	0,95	0,98
Reductora (2 etapas)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Rendimiento Total	**0,867**	**0,889**	**0,893**	**0,908**	**0,912**	**0,941**

Fuente: (Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte (FFE) & Grupo de Estudios del IDAE, 2011)

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

Tabla 17. **Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente alterna**

Motor (tipo y potencia)	Motor cc (500 kW)	Motor cc (1500 kW)	Síncrono ac (500 kW)	Síncrono AC (1500 kW)	Asíncrono AC	Imanes permanentes
Transformador	0	0	0,943	0,943	0,943	0,943
Convertidor	0	0	0,97	0,97	0,97	0,97
Motor	0	0	0,93	0,945	0,95	0,98
Reductora (2 etapas)	0	0	0,98	0,98	0,98	0,98
Rendimiento Total	**0**	**0**	**0,8337**	**0,8471**	**0,8516**	**0,8785**

Fuente: (Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte (FFE) & Grupo de Estudios del IDAE, 2011)

➢ Rendimientos en el vehículo de tracción diésel

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

Los datos de partida se han tomado del trabajo "La tracción en los ferrocarriles españoles" de (Arenillas Melendo, 2008) en la parte correspondiente a la tracción diésel. Se han ajustado en la parte correspondiente a los rendimientos de los motores eléctricos de tracción en el caso de las transmisiones eléctricas a fin de lograr coherencia con los rendimientos de los motores eléctricos en la tracción eléctrica.

Los valores que se presumen para los diversos tipos de transmisión motores son los recogidos en la tabla 18.

Tabla 18. **Rendimientos en el vehículo de tracción diésel**

	Transmisión mecánica	Transmisión hidráulica	Transmisión eléctrica	
			continua-continua	continua-alterna
Motor	0,38	0,38	0,38	0,38
Transmisión	0,95	0,82	0,81	0,9
Reductor	0,98	0,98	0,98	0,98
Rendimiento Total	**0,3538**	**0,3054**	**0,3016**	**0,3352**

Fuente: (Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte (FFE) & Grupo de Estudios del IDAE, 2011)

2.2. Consumo de energía del ferrocarril

Para conocer y estudiar la relación de causalidad entre el consumo de energía (y las emisiones asociadas) y la velocidad del ferrocarril es necesario establecer una "función de consumo" que relacione éste con las variables relevantes, entre ellas la velocidad. Multiplicando esta función por los factores de emisión respectivos, se obtienen la correspondiente función de emisiones.

Usos de la energía considerados.- El presente estudio, se limitará a la energía necesaria para el movimiento del vehículo y para los servicios auxiliares de éste (ventilación de motores, calefacción, aire acondicionado, iluminación). No se considera, por tanto, la energía necesaria para la construcción de la infraestructura ni para la fabricación de los vehículos (aunque sobre este tema se hará una referencia dada la estrecha relación que tiene la velocidad con el consumo de energía); ni para usos diferentes de tracción (es decir, para estaciones, talleres, oficinas y auxiliares de la infraestructura).

Descripción y análisis de antecedentes.- Antes de entrar a la caracterización del consumo y a la presentación del modelo, se estima oportuno repasar algunas ideas extendidas sobre el consumo de energía de los trenes en el sistema de alta velocidad, así como una síntesis de algunos de los trabajos publicados sobre el tema (entre los que merecen especial atención los del profesor Kemp por ser los mas numerosos, concretos y los que mas han influido en las ideas existentes sobre el tema, y los realizados en Holanda diversos investigadores). También se mencionan los trabajos del autor sobre esta cuestión que han aportando ideas sobre el tema que en la tesis se ordenan, actualizan, completan y se formulan como "teoría general". Después de exponer las ideas y los trabajos existentes, se contrastarán estas ideas con datos tomados de la realidad, así como con trabajos publicados y con estudios realizados sobre la materia (en su mayor parte, del autor) y se dedicará especial cuidado a analizar los trabajos de Kemp a la luz de estos datos disponibles.

Análisis de la dinámica del tren.- De forma más sistemática, se analizará con un cierto detalle la dinámica del tren, es decir, las reglas que rigen su movimiento y que, además de ello, inciden sobre el consumo de energía y las emisiones.

El modelo de función de consumo- Tras ello queda el camino despejado para la formulación del modelo. Primero se expondrá la lógica del mismo, para ir analizando cada una de sus partes (tanto los sumandos e integrantes de la función de consumo como el coeficiente de ajuste y los coeficientes homogeneizadores necesarios para obtener los diversos índices). Finalmente, y a la luz de los datos anteriores se analizan los efectos tanto de la velocidad, como del paso de uno a otro sistema de alta velocidad. También se puede medir la sensibilidad del consumo a otras variables.

2.2.1. Antecedentes: ideas y estudios sobre el consumo de energía en el transporte por ferrocarril

Son relativamente numerosos los estudios que en el ámbito europeo se han realizado para analizar de forma comparada el consumo de energía en unos casos, y las emisiones en otros, de los diversos modos de transporte. También existen estudios sobre el consumo de energía y emisiones en el ferrocarril, en la mayor parte de las ocasiones para incluirlo en comparaciones intermodales, aunque también en algunos

casos los estudios tienen por objetivo exclusivo el consumo de ferrocarril. Mucho menos numerosos son los estudios que comparan el ferrocarril convencional con el de alta velocidad. En ocasiones, y por falta de datos específicos, en los trabajos de comparación intermodal se emplean los mismos valores para el ferrocarril convencional y el de alta velocidad.

Sobre la validez de todos estos estudios hay que recordar lo indicado con respecto a la enorme variabilidad del consumo de energía del ferrocarril, por lo que cualquier comparación debe analizarse con precaución.

Merecen ser destacados el informe INFRAS-IWW (Mayers et al., 2001) y su actualización de 2004, (Schreyer et al., 2004) que trata de comparar los costes externos de los diversos modos de transporte; el estudio del proyecto MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport) resultado de la acción Cost 319 (Estimation of pollutant emissions from transport (Jorgensen & Sorenson, 1997)). Este estudio tiene su continuación con la acción Cost 346 (para vehículos pesados) y los estudios "Artemis" y "Particulates" (Infras, 2008).

Más recientemente (Maibach et al., 2007) ha sido publicado el "*Handbook on estimation of external costs in the transport sector*" dentro de la acción IMPACT que persigue el estudio de las medias y políticas de internalización de todos los costes del transporte.

En el entorno español, el "Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el transporte" de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles ha realizado numerosos estudios sobre el consumo de energía en el ferrocarril como los que se enmarcan en los proyectos EnerTrans (considerando todos los modos de transporte), ElecRail (centrado en el ferrocarril eléctrico) y en otros trabajos tendentes a la normalización de los consumos de los trenes, al cálculo de emisiones por rutas, o simplemente a establecer metodologías de homogeneización (La mayor parte de estos trabajos aparecen referenciados en el Anexo).

Otros importantes desarrollos se han realizado en el ámbito del transporte urbano, y entre ellos se puede destacar el estudio llevado a cabo dentro del Plan Director de Movilidad de la Región Metropolitana de Barcelona en la que se calculan consumos y costes externos. El Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid publicó (2003) la "Cuenta Económica y Socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros en la Comunidad de Madrid en 1996" incluyendo metodologías de cálculo para los costes sociales y ambientales. Más recientemente, el interesante trabajo de (Riol, 2011) analiza numerosos datos de consumo y emisiones en diversos modos de transporte (algunos publicados y otros inéditos), los homogeneiza y compara para analizar las diferencias entre el transporte público y el privado.

Los cálculos de consumos energéticos y emisiones son utilizados en ocasiones para establecer políticas de ahorros energéticos y de imposición tarifaria de los distintos modos de transporte. Esto hace que algunos estudios analicen exclusivamente los costes concretos asociados a cada modo. En esta vertiente "monetarizada" de los consumos energéticos y de emisiones existen algunos estudios a nivel europeo, tales como el PETS (1999) que contiene un análisis de los costes marginales (evitables) del transporte; el proyecto europeo UNITE (Unification of accounts and marginal costs for Transport efficiency 1999-2002) analiza las externalidades de los distintos modos de transporte en especial el ferrocarril, etc.

(Kemp, 2007) define los indicadores más adecuados para cada tipo de análisis y realiza una completa comparación entre diversos modos de transporte en el ámbito británico, apoyándose en el caso del ferrocarril en datos publicados por la asociación de operadores ATOC.

En lo que se refiere a los modelos existentes para el cálculo de consumos y emisiones en el transporte, su complejidad es un factor que dificulta su difusión y utilización.

Los usuarios finales de dichos modelos se ven obligados a utilizar simplificaciones de los mismos o aplicaciones que en algunos casos no son exactas para el apoyo a las decisiones políticas. Tan sólo se ha desarrollado de forma continuada el programa "Copert" (actualmente en su versión IV). Para el ferrocarril de mercancías está disponible el "Econtransit" (Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, Oko-Institut, & IVE RMCOM, 2010) que también incluye el análisis de algún otro modo de transporte como el marítimo fluvial, y para el transporte de viajeros, el programa "Ecopassenger" (Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, 2010).

En el ámbito europeo ha habido fuertes incentivos para desarrollar el cálculo de los consumos y emisiones en los distintos modos de transporte, aunque no existe una metodología estándar. Por ello, algunos de los modelos (como el MEET) son considerados en muchos casos como un estándar.

El modo de transporte que comenzó a analizar los consumos y las emisiones fue el de la "carretera" (por razones principalmente económicas en el caso de los operadores y por ser el modo, en principio, con una contaminación directamente percibida por los ciudadanos). Los estudios relativos a los demás modos han sido desarrollados a partir de lo realizado para la carretera.

En el transporte por ferrocarril el trabajo de más interés es, probablemente, el de (Jorgensen & Sorenson, 1997); mientras que el de (Lukaszewicz & Andersson, 2006) revisa los consumos de diversos tipos de trenes en Suecia y (Lukaszewicz & Andersson, 2006)aporta datos muy relevantes en lo que se refiere a la variación del consumo de energía al cambiar la velocidad de circulación en la misma infraestructura.

Carencia de información sobre los consumo del tren de alta velocidad y los trabajos los profesores Kemp y Van Essen

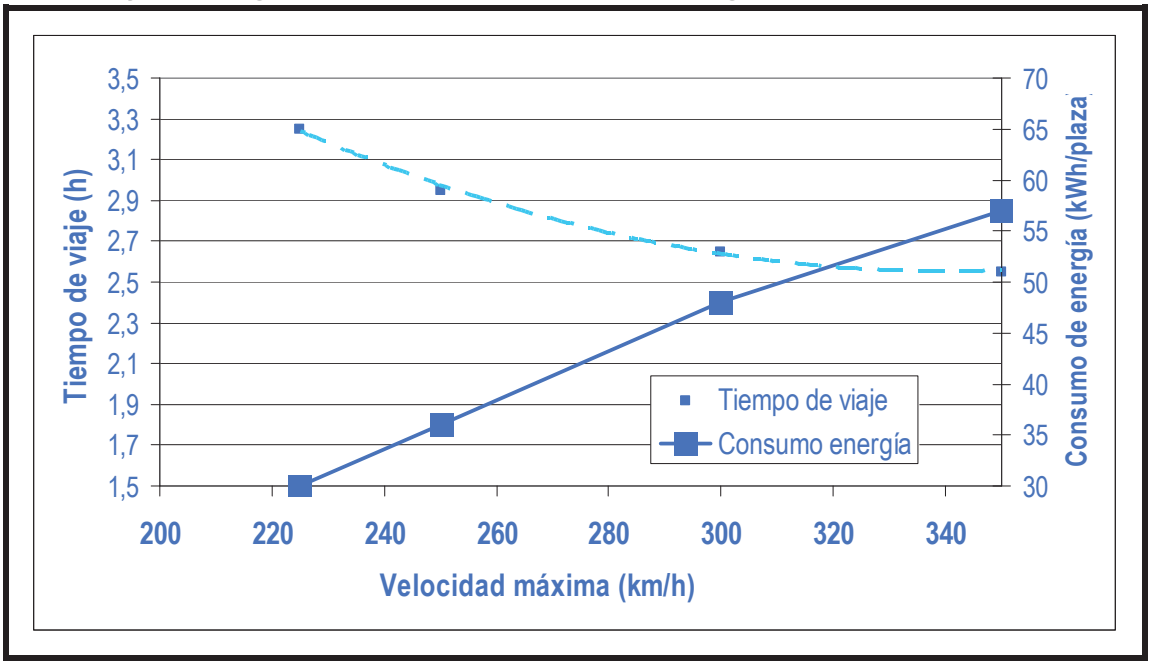
Pese a la existencia de abundante literatura sobre el consumo de energía comparado, lo cierto es que existen pocos datos sobre el consumo de energía del tren de alta velocidad (ni calculados por procesos "bottom-up" ni por procesos "top down"). Ello, unido a la enorme variabilidad del consumo según las circunstancias, ha hecho que hayan podido defenderse toda clase de teorías sobre el tema.

Desde Gran Bretaña el profesor Roger Kemp de la Universidad de Lancanster ha venido insistiendo en los perjuicios energéticos del tren de alta velocidad con afirmaciones como la contenida el artículo de provocativo título "Salvemos el planeta, tomemos el coche" (Kemp, 2004a) en el que obtiene diversos resultados comparativos muy desfavorables para el tren de alta velocidad.

Los escritos de este profesor tienen su apoyo cuantitativo en el consumo atribuido en (Kemp, 1993) a un hipotético tren de alta velocidad entre Londres y Edimburgo circulando a diferentes velocidades.

El gráfico que presentó en este estudio muestra un crecimiento del consumo del ferrocarril fuertemente relacionado con la velocidad, y una elasticidad muy alta (Figura 27).

Figura 27. **Comparación entre el tiempo de viaje y el consumo de energía de un tren entre Londres y Edimburgo para varias velocidades máximas según Kemp**



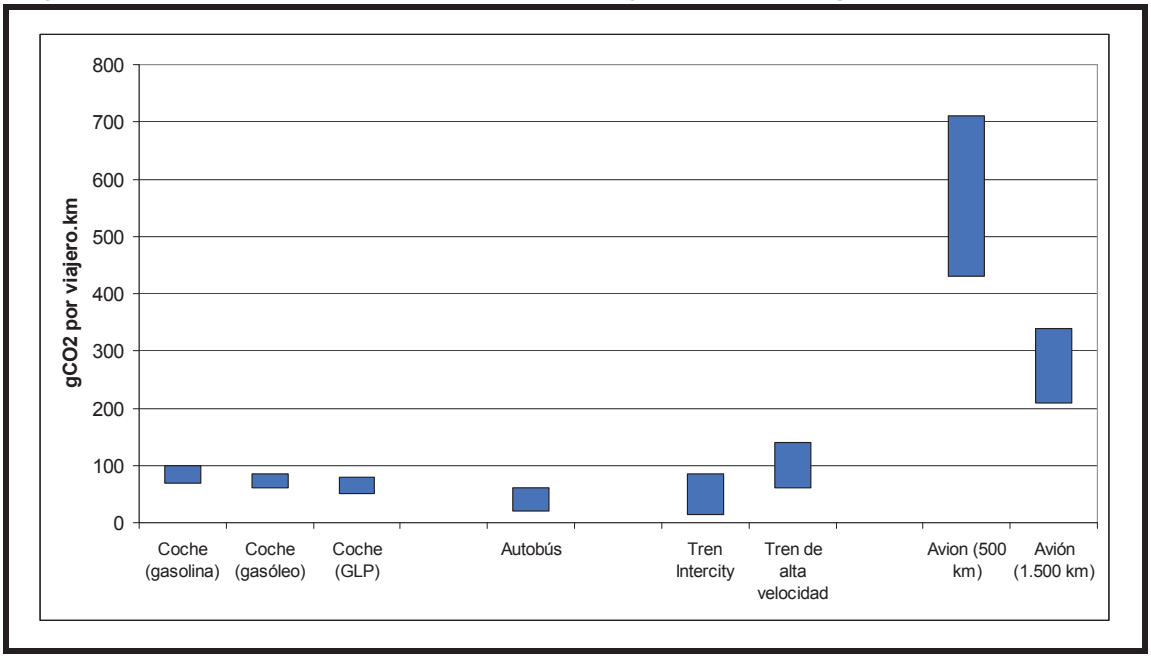
La energía está expresada en kilovatios.hora por plaza en el conjunto del recorrido y el tiempo de viaje en horas. Fuente: (Kemp, 1993)

Kemp parte del dato del consumo de 57 kWh/plaza para el recorrido, de un rendimiento conjunto del tren y del transporte de energía eléctrica del 65%; y de un rendimiento de la generación de electricidad de 40%. Así llega a una equivalencia de 22 litros de gasóleo por asiento en el viaje en tren de Londres a Edimburgo a 350 kilómetros por hora. Lo compara seguidamente con un VW Passat 130 TDI al que atribuye un consumo de 2,8 litros/100 km y con dos ocupantes (y un rendimiento del 80% "well to tank"), y llega a la conclusión de que el consumo es el mismo (22 litros por viajero). Completa la comparación con un avión Airbus 321-100 de clase única al que atribuye un consumo de 16 litros por asiento, y con el mismo rendimiento "well to tank" (80%), le imputa un consumo de 20 litros por plaza para el viaje de Londres a Edimburgo; es decir, ¡menor que el del tren de alta velocidad!.

(Kemp, 2004b), al salir al paso de la polémica suscitada en Gran Bretaña por la publicación de los resultados de sus estudios, reconoce que "nadie tiene datos autorizados del consumo del tren de alta velocidad, y a diferencia de la situación de los coches, no hay un método estandarizado para calcular el dióxido de carbono producido por los trenes, lo que lleva a variaciones en las hipótesis formuladas y en los resultados. Y finalmente, la variedad de diferentes unidades de medida empleadas, incluyendo MJ, toneladas equivalentes de petróleo, toneladas de carbón y gramos por plaza kilómetro hace la comparación casi imposible para los no especialistas".

En Holanda (van Essen et al., 2003) compara el consumo de energía de todos los modos de transporte y concluye que el tren de alta velocidad tiene un consumo mayor que el tren convencional, y en la gráfica que añade se muestra además que tendría un consumo mayor que el coche particular (Figura 28).

Figura 28. **Emisiones de dióxido de carbono por viajero.kilómetro según Van Essen**



Van Essen atribuye al tren de alta velocidad unas emisiones superiores a las del tren convencional y al autobús

Fuente:(van Essen et al., 2003)

Al buscar en el trabajo del Van Essen el origen de estos resultados, cita a (Van den Brink & Gijsen, 2002) como fuente de los datos "*no procesados*", y en concreto el consumo de tren de alta velocidad que menciona y que da lugar a las afirmaciones anteriores es de 523 MJ por plaza kilómetro. Este dato correspondería a un tren de 377 plazas, con velocidad máxima de 260 km/h, distancia entre paradas de 47 kilómetros, aprovechamiento del 49%; porcentaje de recorridos en vacío 3%. También indica que se ha calculado incluyendo la energía consumida en el acceso y dispersión que evalúa en 75 kilómetros realizados en coche.

La influencia de los datos de Kemp en la literatura

Estos datos de Kemp y de Van Essen están entre los pocos publicados sobre los consumos del tren de alta velocidad. Por ello, han sido utilizados por numerosos autores y se han introducido en la literatura científica española. Así se puede comprobar en (González Savignat, 2006): "*Kemp advierte de la utilización incorrecta de los datos que se ha hecho en el pasado (…) y obtiene resultados de consumos energéticos similares para un tren a 225 kilómetros por hora y un vehículo privado de reciente fabricación. También apunta a las escasas diferencias que se obtiene entre un tren de alta velocidad y un avión moderno desde el punto de vista de esta variable*". Ello autoriza a esta la autora (tras advertir que muchos de los factores pueden cambiar de un contexto a otro) a pedir la introducción de "un mayor grado de prudencia y algún interrogante a los argumentos que tratan de presentar al tren de alta velocidad como la alternativa de transporte más respetuosa con el medio ambiente".

Más recientemente, Germá Bel en su libro "España, capital París" (Bel i Queralt, 2011) y en su alegato contra el tren de alta velocidad le atribuye un consumo de energía alto y lo hace bebiendo en fuentes holandesas: "*Uno de los estudios* (cita al respecto a (van Essen et al., 2003) *más completos y sofisticados realizados hasta ahora sobre la comparación medioambiental de la alta velocidad sugiere (…) que la energía consumida por la alta velocidad es superior a la de los vehículos de*

carretera, tanto de gasolina como de petróleo, y muy superior a la de los trenes Intercity convencionales". Añade: "*otro estudio de gran calidad técnica* -ahora cita a (Van Wee, Van den Brink, & Nijland, 2003)- *confirma que el tren convencional Intercity es más eficiente que la alta velocidad, pero los resultados para el transporte por carretera son similares a la alta velocidad. En conjunto, si bien es más eficiente que el avión, el ferrocarril de alta velocidad no es un instrumento especialmente útil para combatir las emisiones de dióxido de carbono, pues es menos eficiente que los trenes convencionales modernizados*".

➢ Estereotipos sobre el consumo de energía en alta velocidad

No hay duda de que en la sociedad existe la creencia generalizada de que el tren de alta velocidad requiere mucha energía para su funcionamiento, incluso una cantidad desmesurada y desproporcionada con los beneficios que reporta. Este estereotipo, tan generalizado como falto de soporte justificativo, sirve para atacar al tren de alta velocidad y proponer, como alternativa a la construcción de nuevas líneas de alta velocidad, la mejora de las líneas convencionales, o simplemente por la potenciación de otros modos de transporte.

Lo que flota en la nube

Una muestra del estado de opinión sobre la materia y de cómo estas ideas se expanden entre la sociedad, la encontramos en algunos de los trabajos presentados al concurso sobre alta velocidad que el Museo del Ferrocarril convocó entre escolares en 2006. Los niños españoles acudieron a Internet para obtener información para su trabajo, y de allí extrajeron las ideas que les parecieron más adecuadas al caso.

Varios de los trabajos coincidieron en reproducir dos sentencias. Una de ellas la recogemos literalmente del trabajo de los alumnos 4ª de ESO del Instituto Gustavo Adolfo Becquer de Algete: "*El tren de alta velocidad realiza un consumo energético desproporcionado e insoportable. El AVE que circula entre Madrid y Sevilla a una velocidad máxima de 300 kilómetros por hora (y media de 209 kilómetros por hora) tiene una potencia de 8.000 kilovatios: consume tanta electricidad medida en kilovatios/hora, como una ciudad de 25.000 habitantes*" (Sic).

En una línea argumental muy parecida, los alumnos de 1º ESO del Instituto Cardenal Herrera Oria de Madrid, citando fuentes "de los ecologistas" aseguraban que "*aumentar la velocidad de un tren de 100 a 400 Kms/h supone que la potencia debe multiplicarse por 64. Pero además de su descomunal consumo energético (…) es evidente la vinculación que tiene el AVE con el fortísimo consumo de energía eléctrica y por lo tanto con la energía nuclear*".

Las reglas "del cuadrado" y "del cubo"

Hay dos ideas relativas a las relaciones entre energía y la explotación ferroviaria de los trenes que están muy extendidas, incluso entre muchos técnicos y profesionales ferroviarios.

La primera de ellas, que podríamos denominar como "regla de la potencia" o "regla del cubo", es que la potencia instalada en los trenes debería crecer con el cubo de su velocidad.

La segunda, que podríamos denominar "regla de la energía" o "regla del cuadrado", indica que consumo de energía aumentaría en proporción al cuadrado de la velocidad. Esta regla respondería a un consumo inducido únicamente por resistencias de tipo cuadrático, como lo son las aerodinámicas.

En el congreso *HiSpeeed 2008* celebrado en Amsterdam en 2008, al comienzo de una sesión, se preguntó al auditorio, en una encuesta retórica, por cuánto se

multiplicaría el consumo de energía del tren para pasar de 200 a 300 kilómetros por hora. Sorprendentemente, la mayoría de los asistentes eligió, de entre las respuestas posibles, la de "2,25" (que es cuadrado de 1,5, factor de multiplicación de la velocidad). Aún más sorprendentemente, la organización consideró esa repuesta como la correcta.

2.2.2. Comparación empírica del consumo de energía del sistema ferroviario convencional con el de alta velocidad

A la vista de estos antecedentes, en estas tesis se establecerá una "teoría general" sobre el efecto del sistema de alta velocidad en el consumo de energía y emisiones. Con carácter previo, sin embargo, se hará una comprobación empírica y de los resultados de análisis realizados para comprobar si se confirman los estereotipos o si, por el contrario, la realidad ofrece resultados diferentes.

Relación empírica entre potencia y velocidad de los trenes

Recordemos que, con respecto a la potencia de los trenes, el estereotipo asegura que la potencia instalada en los trenes debería crecer con el cubo de su velocidad.

Para comprobar si ello se ajusta a la realidad, hemos comparado la potencia de diversas máquinas eléctricas o trenes autopropulsados en España con su velocidad máxima. En el caso de las máquinas, y cuando hay varias semejantes, se han tomado las de una potencia tal que puedan remolcar trenes de unos 6 o 7 coches de viajeros, es decir, con una capacidad de transporte equivalente a la de los modernos trenes de alta velocidad con los que se comparan.

En la tabla se puede ver la potencia de cada máquina o tren, el año de incorporación al parque y su velocidad máxima. También se refleja la potencia que debería tener de acuerdo con el estereotipo, en dos versiones: respetando la regla del cubo con respecto a la primera máquina eléctrica que podía remolcar esta carga (la de la serie 6100 de la Compañía del Norte, de 1923), y respetando esta regla con respecto a la generación de máquinas inmediatamente anterior.

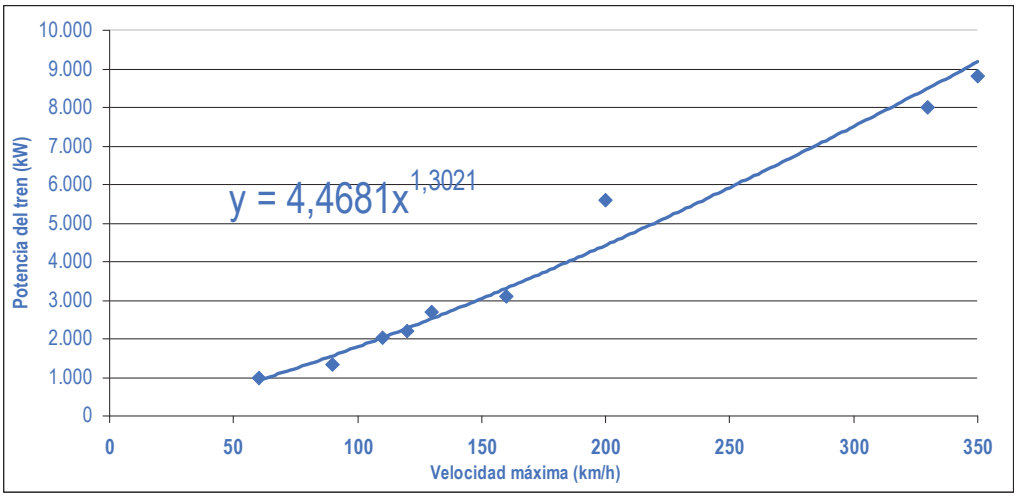
Tabla 19. **Evolución de la potencia de las máquinas eléctricas de Renfe y su relación con la velocidad máxima.**

Datos reales				Potencia (kW) según la regla cubo			
Máquina o tren serie	Velocidad máx. (km/h)	Potencia continua (kW)	Año	Respecto anterior	*Dif.*	Respecto primera	*Dif.*
6100	60	990	1923				
7100	90	1.325	1928	3.341	*-2.016*	2.373	*-1.048*
7200	110	2.031	1928	2.419	*-388*	8.548	*-6.517*
7600	120	2.200	1952	2.637	*-437*	10.864	*-8.664*
7900	130	2.700	1967	2.797	*-97*	20.083	*-17.383*
269	160	3.100	1974	5.034	*-1.934*	30.396	*-27.296*
252	200	5.600	1992	6.055	*-455*	179.182	*-173.582*
102	330	8.000	2005	25.156	*-17.156*	522.396	*-514.396*
103	350	8.800	2007	9.544	*-744*	695.309	*-686.509*

Fuente: Elaboración propia ((García Álvarez, 2010a)

Como puede comprobarse en la tabla 19, en ningún caso se cumple la "regla del cubo": las potencias son siempre inferiores (generalmente, son muy inferiores) a las que deberían tener de acuerdo con la "regla del cubo". Si los trenes de alta velocidad para 350 kilómetros por hora cumplieran la "regla del cubo" con respecto las máquinas de 1923, deberían tener una potencia de casi 700 MW, mientras que en realidad tienen una potencia de 8,8 MW.

Figura 29. **Relación gráfica entre la velocidad máxima de los trenes y su potencia continua**



Fuente: Elaboración propia ((García Álvarez, 2010a)

La presentación gráfica de la relación entre la potencia de cada vehículo (en kilovatios) y su velocidad máxima (en kilómetros por hora) muestra (Figura 29) una curva que, desde luego, no es cúbica y cuya ecuación [5]resulta ser

$$P = 4{,}468 \times V^{1{,}3021} \qquad [5]$$

Relación empírica entre consumo de energía y velocidad de los trenes

Por lo que respecta al estereotipo sobre el consumo de energía ("regla del cuadrado"): el consumo de energía de los trenes aumentaría con el cuadrado de su velocidad hemos realizado una comparación entre diversos tipos de trenes que recogen una variedad de situaciones reales.

Una primera comparación, de carácter económico, puede obtenerse de la Memoria de Renfe de 2005[6] (que se extracta en la tabla 20). De ella se pueden extraer los datos del gasto de energía de tracción y los ingresos y tráficos de cada una de las Unidades de Negocio de Renfe. Estas agrupaciones, recogen trenes de cercanías, regionales, larga distancia y alta velocidad, con velocidades medias relativamente diferentes de uno a otro grupo, pero a su vez con una cierta homogeneidad dentro de cada grupo.

Los resultados aparecen en la tabla, en la que se comprueba que existe una relación inversa entre la velocidad y el peso que el coste de la energía supone sobre los costes totales y sobre los ingresos totales.

En concreto, en el caso de la Unidad de Negocio de alta velocidad, cuyos trenes son lógicamente los de mayor velocidad comercial[7], los costes energéticos suponen tan solo el 5,57 por ciento de los ingresos[8], frente a un 16,32 por ciento en los trenes de mercancías o de un 12,08 por ciento en los trenes de Cercanías.

---

[6] La razón de emplear la Memoria de 2005, reside en es que es la última en la que se publicaron los datos desagrupados totalmente entre Cercanías, Regionales, Larga distancia y AVE, ya que las cuatro Unidades de Negocio se agruparon desde entonces en dos áreas de actividad: "Cercanías y Media Distancia", y "Larga Distancia y Alta Velocidad", publicándose los datos por cada área de actividad. Además, desde 2005 los trenes de media distancia y alta velocidad (producto *Avant*) pasaron de estar gestionados por la UN de AVE (así estaban hasta 2005) a estarlo por el área de "Cercanías y Media distancia". Los datos de la Memoria de 2005, por lo tanto, son los últimos con la estructura antigua que, por contemplar mayor número de tipos diferentes de trenes, ofrece una información más relevante. Debe destacarse que desde 2006 se ha producido una fuerte subida del precio de la energía, lo que ha variado al alza el peso de los costes energéticos sobre los ingresos (en 2006, en los trenes de viajeros, los costes energéticos fueron el 7,44% de los ingresos, frente al 6,86% de 2005). Sin embargo, ello no influye sobre la relación con la velocidad, que es el propósito del presente estudio.

[7] En 2005 se incluyen en la Unidad de Negocio de alta velocidad los trenes AVE, Lanzaderas y "Talgo 200" que utilizan parcialmente líneas de alta velocidad.

[8] Como elemento de comparación puede señalarse que en Iberia, en 2007, los costes de energía fueron de 1.144 millones de euros, lo que representa el 21,8 % de sus costes de explotación (en el conjunto de sus rutas) y el 20,7% de sus ingresos de explotación; es decir, en la aviación el peso relativo de los costes energéticos sobre los ingresos es del orden de 3,7 veces mayor que en el tren de alta velocidad.

Tabla 20. **Comparación de los costes energéticos con los ingresos y los costes totales de las Unidades de Negocio de Renfe en 2005**

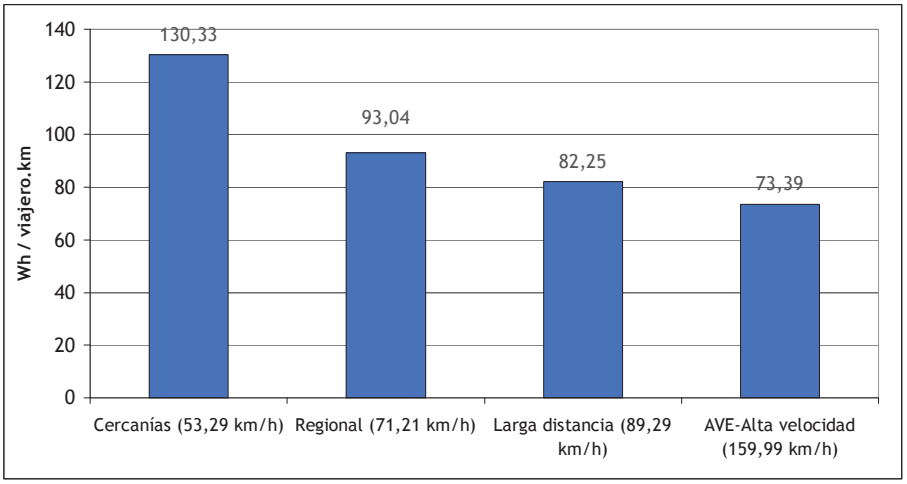
	Vel. media	Tráf.	Ingresos de tráfico	Ingresos / Ud. tráfico	Gastos energía	Gastos totales	Peso energía s/ing.	Peso energía s/gastos	Energía/ Ud. Tráfico
	Km/h	*Gvkm o Gtkm*	*M€/año*	*c€/vkm c€/tkm*	*M€/ año*	*M€/ año*	*GE/GT %*	*EG/IT %*	*c€/vkm c€/tkm*
Cercanías	53,29	8.417	574	6,82	69,35	556	12,08	12,47	0,82
Regionales	71,21	2.745	222	8,10	14,88	216	6,69	6,88	0,54
Larga Dist.	89,29	6.322	426	6,73	33,1	480	7,78	6,89	0,52
AVE	159,9	2.325	262	11,26	14,58	276	5,57	5,28	0,63
Mercancías	54,5	11.071	323	2,91	52,68	409	16,32	12,89	0,48
TOTAL	**69,07**	**30.880**	**1.807**	**5,85**	**184,6**	**1.937**	**10,22**	**9,53**	**0,60**

Elaboración propia (García Álvarez, 2008) sobre datos de la Memoria anual de Renfe 2005.

La referencia de que la energía supone en el ferrocarril tan solo el 9,53% de los ingresos comerciales contrasta con otros modos de transporte, como el automóvil en el que la energía supone alrededor del 50% de los costes totales, el autobús con el entorno del 25 al 35% y del avión del 20 al 30%. En el caso del ferrocarril se ha producido un descenso significativo, puesto el peso de la energía en los costes totales llegó al 28% en el año 1958 (García Álvarez, 2011c).

El análisis del peso de los costes energéticos sobre los ingresos presenta una debilidad: los ingresos unitarios generados por cada unidad de tráfico (viajero.km) son muy diferentes según el tipo de tráfico; de hecho el ingreso por unidad de tráfico crece fuertemente al aumentar la velocidad media, como puede verse en (García Álvarez & Luceño Ramos, 2011). Desde el punto de vista técnico parece más relevante la cantidad de energía consumida por viajero.kilómetro, en lugar de emplear el porcentaje de costes energéticos sobre los ingresos o sobre los gastos. Utilizando este criterio, en la figura 30 se puede observar cómo los trenes de la Unidad de Negocio de alta velocidad, que es aquella cuyos trenes tienen la mayor velocidad (160 kilómetros por hora) resulta ser precisamente la que registra un menor consumo por viajero.kilómetro. El consumo de los trenes del resto de las Unidades de Negocio va siendo mayor a medida que disminuye la velocidad media.

Figura 30. **Comparación del consumo de energía por viajero.kilómetro en diversos tipos de trenes ordenado de menor a mayor velocidad media.**



Elaboración propia (García Álvarez, 2008) sobre datos de la Memoria anual de Renfe 2005.

Este hecho no debería sorprender, pues si se comparan los consumos en diferentes ciclos de uso de los automóviles, se puede observar cómo el consumo de combustible en ciclo urbano (con velocidad media de 40 kilómetros por hora) es alrededor de un 60 por ciento superior al consumo de mismo coche en ciclo interurbano (con velocidad media de 100 kilómetros por hora). En el caso de los autobuses ocurre lo mismo: en los servicios urbanos (con velocidad media del orden de 20 kilómetros por hora) el consumo de energía del autobús está aproximadamente un 30 por ciento por encima de los recorridos interurbanos, con velocidades medias del orden 70 kilómetros por hora (Cillero Hernández, Martinelli, & Bouzada Outeda, 2009).

➢ Trabajos basados en casos concretos

El autor ha publicado diversos trabajos en los últimos años sobre el consumo de energía de los trenes de alta velocidad en todos los casos con el apoyo de un simulador de consumos energéticos de desarrollo propio, cuyos datos han sido contrastados de forma práctica, disponiendo de un alto grado de precisión. Algunos de estos trabajos, junto con los de otros autores, permiten comparar en casos concretos el consumo de energía del tren de alta velocidad con el tren convencional.

Hemos escogido tres casos: uno de trenes diferentes (de alta velocidad y convencional) en diferentes líneas (de alta velocidad y convencional); otro de trenes diferentes (convencional y de alta velocidad) en la misma línea; y finalmente, otro de trenes iguales (de alta velocidad) en dos líneas diferentes (alta velocidad y convencional).

El caso de diferentes trenes en diferentes líneas

El objetivo del primero de estos trabajos (García Álvarez, 2005) era analizar las afirmaciones que se hacen con frecuencia calificando al tren de alta velocidad de "depredador de energía" y las campañas en contra de estos trenes de quienes reclaman, en aras de una reducción del consumo y de las emisiones del transporte, la expansión de las líneas convencionales mejoradas o la limitación de velocidad de los trenes. Por ello, en aquel trabajo se comparan los consumos del tren de alta velocidad con los del tren convencional en línea mejorada.

Así, mediante simulación validada con datos reales, se comparó específicamente el consumo de energía de un tren convencional a 200 kilómetros por hora (formado por una locomotora eléctrica de la serie 252 y 7 coches tipo "Arco") circulando por una línea clásica mejorada (la de Barcelona a Alicante, en el llamado "Corredor Mediterráneo") con el consumo de un tren de alta velocidad (Talgo 350, serie Renfe 102) en el tramo de Madrid a Lleida de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona. En ambos casos, el tren tiene la misma capacidad (316 plazas).

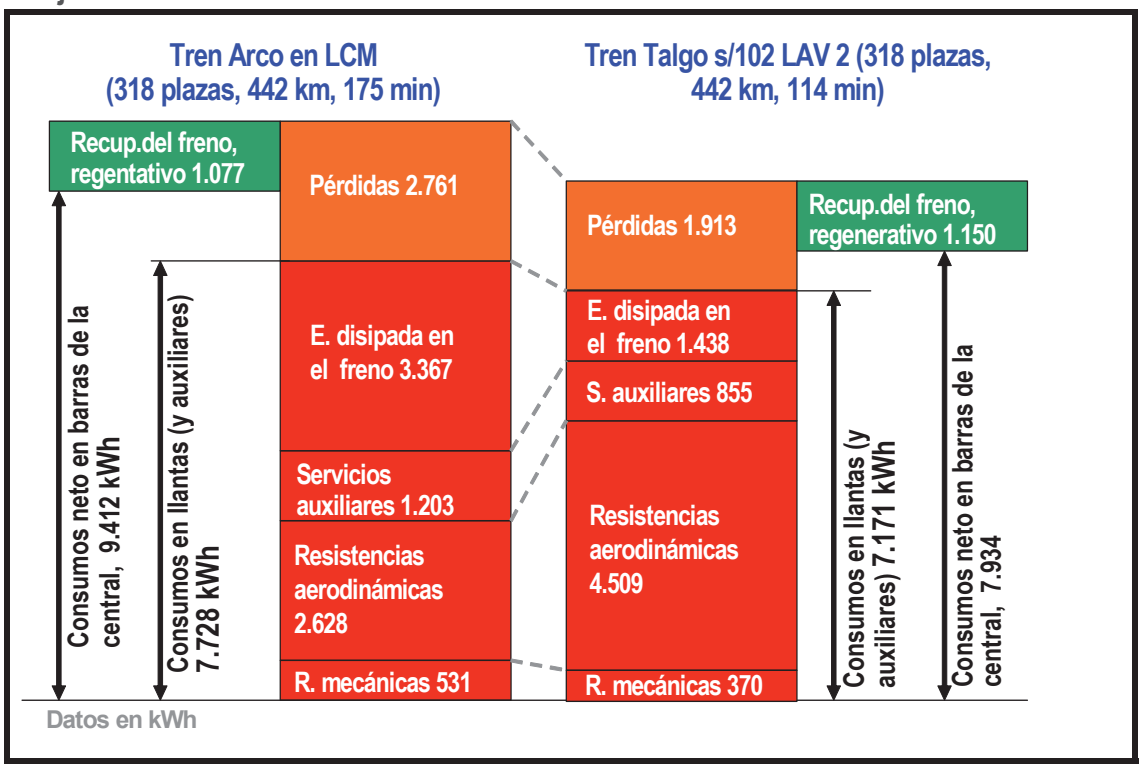
La velocidad media conseguida es superior en un 32,6 % en el tren de alta velocidad, pese a lo cual el consumo de energía por kilómetro es menor en el tren de alta velocidad, tanto si se mide la energía importada en pantógrafo (- 7,2%) como si se contabiliza la energía neta (descontando la energía exportada a la red) a la salida de la central generadora de energía eléctrica[9] (-15,7%). Dado el objetivo del análisis, no se tuvo en cuenta el efecto de la reducción del recorrido de las líneas de alta velocidad frente a las convencionales (que, por ejemplo, en el caso del tramo de Madrid a Lleida es del 16,5%), lo que haría la diferencia aún mayor a favor de la alta velocidad.

Para separar la influencia en este resultado de las características del tren por un lado, y de las propias de la línea y del servicio por otro, se simuló también el consumo del mismo tren de alta velocidad (Talgo 350) circulando por la línea convencional mejorada. Se observa que la diferencia del consumo es más reducida que en el caso real, pero sigue siendo inferior el consumo (- 7,4% en barras de la central) en el caso de la línea de alta velocidad. Todo ello permite que la conclusión del trabajo sea que "no se puede afirmar que el consumo de energía del tren de alta velocidad (a 300 kilómetros por hora o más) sea esencialmente diferente del tren convencional mejorado (circulando a velocidades máximas del orden de 200 kilómetros por hora), con características homogéneas del servicio".

[9] La diferencia entre la energía producida en la central generadora y la energía importada en el pantógrafo de un tren son las pérdidas en las conversiones y transmisiones de la energía desde la salida de la central hasta la entrada del tren, menos la energía regenerada por el frenado (negativa). En suma:
Energía generada en la central para un tren = Energía importada en pantógrafo + pérdidas en la red y catenaria - menos energía regenerada en el frenado y devuelta a la red..

En la figura 31 se pueden ver las diferencias del consumo de uno y otro tren, en cada uno de diversos sumandos del consumo.

Figura 31. **Comparación del consumo de un tren de alta velocidad con otro convencional mejorado en la misma distancia.**



Fuente: Elaboración propia (García Álvarez, 2005)

Puede observarse que, pese a que se consigue una velocidad media inferior, el consumo (tanto en llantas del tren como a la salida de la central generadora) es mayor en el tren convencional mejorado. Ciertamente, el consumo debido a la resistencia aerodinámica es mucho mayor (+71,6%) en el tren de alta velocidad, pero todos los demás sumandos del consumo son menores: así ocurre con las resistencias mecánicas (-30,4%), con el consumo de los servicios auxiliares (-28,9%), las pérdidas en la locomotora y en la red (-30,7%) y, sobre todo, la energía disipada en el freno (-57,29%), sumando en que se produce la mayor disminución en el consumo.

El caso de diferentes trenes en la misma línea

Otra comparación de un nuevo tren de alta velocidad con un tren clásico sobre la misma línea (aunque mejorada) puede encontrarse en (Lukaszewicz & Andersson, 2006) que han analizado en profundidad el consumo de los trenes en Suecia.

Estos autores muestran que en el mismo recorrido (Väterás a Estocolmo), en 1994 un tren convencional empleaba 78 minutos y consumía 0,042 kWh/plaza.km, mientras que en 2004 el tren de alta velocidad pendular X2000, con una parada más, emplea 53 minutos (-32%) y consume 0,030 kWh/plaza km (-28%).

El caso del mismo tren en líneas diferentes

En (García Álvarez & Martín Cañizares, 2007) analizamos el consumo comparado del mismo tren en dos trazados entre los mismos puntos: uno por línea de alta velocidad, y otro por línea convencional; y en dos casos concretos: el de un tren Alvia (serie Renfe 120) entre Lleida y Roda de Bará, y el de un Talgo 200 entre Córdoba y

Antequera. Estos trenes (de ancho de vía variable) pasaron a circular desde diciembre de 2006 por los nuevos trazados de alta velocidad, dejando de hacerlo por los convencionales.

Se comprobó que en este caso, los trenes Alvia y Talgo 200 consiguen reducciones del consumo de energía en pantógrafo del 16% y del 8% respectivamente al pasar de circular por la línea convencional a hacerlo por la de alta velocidad entre las mismas estaciones, lo que es compatible con aumento de la velocidad media de un 64% y de un 78% respectivamente.

También se analizó en el mismo artículo el consumo de electricidad de estos trenes, medido en barras de salida de la central generadora. En el caso de Lleida a Roda se observó una reducción del consumo en la central del -40%, mayor que la que se mide en el pantógrafo (-16%). Algo similar ocurre el caso de la ruta de Córdoba: el consumo en barras de la central es menor en un 27% (en pantógrafo la reducción del consumo es del 8%). Las diferencias se deben a que, al estar las líneas de alta velocidad electrificadas a mayor tensión (25 kV frente a 3 kV), las pérdidas son menores; y además a que el aprovechamiento del freno regenerativo es mayor en líneas de alta velocidad que en las líneas convencionales.

➢ Análisis de los trabajos de Kemp y Van Essen a la vista de la experiencia y conocimiento disponible

A la vista de los datos disponibles y del conocimiento acumulado con la explotación de la alta velocidad en España y en todo el mundo, parece conveniente matizar los datos que proceden de un estudio teórico y lo predicho por (Kemp, 1993) que no se ajusta a la experiencia española derivada de casi 25 años de explotación en alta velocidad.

En el caso de (van Essen et al., 2003), los datos en los que apoya sus conclusiones parecen igualmente desproporcionados con la realidad española en el consumo de diversos tipos de trenes de alta velocidad, y además se apoya en hipótesis que quizá pudiera ser válidas en el entorno holandés, pero no lo son en absoluto en el entorno español, ni probablemente en otros países.

Contraste de los trabajos de Kemp

Parece conveniente matizar, por una parte, que Kemp no tuvo en cuenta que la misma cantidad de energía primaria empleada para producir electricidad no tiene el mismo efecto en las emisiones de gases de efecto invernadero, ni en la contribución al agotamiento de los combustibles fósiles que si la energía primaria que se emplea para el transporte es derivada del petróleo. Como ya se ha expuesto, la simple comparación de energía primaria no es relevante a ningún efecto práctico.

Pero con todo (y al margen de numerosas cuestiones metodológicas que serían discutibles), la diferencia más importante con nuestros propios estudios reside en el consumo del tren de alta velocidad, ya que el predicho por Kemp en 1993 no se ajusta a los datos aportados por la experiencia española de explotación de alta velocidad.

En efecto: Consideremos el recorrido de Madrid a Barcelona (620 kilómetros, algo superior a la que cita de Londres a Edimburgo) y tomemos un tren de alta velocidad español de la serie 103, con 397 plazas, rodando a diversas velocidades máximas. Calculamos el tiempo de viaje con el simulador *SimMarchas* y el consumo con el Alpi2810 [10](ambos contrastados ampliamente con la realidad). Para homogeneizar, consideramos para el cálculo del tiempo un margen de regularidad de valor en la

[10] Véase en (Martín Cañizares, M. del P., 2011) detalles de estos simuladores

media de la banda recomendada por la UIC (8%) (UIC, 2000); y el consumo lo calculamos en llantas del tren (incluyendo los auxiliares), y por cada plaza del tren para que sea estrictamente comprable el dato de (Kemp, 1993).

El resultado muestra, pese a la mayor distancia (+3,3%):

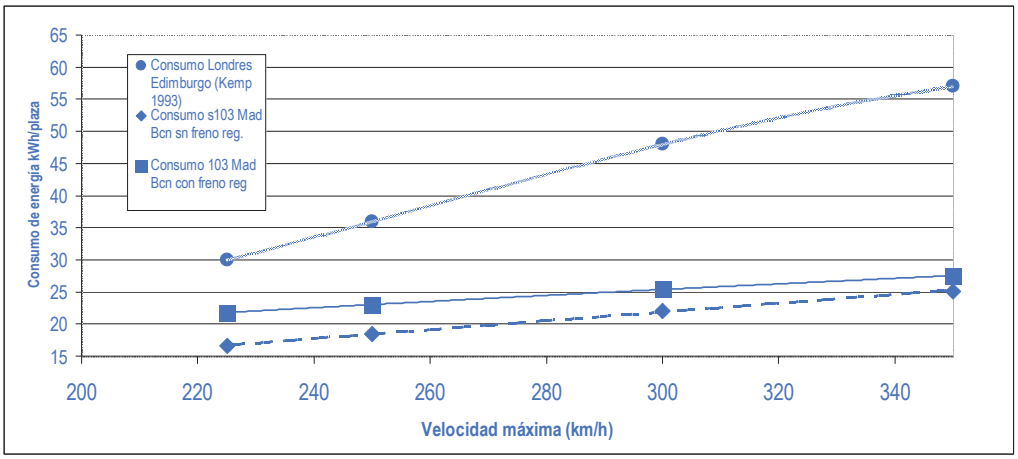
- Unos tiempos de viaje algo inferiores a los de Kemp (entre 6 y 16 minutos), lo que puede atribuirse a diferencias lógicas, por el trazado de la línea o por los márgenes adoptados.
- Un consumo de energía sensiblemente inferior al previsto por Kemp. Las diferencias llegan a ser del 56%. El tren de la serie 103 de Madrid a Barcelona a 350 kilómetros por hora consume en llantas 25,08 kWh por plaza, menos de la mitad de la cifra presentada por Kemp. Si bien es cierto que hemos considerado que (como ocurre en la realidad) existe freno regenerativo, y seguramente en el estudio de Kemp (basado en TGV francés de 1981 que no tenía freno regenerativo) no se ha considerado esta ventaja. Aún sin considerar la aportación del freno regenerativo, el consumo del AVE entre Madrid y Barcelona sería, a 350 kilómetros por hora, de 27,47 kilovatios hora por plaza, inferior en un 52% al indicado en (Kemp, 1993).

En la tabla 21 y en la figura 32 se pueden ver las diferencias descritas.

Tabla 21. **Comparación entre los tiempos de viaje y el consumo de energía a diferentes velocidades para un viaje de Londres a Edimburgo y otro de Madrid a Barcelona**

Vel. Máx	Consumo Londres-Edimburg	Consumo Madrid-Barcelona con freno regener.	Consumo Madrid-Barcelona sin freno reg.	Tiempo Londres-Edimburg	Tiempo Madrid-Barcelona	Dif. tiempo Mad a Bac – Lond a Edim	Dif.consumo Mad a Bcn-Lon Edim con freno reg.	Dif consumo Mad a Bcn-Lon Edim sin freno reg
km/h	*kWh llanta/plaza*	*kWhllanta/plaza*	*kWhllanta/plaza*	*horas*	*horas*	*min*	*kWh/plaza*	*kWh/plaza*
225	30	16,57	21,77	3,25	3,1	9	-13,43	-8,23
250	36	18,40	23,00	2,95	2,85	6	-17,60	-13,00
300	48	22,00	25,50	2,65	2,5	9	-26,00	-22,50
350	57	25,08	27,47	2,55	2,3	16	-31,92	-29,53

Figura 32. **Comparación del consumo de energía a diferentes velocidades para un viaje de Londres a Edimburgo (Kemp, 1993) y de Madrid a Barcelona (elaboración propia)**



Fuente: Datos de Londres a Edimburgo de Kemp, y de Madrid a Barcelona (elaboración propia, (García Álvarez, 2008)).

Reflexiones sobre los trabajos de Van Essen

Como ya se ha indicado, Van Essen da un consumo de 0,523 MJ de energía primaria por viajero.km. Para convertir este indicador en uno más comparable con los habituales (por ejemplo, kilovatio hora por kilómetro tren), en primer lugar convertimos la energía primaria (en MJ) en energía en pantógrafo (en kWh), suponiendo el rendimiento global del 38% que menciona Van Essen. Ello supone 0,055 kWh por viajero.kilómetro, y multiplicando por el factor de aprovechamiento (0,49) resultan 0,027 kWh/p.km y por las plazas por tren (377), se llega a un consumo de 10,2 kWh/km. No es un valor alto y en todo caso está por muy debajo del automóvil y del avión. Para situarlo en su contexto debe señarlse que se trata de un tren con una velocidad máxima de 260 km/h y en un país como Holanda con una infraestructura muy llana. La distancia entre paradas, de 47 kilómetros es muy reducida en comparación con los servicios habituales de alta velocidad. Probablemente la imputación de 75 kilómetros de recorrido adicional en coche para llegar a la estación tenga un peso muy importante en el conjunto del consumo.

2.3. Dinámica del tren

Sobre un tren actúan en cada momento diversas fuerzas longitudinales, siendo la proyección de su suma vectorial la que produce la aceleración o deceleración del tren y explica su consumo de energía.

Para la descripción de la dinámica longitudinal del tren seguiremos la monografía "Dinámica de los trenes de alta velocidad" (García Álvarez, 2011b) que puede consultarse para mayor detalle.

Sobre un tren actúan en cada momento diversas fuerzas: unas son pasivas (en el sentido de que no dependen de ninguna acción del propio tren), mientras que otras son activas (por ejemplo, las de tracción o de freno que proceden del propio tren). Las fuerzas pasivas son: la resistencia al avance en recta; la resistencia adicional en curva; la fuerza gravitatoria; y la fuerza de la inercia.

2.3.1. Resistencia al avance en recta

Se denomina genéricamente "resistencia al avance" a las suma de las diversas fuerzas pasivas que se oponen al movimiento del tren en horizontal y en recta.

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 adicional al avance* debida a la curva.

La expresión más habitual de la *resistencia al avance* de un tren en recta (y en horizontal), sin viento exterior[11], es conocida como "fórmula de Davis" y es la siguiente:

$$R_{ar} = -\left(A + B \times V + C \times V^2\right) \quad [6]$$

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], [daNx(km/h)$^{-1}$] y [daNx(km/h)$^{-2}$].

[11] 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 trabajo. 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 sin control del vehículo.

En muchas ocasiones, los coeficientes se expresan por unidad de masa del tren (erróneamente, a nuestro juicio, por las razones que se expondrán seguidamente). Entonces la ecuación anterior [6] se convierte en la siguiente:

$$R_{ar} = -\left[M \times \left(a + b \times V + c \times V^2\right)\right] \qquad [7]$$

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 [daNxt^{-1}], [daNxt^{-1}x(km/h)$^{-1}$] y [daNxt^{-2}x(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 como 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 velocidad[12].

➢ 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 y Cossío, J. M., 1947) 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.

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,

$$R_m = R_{mrd} + R_{mri} \qquad [8]$$

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

$$R_m = a \times M = a_{mrd} \times M + a_{mri} \times M = (a_{mrd} + a_{mri}) \times M \qquad [9]$$

[12] 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.

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*:

$$R_{mrd} = \varphi \times 1000 \times M \approx 0{,}5a0{,}9 \times M \quad [10]$$

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 (aplicable a velocidades mayores de 7 o 10 kilómetros por hora), el valor de esta resistencia es

$$R_{mri} = 0{,}65 \times M + 13 \times N_e \quad [11]$$

donde: *Rmri* es resistencia mecánica de los rozamientos internos [*daN]*; *M* es la masa real del tren [*t]* y *Ne* es el número de ejes del tren.

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 reducido (en alta velocidad, la resistencia mecánica sólo requiere alrededor del 5% de la energía total consumida por el tren).

➢ Resistencia a la entrada del aire

La resistencia al avance dependiente de la velocidad del tren corresponde, en una parte importante, a la resistencia 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 se 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 m^3 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 m^3/s para la refrigeración de los motores de las cabezas tractoras y 44,9 m^3/s para la renovación de aire; es decir, un tren de alta velocidad de 320 plazas puede precisar más de 77,3 m^3/s (el ICE 3, Serie 103, de 404 plazas, requiere cerca de 150 m^3/s). Este aire debe ser acelerado casi instantáneamente al entrar en el tren, por lo que el tren hace sobre la masa de aire una fuerza hacia adelante y por lo tanto, el tren experimenta una fuerza de reacción hacia atrás de igual valor:

$$R_{ea} = -\frac{Q \times \rho \times dV}{dt} \times \frac{1}{360}[daN] \qquad [12]$$

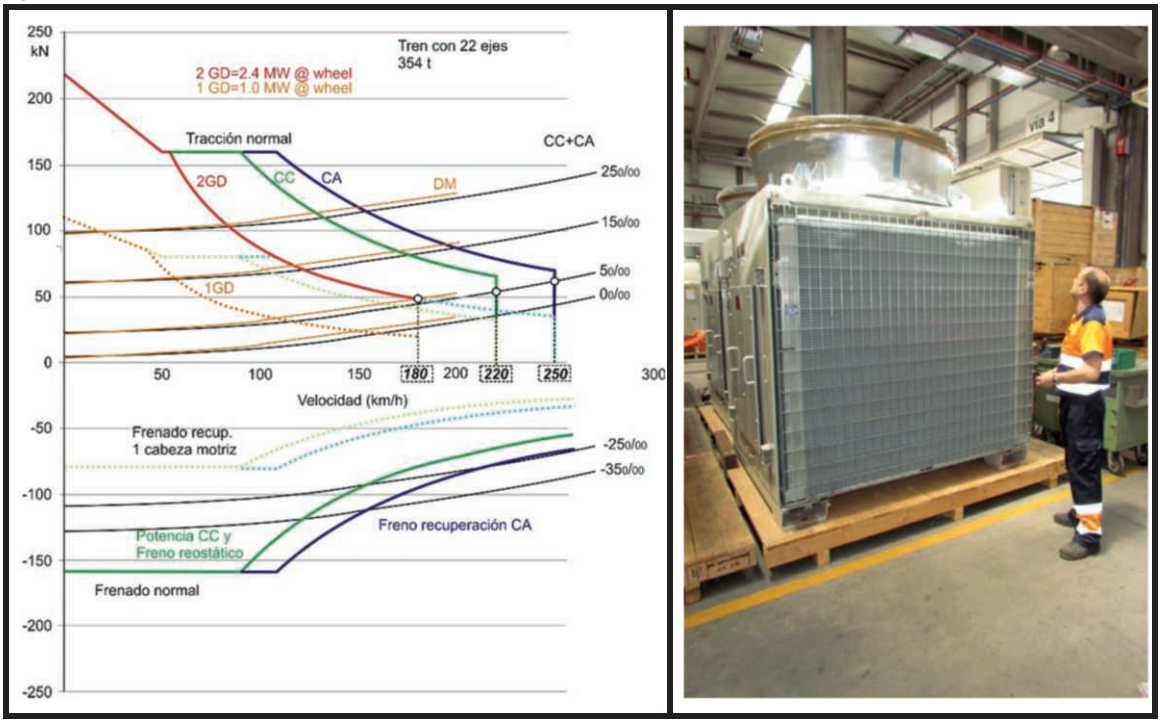
Donde: R_{ea} es la fuerza instantánea que se opone al avance del tren como consecuencia de la entrada de aire en el mismo. Al ser continua la entrada de aire, se convierte en la *resistencia al avance* debida a *la entrada de aire* de refrigeración y el aire acondicionado [daN]; t es la unidad de tiempo en que se produce el proceso [s]; Q es el gasto másico, o flujo de aire que entra en el tren [m^3/s]; ρ es la densidad del aire [kg/m^3] con valor típico de 1,225 kg/m^3 a 15ºC y a presión atmosférica estándar a nivel del mar; y V es la velocidad del tren [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 $daNx(km/h)^{-1}$, es:

$$B = Q \times \rho \times 0{,}0277 \approx 0{,}034 \times Q \qquad [13]$$

La entrada de aire en el tren es mayor en los de tracción diesel que en los de tracción eléctrica, pues se precisa una cantidad importante de aire para la ventilación de los motores diésel. Como muestra se incluyen las curvas de resistencia a avance del tren dual (diésel+diésel eléctrico) de Talgo de la serie 730. Puede verse cómo la resistencia al avance es mayor en tracción diésel. (Figura 33).

Figura 33 .- **Comparación de la resistencia al avance de un mismo tren con tracción eléctrica y con tracción diésel**



A la izquierda pueden verse las curvas de traccion, freno y resistencia al avance del tren dual de la serie 730. Puede observarse cómo para cada valor de la rampa la curva de la resistencia al avance con tracción diésel se separa ligeramente (más al aumentar la velocidad) de la curva de resistencia al avane con tracción eléctrica). A la derecha puede apreciarse el tamaño de la torre de ventilación de uno de los motores diésel de este tren.

Fuentes: Talgo (curva de resistencia al avance); Alberto García (fotografía)

➢ 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:

$$R_{ada} = C \times V^2 \qquad [14]$$

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 vehículo. 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 Monge, 2010).

- 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 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 más la anchura- por su longitud). También depende de su continuidad y rugosidad superficial.

El coeficiente de la *resistencia aerodinámica al avance*, de un tren, a cielo abierto y sin viento, se calcula empíricamente en ensayos, con el tren en deriva (es decir, circulando por inercia, sin tracción ni freno) 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 por ciento. (C. Guiheu, 1982) evalúa la resistencia de un bogie en 15,9 x 10^{-4} daN/(km/h)^2 en el caso de los vehículos no articulados y en 16,72 x 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 Monge, 2010).
- La resistencia aerodinámica del pantógrafo y equipos en techo puede ser del 8 al 20 por ciento. Para (C. Guiheu, 1982), la resistencia de un pantógrafo y sus equipos es de 19,8 x 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 x10^{-4} daN/(km/h)^2.
- La resistencia de presión de la cabeza y cola del tren puede ser del 8 % al 13%.(C. Guiheu, 1982), ofrece el valor, para un TGV, de 8,040 x 10^{-4} daN/(km/h)^2.
- La resistencia específica de los espacios entre los coches, con valor orientativo para cada uno de *0,000272 x p x L daN*/[km/h^2] supone multiplicar por 11 el valor de la resistencia de fricción, aunque aplicada únicamente a la longitud de los pasos entre coches, según la fórmula de Amstrong y Swift citada por (Rochard & Schmid, 2000).

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 aerodinámica al avance* 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:

$$R_{ar_{túnel}} = -\left[A + B \times V + T_f \times C \times V^2\right] \qquad [15]$$

Sobre el factor túnel, señalan (Melis Maynar, de Matías, Alonso, Navarro, & Tasis, 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 Tf 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 kilómetros por hora oscila, orientativamente, entre 1,2 y 1,6 (con secciones de túnel respectivamente correspondientes a diámetros de 11,5 metros o 8,5 metros) y a 300 kilómetros por hora pasa a tener valores entre 1,3 y 2 (suponiendo que tuvieran la misma sección, lo que no ocurre en realidad, pues los túneles en las líneas de alta velocidad tienen mayor sección por razones aerodinámicas).

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 sea frecuente que al paso por los túneles de los trenes de alta velocidad, 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 las resistencias aerodinámicas

La densidad del aire influye de forma directa tanto en la resistencia a la entrada de aire como en las resistencias aerodinámicas de presión y de fricción. Por lo tanto, variaciones de la densidad del aire (que pueden deberse a variaciones de la temperatura y de la presión atmosférica) pueden variar de forma relevante la resistencia al avance.

El cálculo de la densidad real del aire (a una presión de *P* milibares y a una temperatura de θ ºC) se hace sobre el dato de que densidad del aire es, con presión de 1.013 milibares y temperatura de 0ºC, ρ_a=1,293 kg/m^3. En el caso más general:

$$\rho_{real} = \rho_{nominal} \times \frac{P}{1013} \times \frac{273{,}16}{273{,}16+\theta} = \frac{P \times 0{,}34866}{273{,}16+\theta} \qquad [16]$$

Para tener una idea del orden de magnitud de las variaciones de la resistencia al avance que pueden suponer las variaciones de la densidad del aire, puede deducirse de la fórmula anterior que a -10ºC, la densidad del aire (a la presión atmosférica normal) es de 1,342 kg/m^3, mientras a 40 ºC, la densidad del aire es del 1,127 kg/m^3, 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 kilómetros por hora 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 15ºC) a 40º; y el consumo se eleva a 13,7 kWh/km cuando la temperatura baja a -10º 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 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%.

En (García Álvarez, 2011b) 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.

2.3.2. Resistencia adicional 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* para vía de ancho 1.668 milímetros se ha comprobado de forma empírica que responde, aproximadamente, a la fórmula:

$$R_{ac} = -\left[M \times \frac{800}{R} \right] \qquad [17]$$

y en vía de ancho 1.435 mm la fórmula es la misma, con el valor 600 en vez de 800. Donde: *Rac* es la resistencia al avance debida a la curva [daN]; *R* es el radio de la curva [m]; y *M* es la masa del tren [t].

➢ Resistencia media equivalente de las curvas

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 la que transita el tren. 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:

$$R_m = a_{mrd} \times M + a_{mri} \times M = (a_{mrd} + a_{mri}) \times M = M \times a \qquad [18]$$

Donde: R_m es la resistencia mecánica; M es la masa del tren, en toneladas y a_{mrd}, a_{mri} y a son respectivamente 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:

$$E_m = L \times R_m = L \times M \times a \qquad [19]$$

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 mm[13]) es

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

$$R_{ac} = -\left[M \times \frac{600}{R_c} \right] \qquad [20]$$

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

$$E_{curvas} = \sum (l_c \times R_{ac}) = M \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} \qquad [21]$$

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

$$a_{cur} = \frac{1}{L} \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} \qquad [22]$$

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

$$E_{curvas} = M \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} = L \times M \times \frac{1}{L} \times \sum \frac{l_c \times 600}{R_c} = L \times M \times a_{cur} \quad [23]$$

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:

$$E_{m+curvas} = L \times M \times a + L \times M \times a_{cur} = L \times M \times \left(a + a_{cur}\right) \quad [24]$$

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≈350 kilómetros por hora) con ancho 1.435 mm (calculado para la línea Madrid-Barcelona: 0,08 daN/t.
- Línea de alta velocidad (210<V<300 kilómetros por hora) 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≈160 km/) 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≈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≈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 adicional 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).

(Lukaszewicz, 2006) 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, 2006) indica que el coeficiente de resistencia en curva de los rodales guiados de los trenes Talgo es de 0,3.

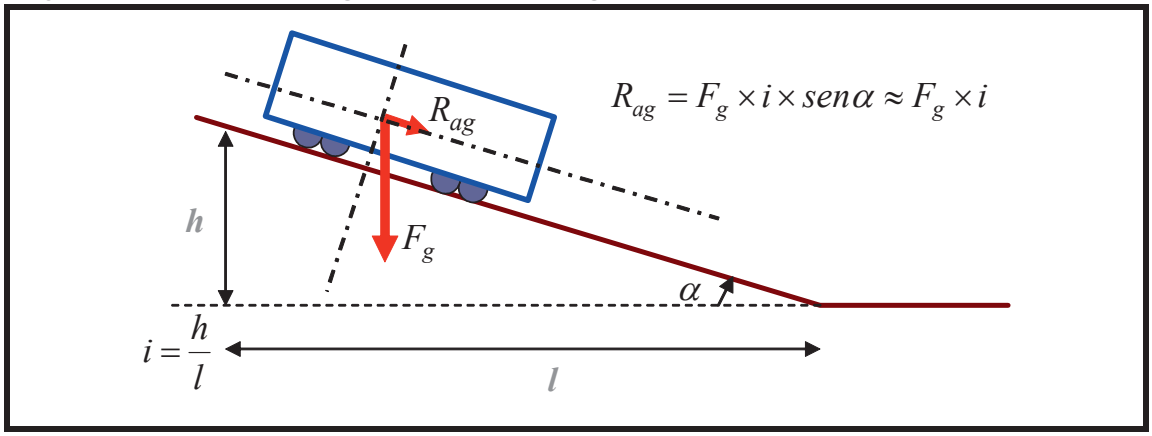
2.3.3. El efecto de la gravedad

Para tener en cuenta el efecto de la gravedad sobre el movimiento del tren, hay que considerar la resistencia al avance debida la rampa o pendiente cuyo valor es el siguiente (Figura 33):

$$R_{ag} = -(M \times g \times i) \times \frac{1}{10} \approx -(M \times i) \quad [25]$$

Donde: *Rag* es la resistencia al avance debida a la fuerza de la gravedad en decaNewtons [daN] y que 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).

Figura 34 .- **Resistencia longitudinal debida a la gravedad**

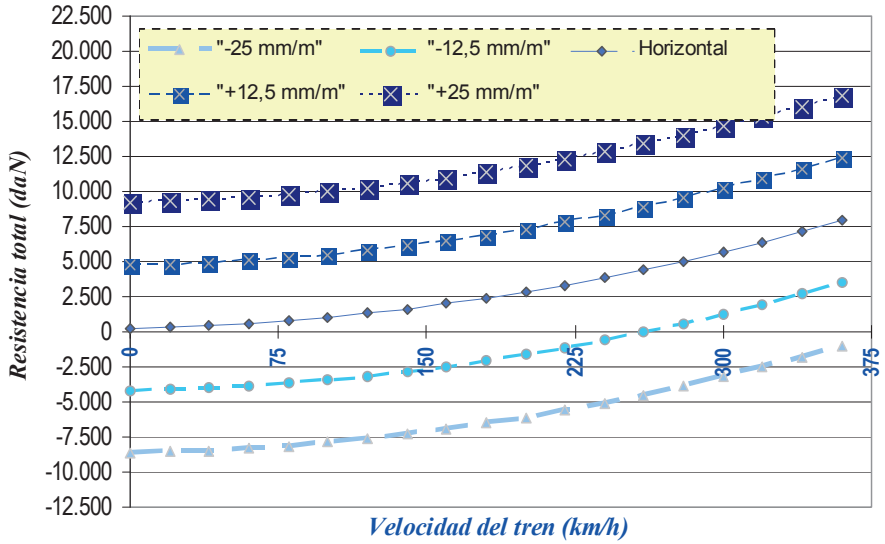


Fuente: (García Álvarez, 2011b)

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 ello, para cada vehículo, en la práctica la resistencia al avance en horizontal (caracterizada gráficamente en una representación $Ra,\ V$ 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 fuerza activa 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 35:

Figura 35. **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.
Fuente: (García Álvarez, 2011b).

2.3.4. Ecuación del movimiento del tren

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

➢ 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:

$$a = \frac{F}{M} \times 10^2 \qquad [26]$$

Si la fuerza neta sobre el tren es positiva, entonces el tren aumenta su velocidad, pues la aceleración resulta mayor que cero; 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 sólo es 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.

➢ 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 se pueden citar, por ejemplo, las ruedas, los ejes y los discos de freno.

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

Puede comprobarse (véase (García Álvarez, 2011b)) que:

$$a = \frac{F}{\left(M + \sum \left(M_{gi} \times \frac{r_i^{\,2}}{R_i^{\,2}} \right) \right)} \qquad [27]$$

Donde Mgi es la masa del conjunto giratorio, en t; r es el radio de inercia polar del conjunto en metros y R es el radio de las ruedas motrices, en metros.

Puede, por ello, señalarse 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), 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:

$$C_{mg} = 1 + \frac{\sum (M_{gi} \times \frac{r_i^{\,2}}{R_i^{\,2}})}{M} \qquad [28]$$

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

➢ 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:

$$a = \frac{F_t + M \times g \times p - F_f - M \times g \times r - A - B \times V - C \times T_f \times V^2 - M \times \frac{600}{R}}{\left(M + \sum \left(M_{gi} \times \frac{r_i^{\,2}}{R_i^{\,2}} \right) \right)} \qquad [29]$$

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. En la figura 22 se presenta la visión de conjunto de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren.

Tabla 22. **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	$R_{av_{hr}} = -\left(A + BV + CV^2\right)$
	Acción gravitatoria en rampa	Masa del tren, inclinación de rampa	$R_{ag} = -\lvert i \rvert \times M \times g$
Acción gravitatoria en pendiente		Masa del tren, inclinación de la pendiente	$R_{ag} = +\lvert i \rvert \times M \times g$
	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	$E_t = Min(+\frac{P_t}{V}, -(M \times K_a))$
	Esfuerzo de frenado	Potencia frenado, masa, adherencia	$E_f = Min(-\frac{P_f}{V}, -(M \times K_a))$

Notas: (1) En túnel, se añade el *Factor de túnel, Tf* 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.
Fuente: (García Álvarez, 2011b).

2.3.5. Dinámica del tren en pendientes y rampas

Al subir las pendientes o al bajar las rampas, interviene la fuerza de la gravedad, que tiene una importancia tanto sobre la dinámica del tren como sobre el consumo de energía del mismo.

➢ 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 (moderable)
- 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.

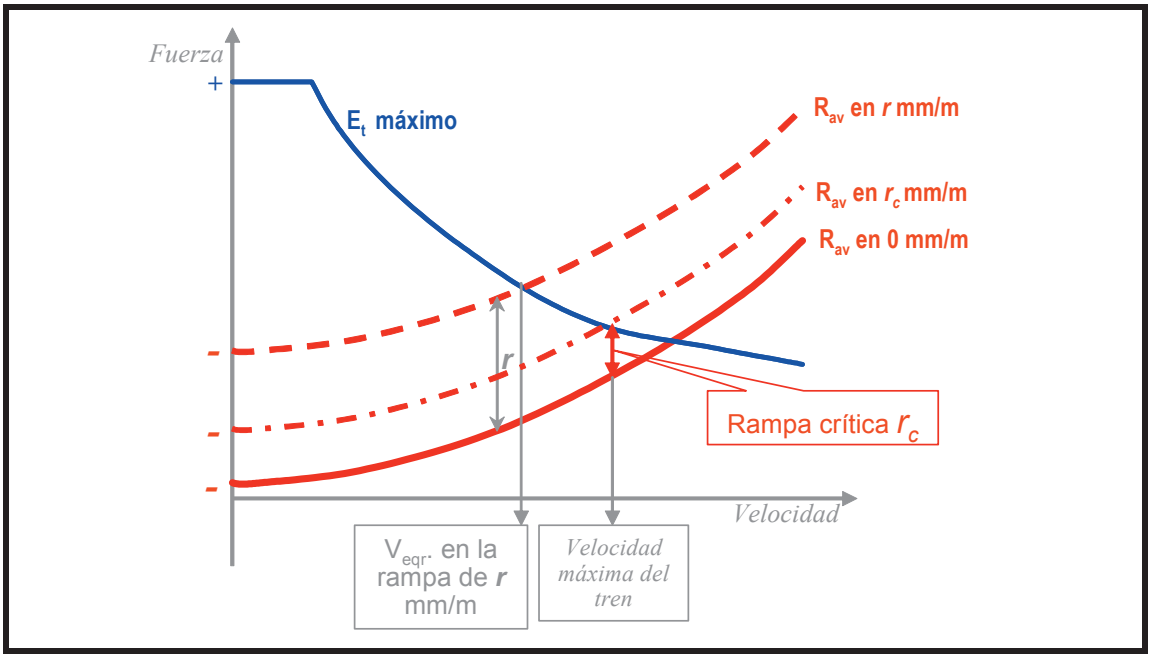
Si la fuerza que actúa a favor del movimiento del tren es superior a las fuerzas que se oponen, el tren puede acelerarse; si es inferior, el tren reduce su velocidad. Existe una velocidad, llamada *velocidad de equilibrio en rampa* V_{eqr} (para un tren y para una rampa, r) para la cual la fuerza de 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:

$$\frac{P}{V_{eqr}} = A + B \times V_{eqr} + C \times T_f \times V_{eqr}^{\ 2} + m \times r \qquad [30]$$

Si la *velocidad de equilibro 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. (Figura 36).

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 (Figura 36).

Figura 36. **Rampa crítica y velocidad de equilibrio en una subida**



Para la velocidad máxima del tren existe una *rampa crítica rc* 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 equilibro en rampa* del tren (*Veqr*). Fuente: Elaboración propia (García Álvarez, 2011b).

Para la rampa crítica (r_c) , se cumple que:

$$\frac{P}{V_{\max}} = A + B \times V_{\max} + C \times T_f \times V_{\max}^{\ 2} + M \times r_c \qquad [31]$$

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 tipo de tren concreto) 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 centímetros por segundo al cuadrado [cm/s^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 (moderable)
- En contra del movimiento del tren la resistencia al avance y la fuerza del freno (moderable, 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 la 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 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.

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:

$$M \times p_e = A + B \times V_{\max} + C \times T_f \times V_{\max}^{\ 2} \qquad [32]$$

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

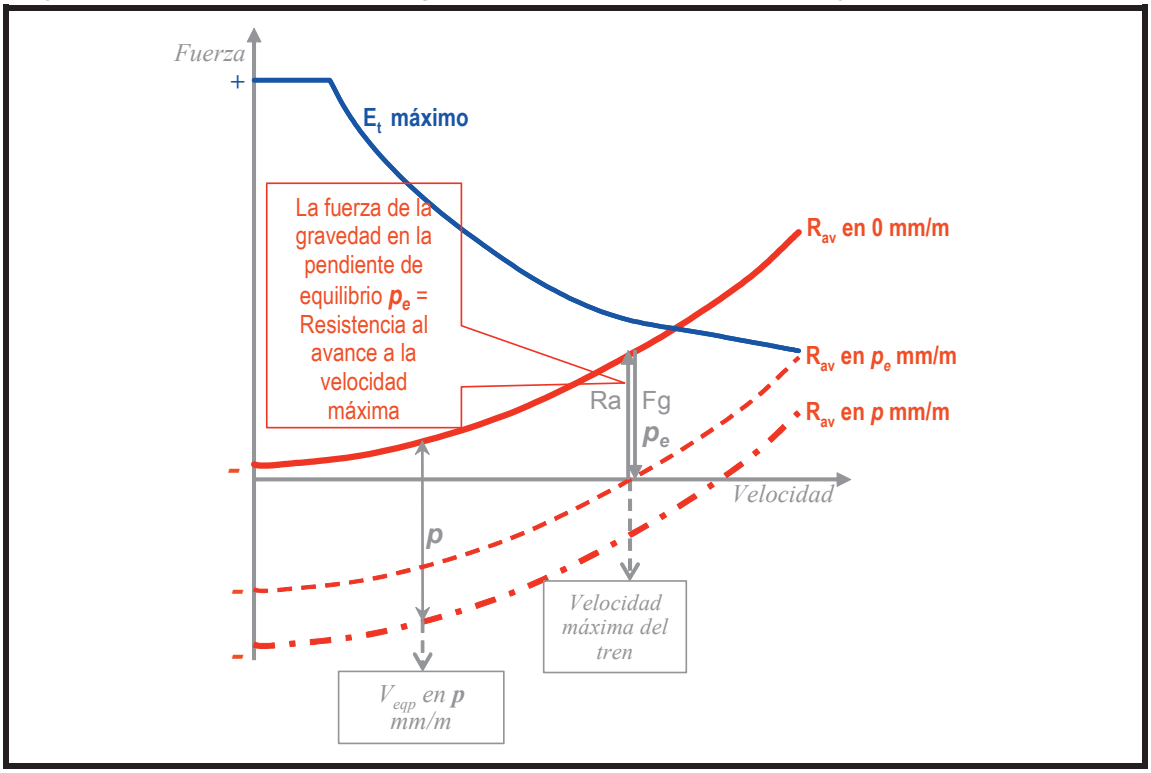
$$p_e = a + b \times V_{\max} + c \times T_f \times V_{\max}^{\ 2} \quad [33]$$

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

$$p = a + b \times V_{eqp} + c \times T_f \times V_{eqp}^{\ 2} \quad [34]$$

En la figura 37 puede apreciarse cómo se determina gráficamente la pendiente de equilibrio para uan determinada velocidad máxima.

Figura 37. **Pendiente de equilibrio y velocidad de equilibrio en una bajada**



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 equilibro del tren. Fuente: (García Álvarez, 2011b)

➢ 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 23 se pueden ver, para cuatro trenes representativos (un mercancías de tamaño medio-grande; un tren convencional de viajeros de 160 kilómetros por hora;

un tren Talgo *Altaria* con máquina de gran potencia, poco peso y 200 kilómetros por hora; 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.

Tabla 23. **Ejemplo de rampas críticas y pendientes de equilibrio de diversos trenes**

Dinámica en pendiente y rampa de algunos trenes representativos

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

Fuente: (García Álvarez, 2011b)

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 forma significativa de la potencia del tren, ni de su masa, y se relaciona 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 milímetros por metro), 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.

2.3.6. El efecto del freno en la dinámica

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 Focault* 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 Focault, 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.

➢ Condiciones de aplicación del freno

Según las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad europeas (ETI) de material rodante de alta velocidad, la máxima deceleración media será siempre inferior a 2,5 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 kilómetros por hora: (Vmax > V > 50 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 cero voltios.

➢ 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 24, para el caso de los trenes de alta velocidad:

Tabla 24. **Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de Alta Velocidad**

		Tiempo equivalente de 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/s²*	*m/s²*	*m/s²*	*m/s²*
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			0,6
Distancias máximas de frenado con freno de emergencia						
		Tiempo equivalente 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
		s	*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

Nota: Se denomina *Caso A* el tren en horizontal, con una climatología normal, con carga normal (80 kg por asiento) y un módulo de freno eléctrico aislado. Se considera *Caso B*, las circunstancias del caso anterior y, además, un distribuidor de freno aislado, una adherencia reducida rueda carril y el coeficiente de fricción entre la guarnición y el disco de freno reducido por la humedad.

Fuente: (Comisión de las Comunidades Europeas, 2008c), ETI de Material Rodante, 2008.

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/s^2;
- Para 120 km/h: 0,61 m/s^2;
- Para 140 km/h: 0,77 m/s^2 ; y
- Para 160 km/h: 0,74 m/s^2.

2.4. Planteamiento del modelo para el análisis del efecto de la velocidad en el consumo de energía y emisiones del ferrocarril

En el presente apartado se trata de especificar de forma sistemática, ordenada y útil para establecer relaciones de causalidad, la función de consumo de energía final que se concreta en un modelo de simulación que permite el análisis del efecto de la velocidad y de otros elementos del sistema en el consumo de energía y en las emisiones en el ferrocarril.

2.4.1. Observaciones metodológicas

La alta velocidad ferroviaria constituye un sistema, por lo que hay que analizarlo en su conjunto. No es correcto comparar únicamente los efectos de algunos de sus elementos. Llegaríamos entonces a la conclusión de que el consumo mínimo se produce con trenes muy ligeros, modernos, en líneas con trazados favorables y explotándolos a velocidades muy bajas, con pocos viajeros y sin paradas comerciales; pero entonces la pregunta sería: ¿para qué se ha construido una línea y fabricado un tren de estas características?

El estudio debe realizarse en el entorno normal de funcionamiento del sistema y de cada uno de los elementos que lo integran

Ámbitos del análisis.- El análisis del efecto de la variación de la velocidad del tren o del paso de uno a otro sistema[14] en el consumo de energía se realizará en dos ámbitos:

- **En el ferrocarril**.- Estudiando la variación del consumo de energía (y de las emisiones) del tren al cambiar su velocidad o al pasar de uno a otro sistema (convencional a convencional mejorado, o a alta velocidad puro).
- **En el conjunto de un corredor o ruta incluyendo todos los modos de transporte**.- Analizando el efecto que se produce en el consumo de energía y en las emisiones en un corredor o en una ruta origen destino (considerando todos los modos de transporte e incluso la demanda inducida) como consecuencia de un aumento de la velocidad del ferrocarril o del paso de uno otro sistema.

Variación de la velocidad y del sistema empleado.- Para dar respuesta a la cuestión de la incidencia de la velocidad y de las características del sistema de alta velocidad en el consumo de energía y en las emisiones en el modelo se expresan éstas en función de la velocidad, así como de otros parámetros característicos del sistema que dependen del vehiculo, de la infraestructura o del servicio, y que pueden tomar

[14] Los "sistemas" estudiados son el de "alta velocidad puro" (AV) con Vmax>250 km/h con tracción eléctrica; el de "alta velocidad en líneas convencionales mejoradas" (LCM), con 250>Vmax>200 km/h con tracción eléctrica; y el convencional (LC), con 200>Vmax. Este último se analiza, por sus importantes diferencias, con dos tipos de tracción: con tracción eléctrica, con tracción diésel (LCe y LCd).

valores diferentes según el tipo de sistema en el que se opera. Ello permitirá analizar de forma separada: i) Por una parte, el efecto de la variación de la velocidad (dando diversos valores a la variable "velocidad media"); y ii) por otra parte, el paso de uno a u otro sistema (dando a los parámetros los valores característicos de cada sistema: alta velocidad pura, alta velocidad por mejora de línea existentes y convencional).

En la comparación entre el sistema de alta velocidad y el sistema ferroviario convencional (en los vehículos, en la infraestructura y en la operación) pueden distinguirse dos tipos de diferencias:

- Unas diferencias son intrínsecas a la alta velocidad: o bien se concretan en el vehículo (menor masa por plaza, menor resistencia específica al avance); o bien en la infraestructura (mayores radios de curva); o bien en la operación (menos paradas).
- Otras diferencias suelen presentarse por la mayor modernidad de las líneas de alta velocidad, pero no cabe excluir de ellas a las líneas y trenes convencionales, al menos a medio plazo (así, la electrificación en corriente alterna en mayores tensiones, el empleo del freno regenerativo, el mayor rendimiento de los vehículos, etc.)

Como el sistema de alta velocidad requiere el uso de los vehículos e infraestructura más modernos, mientras que el sistema convencional puede tener en cada caso diferentes grados de "modernización", en el futuro las diferencias entre ambos tenderán a cambiar por la mejora progresiva del sistema convencional.

Magnitudes y unidades empleadas.- El resultado puede expresarse en función de muchas variables, empleado tanto magnitudes diferentes, como divisores distintos para convertir el indicador absoluto en específico.

Las magnitudes pueden ser energía (la mediremos en kilovatios.hora); o emisiones de gases de efecto invernadero (medidas en kilos de dióxido de carbono equivalente). En el modelo, se ofrecerán los resultados "en cadena" de acuerdo con la metodología expuesta, pero se empleará como indicador más relevante (por las razones expuestas) las emisiones de gases de efecto invernadero.

El divisor será la unidad de oferta, entendida como el producto de la unidad de distancia (km) por la unidad de capacidad (m^2 de supercine útil). Se puede convertir el resultado anterior en consumo específico por plaza.kilómetro (dividiendo por la *densidad de plazas*); por viajero.kilómetro (dividiendo por el *aprovechamiento*); por kilómetro ortodrómico (multiplicando por el *coeficiente de trayectoria*); o por viajero (multiplicando por la *distancia ortodrómica*). Obviamente, las multiplicaciones y divisiones se pueden hacer diverso orden, dando lugar a indiciadores distintos, pero todos ellos útiles según el caso.

Para una mayor claridad, en el modelo que se desarrollará se considerarán todas estas magnitudes y unidades, pues parte de las diferencias de consumos y emisiones entre sistemas se producen en estos divisores o coeficientes.

Punto de medida y perímetro del consumo.- En el modelo se calcula de forma separada la energía importada en el pantógrafo, la energía devuelta por la regeneración del freno y la energía consumida por los servicios auxiliares. Todo ello dará lugar a una gran diversidad de posibles indicadores, debiendo en cada caso utilizarse el más adecuado para el propósito de la comparación.

Procedimiento de cálculo del consumo de energía.- En cuanto al cálculo del consumo de energía, se realiza de abajo a arriba ("bottom-up"), empleando un procedimiento (que se describe más adelante), de "balance de energía"; es decir, de

forma desagregada por componentes del consumo para el conjunto del recorrido, separado los diversos sumandos que lo integran y explican. Se multiplica (cuando sea necesario) por un *coeficiente de ajuste*, fruto de la experiencia en la calibración del modelo y de su contraste con casos reales.

Tipos de variables de las que depende el consumo.- La formulación perseguida debe explicar el consumo total, desagregándolo en sus diversos componentes relevantes, y explicitando las variables de las que depende cada uno de esos componentes. Estas variables pueden estar relacionadas con:

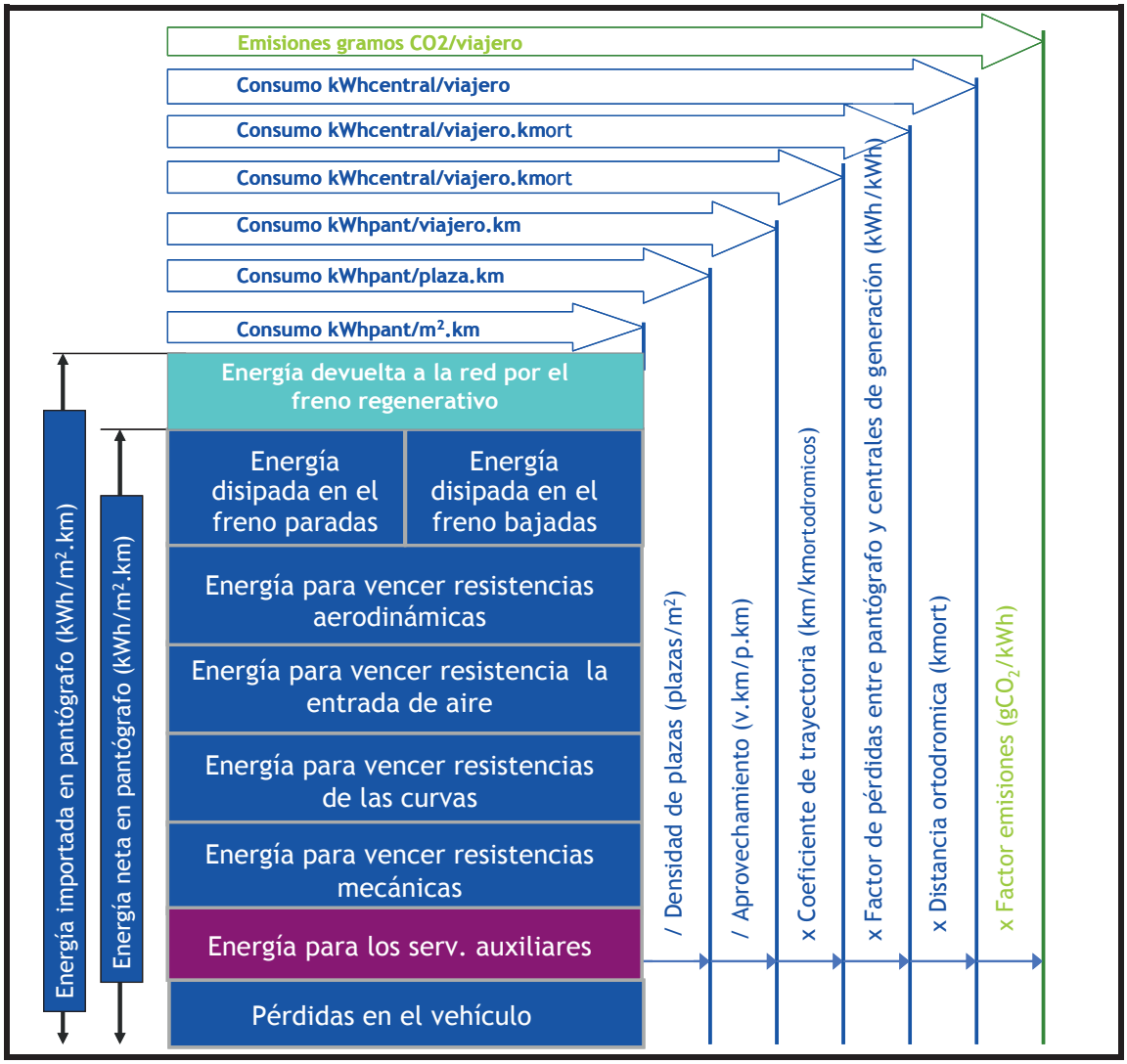
- Características del material rodante empleado (por ejemplo, la masa, las masas rotativas equivalentes, la sección transversal, la superficie mojada, …)
- Datos relevantes de la parte de la infraestructura recorrida por el tren (curvas, rampas, perfil de velocidades estáticas, …)
- Características del servicio (número de paradas técnicas y comerciales, tiempos reales empleados, velocidades, rotaciones, etc.)

El tratamiento en el modelo (figura 38) de las variables en las funciones de consumo y de emisiones es el siguiente:

- La velocidad se trata como una variable autónoma,
- El resto de las variables se agrupan en coeficientes que adoptarán diferentes valores en cada uno de los sistemas.

Ello, lógicamente, sin prejuicio de que en una aplicación concreta (como se realizará en los casos-ejemplo) se empleen los valores reales de cada variable para el caso concreto.

Figura 38. **Esquema del modelo aplicado para el cálculo de la energía y de las emisiones del ferrocarril**



El modelo emplea el "balance de energía" para poder conocer el desglose del consumo, pudiendo considerarse o no el consumo de auxiliares, y descontarse o no la energía exportada por el freno regenerativo. Pueden emplearse diversos divisores para especificar el indicador. En el modelo se recogen todos los sumandos y coeficientes para poder explicar mejor las razones de las diferencias de consumo y de emisiones al variar la velocidad y al cambiar de sistema.

Fuente: Elaboración propia

2.4.2. Formas de cálculo de la energía necesaria para el movimiento

El cálculo del consumo de energía en los trenes en su movimiento se puede realizar de dos formas (tabla 25):

1. **Integrando la fuerza y el consumo** (positivo o negativo) en cada instante (que será diferente según el tren se mueva con velocidad uniforme en horizontal, en subida, en bajada, en un proceso de reducción de velocidad, etc.)

2. **Analizado el balance energético** del tren en el conjunto de un recorrido (normalmente, en un viaje de ida y vuelta, con origen y final a velocidad nula, y a la

misma altitud, con el objeto eliminar del análisis el sesgo que introduce la diferencia de cota cuando el viaje se realiza en un único sentido).

El procedimiento de integración:

- Es útil –casi imprescindible- para apoyar la toma de decisiones "instantáneas" (por ejemplo, para escoger la mejor forma de conducción económica; para decidir si se va devolver a red o almacenar; para dimensionar el sistema eléctrico; etc.)
- Aunque ofrece una cifra bastante ajustada de la cantidad de energía que, en cada instante, se intercambia con la red eléctrica, no explica bien las razones del consumo ya que presenta un resultado agregado del consumo en cada uno de los elementos diferenciales de recorrido o tiempo.

Por el contrario, el procedimiento del balance de energía:

- Sirve para cálculos globales, por ejemplo, para el diseño de infraestructura, de trenes o de servicios en los que no resulta tan importante lo que ocurre en cada instante, sino en el conjunto del recorrido.
- Explica desagregadas las causas del consumo (qué parte se debe a las curvas, a los túneles, a la entrada de aire...) ya que, aunque no ofrece la desagregación por elementos diferenciales de longitud o de tiempo, sí que ofrece la desagregación por componentes del consumo.

Para el propósito de esta tesis parece más adecuado el segundo procedimiento ("balance de energía"), sobre todo porque se pretende establecer una relación de causalidad, especialmente con la velocidad y con los elementos que caracterizan el sistema de alta velocidad. Es por ello el procedimiento que emplearemos en el desarrollo del modelo.

Tabla 25. **Comparación de los procedimientos de cálculo de la energía consumida por un tren en su recorrido**

Procedimiento	Integración de fuerzas	Balance de energía
Ofrece resultados desagregados por…	Elemento diferencial de longitud o de tiempo (por kilómetro, por minuto)	Por componentes sumados de la energía (energía debida a las curvas, a la resistencia aerodinámica, etc.)
Pero agrupados por…	Componentes de la energía	Para todo el recorrido de ida y vuelta
Útil para	Dimensionamiento eléctrico de la infraestructura, cálculo de potencia a contratar, …	Análisis del consumo de energía para su reducción.
Precisión	Mayor precisión en el resultado	Menor precisión, pero con sesgo homogéneo y controlable

Fuente: Elaboración propia

2.4.3. Descripción del procedimiento de cálculo del consumo por el balance de energía

El procedimiento de cálculo de la energía por el balance de energía se basa en el hecho de que la energía que ha entrado a el tren (en todo su recorrido de ida y vuelta) es igual a la que ha salido del tren. Mientras que el cálculo de la energía que ha entrado es complejo, la energía que ha salido del tren se puede calcular de forma

relativamente sencilla y se basa en la regla que podría enunciarse la forma siguiente: "La energía que ha salido del tren en su recorrido es la suma de la energía que ha empleado el vehículo para vencer las diferentes resistencias al avance, más la que ha disipado en el freno, más la necesaria para los servicios auxiliares, más las pérdidas en el propio vehículo".

Seguidamente se explicará el razonamiento que subyace en este procedimiento con mayor detalle.

Fuerzas a realizar por el tren.- Se puede esquematizar el funcionamiento energético del movimiento del tren sabiendo que:

- En cada instante el tren debe vencer una fuerza que se opone a su avance y recibir además energía necesaria para aumentar su velocidad, o su altura;
- En algunos momentos el tren cede una determinada cantidad de energía como consecuencia de una reducción de su velocidad o de su altura.

Por lo tanto, en su movimiento (y con independencia del consumo de energía para los servicios auxiliares), los trenes reciben energía fundamentalmente para tres funciones:

- Para vencer la resistencia al avance (que, como hemos expuesto, depende de la masa del tren de su tamaño, de su velocidad, de que circule en cielo abierto o en túnel, del radio de curva, de la cantidad de aire que entra en el tren y del viento).
- Para incrementar su velocidad, tanto en el origen del viaje como después de cada parada, y en general en cada uno de los puntos en que se aumenta la velocidad. Un incremento de la velocidad del tren requiere una importación de energía, pero conlleva un correlativo aumento de la energía cinética acumulada en él.
- Para aumentar su altitud: cada vez que el tren supera una rampa, su altitud aumenta, y por ello recibe una cierta cantidad de energía que acumula en forma de energía potencial.

Por el contrario, los trenes ceden energía:

- Cuando reducen su velocidad, tanto en una parada como en cualquier momento en que el tren pasa de una velocidad mayor a una velocidad menor (por ejemplo, al acercarse a un punto de velocidad reducida).
- Cuando pierden altitud al circular por una pendiente, ya que entonces disminuye la energía potencial acumulada.

Almacenamiento de energía en el tren.- En cada momento, el tren tiene almacenada en su propia masa:

- Energía cinética, en cantidad proporcional a su velocidad, cuyo valor es:

$$E_c[kWh] = \frac{1}{2} \times (M + M_{rot})[t] \times \left(\frac{V[km/h]}{3{,}6} \right)^2 \times \frac{1.000}{3{,}6 \times 10^{-6}} \qquad [35]$$

- Energía potencial, proporcional a la altura (*h*) en la que el tren se encuentra (respecto a la altura inicial) cuyo valor es.

$$E_p[kWh] = M[t] \times g[m/s^2] \times h[m] \times \frac{1.000}{3{,}6 \times 10^{-6}} \qquad [36]$$

Desde el punto de vista del almacenamiento de energía en el tren, y si no hubiera pérdidas, podemos analizar dos posibles escenarios retóricos:

1. Si el tren pudiera almacenar energía sin restricciones (por ejemplo, en un volante de inercia o en baterías embarcadas), el consumo de energía en el recorrido de ida y vuelta sería exclusivamente el consumo necesario para vencer la resistencia al avance (incluyendo, lógicamente, las pérdidas debidas al rendimiento del vehículo). Y ello, por dos razones:

- Toda la energía consumida para acelerar el tren (y por ello, para aumentar la energía cinética) se almacenaría y se "aprovecharía" al reducir la velocidad. Con la velocidad inicial y la final igual a cero, el consumo neto de energía del exterior para acelerar sería nulo.
- La totalidad de la energía potencial recibida en las rampas (subidas), de igual forma, se podría recuperar o almacenar en las bajadas, por lo que al completar el viaje de ida y vuelta (como la altitud final es igual a la inicial), no habría ningún consumo neto de energía exterior por la subida de las rampas.

2. Si la energía cinética y potencial no se pudiesen almacenar, ni recuperar, ni aprovechar de ninguna forma, el consumo de energía de un tren para su movimiento en un recorrido sería la suma de: a) la energía necesaria para vencer la resistencia al avance; más b) la energía precisa para acelerarlo todas las veces en que deba aumentar su velocidad; más c) la energía necesaria para subir todas las rampas que deba de acometer en su recorrido.

En la realidad no se presenta ninguno de estos casos extremos, por dos razones:

- Por una parte, cuando el tren reduce su velocidad o baja una pendiente, una parte de la energía cinética o potencial que cede el tren se emplea para vencer la resistencia al avance. Por ello, el consumo es menor que el correspondiente al segundo escenario, ya que no es preciso aportar energía del exterior para vencer esta parte de la resistencia al avance. Además, si el tren sube una rampa pero pierde velocidad; o si baja una pendiente y gana velocidad, se puede producir una conversión de la energía cinética en potencial o al revés.
- Por otra parte, si el tren tiene freno de recuperación, una parte de la energía que el tren cede al reducir su velocidad o al bajar una pendiente se emplea para alimentar los servicios auxiliares, y otra parte se devuelve a la red. Por ello, el consumo neto disminuye con respecto al escenario más desfavorable. También se puede hacer una conducción económica que permite aplicar energía cinética para vencer la resistencia al avance, lo que reduce especialmente el consumo neto si no hay freno regenerativo, o si éste no tiene un alto factor de aprovechamiento.

Los procesos de almacenamiento de energía interactúan de forma dinámica entre ellos, y con el uso de la energía para vencer la resistencia al avance, lo que explica la complejidad del cálculo de la energía que entra en el tren sumando los diferentes componentes (la energía para acelerar efectivamente "entra en el tren", pero una parte se aprovecha para diversos usos, y análogamente ocurre con la necesaria para subir una rampa).

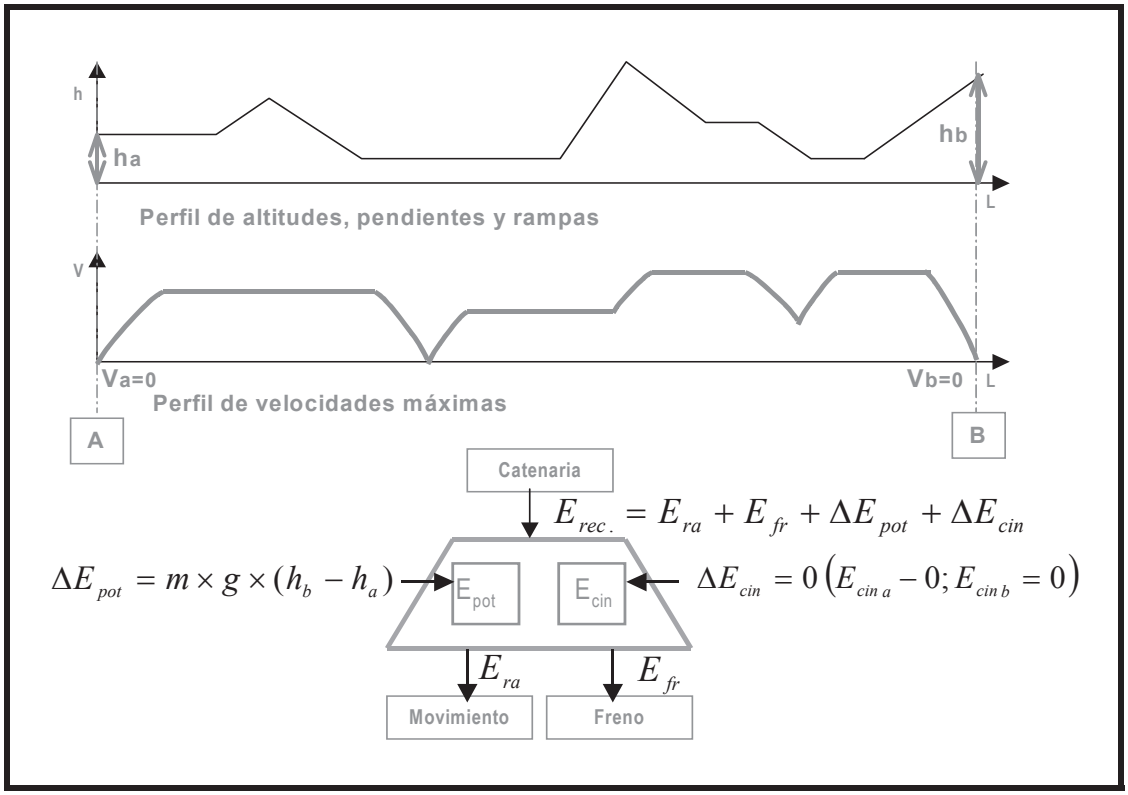
Balance energético en el recorrido de un tren.- A lo largo de su recorrido un tren pasa por diferentes procesos cinemáticos elementales (paradas, reducción de velocidad, aceleraciones, etc.) y por algunos procesos complejos (por ejemplo, subida y reducción de velocidad a la vez, o parada en una pendiente).

El balance energético en el conjunto del recorrido, en virtud de lo expuesto, es el siguiente:

- El tren recibe del exterior la energía necesaria para vencer la resistencia al avance en horizontal en todos los puntos de su recorrido, excepto:
    - Cuando el tren reduce su velocidad circulando en deriva o cuando está frenando (casos en que vence la resistencia al avance con la fuerza de la inercia).
    - Cuando baja una pendiente mayor que la pendiente de equilibrio (ya que una parte de la resistencia al avance se vence entonces con la fuerza gravitatoria).
- El tren recibe del exterior la energía necesaria para aumentar su energía cinética en todos los procesos de aceleración, excepto:
    - Cuando acelera bajando una pendiente, ya que entonces el incremento de energía cinética viene, en parte, de la disminución de la energía potencial.
- El tren recibe del exterior la energía necesaria para aumentar su energía potencial en todos los casos en que sube una rampa y por tanto aumenta su altitud, excepto:
    - Cuando, subiendo una rampa, pierde velocidad. Entonces, parte de la energía potencial viene de la pérdida de energía cinética.

Aplicación del principio de la conservación de la energía.- El enfoque más útil para predecir y analizar el consumo desagregado de energía de un tren en un recorrido entre dos puntos consiste en aplicar al tren, en el conjunto de su recorrido, el principio de conservación de la energía: la energía que entra en el tren es igual a la energía que sale del tren, más (en su caso) la energía que se ha almacenado en el recorrido. Como es relativamente sencillo calcular la energía que ha salido del tren y la que se ha almacenado, se puede calcular indirectamente (por diferencia) la que ha entrado en el tren.

Figura 39. **Consumo energético de un tren en su recorrido entre A y B (sin considerar consumo de auxiliares ni freno regenerativo)**



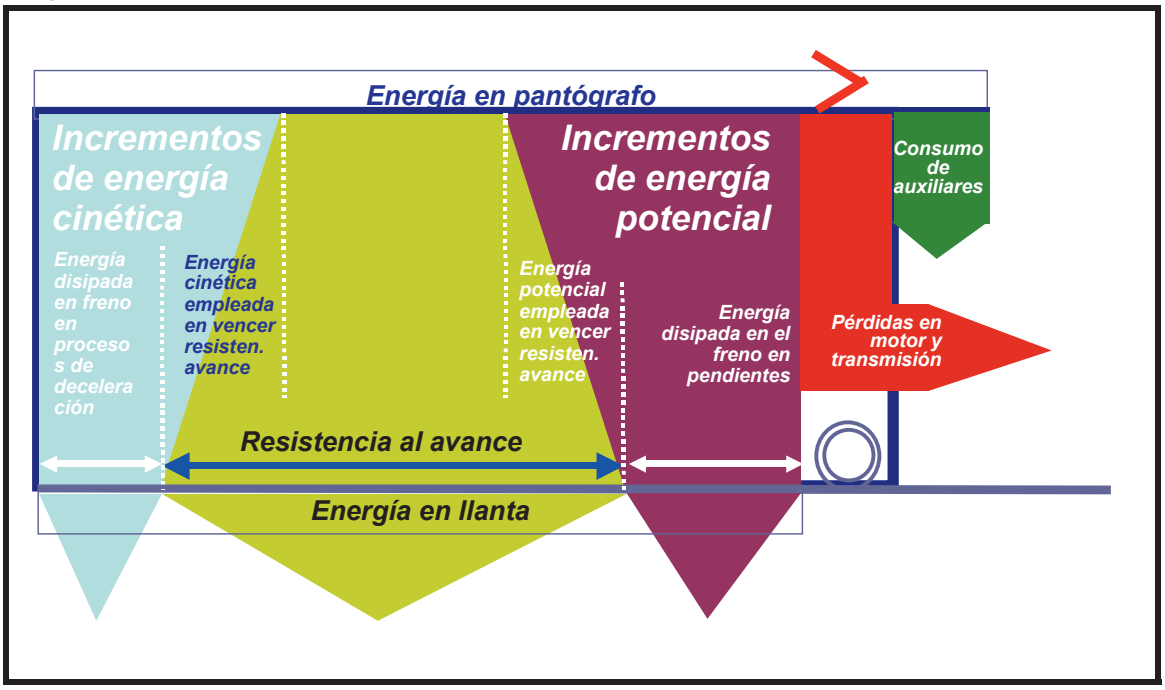
En su recorrido entre el punto A y el punto B (situados a diferente altitud) la energía consumida por el tren es la suma de la energía necesaria para vencer la resistencia al avance, más el incremento de energía potencial (si B está más alto que A), más la energía disipada en los procesos de frenado.

Fuente: (García Álvarez, 2011b).

En el conjunto de un viaje de ida y vuelta entre los mismos puntos (Figuras 39 y 40) , la energía potencial no varía (es tanta la altitud que ha ganado el tren como la ha perdido), ni tampoco cambia la energía cinética almacenada (al comienzo y al final el tren tiene energía cinética igual a cero, pues está detenido). Entonces, no hay almacenamiento neto de energía en el tren en el conjunto del viaje de ida y vuelta. Por ello, la energía que ha entrado al tren es igual a la que ha salido del tren (incluyendo en esta última las pérdidas en el propio tren).

En un viaje que no sea de ida y vuelta, sí puede haber variación de la energía potencial en el tren (debida a la diferencia de altitud entre en el punto de destino y el punto de origen). Esta variación puede ser positiva (si el punto de destino está más alto) o negativa (si está más bajo). Por ello, si el cálculo no se realiza en un recorrido circular, a la energía consumida para vencer la resistencia al avance del tren, hay que sumar (o restar) la energía almacenada en el viaje debida a la diferencia de altitud entre los extremos.

Figura 40. **Flujo de energía en el tren para el conjunto de un recorrido de ida y vuelta (sin freno regenerativo)**



La energía que entra al tren en su recorrido (sin contar la necesaria para los auxiliares ni las pérdidas en el motor y en la transmisión) es la suma de la resistencia al avance más la energía disipada por el freno en los procesos de declaración y en la bajada de pendientes. Esta energía disipada es, en cada caso, una parte de la energía cinética o potencial acumulada en las aceleraciones y en la subida de rampas, respectivamente.
Fuente: (García Álvarez, 2011c).

La energía que ha salido del tren es la energía necesaria para vencer la resistencia al avance, más la que ha disipado o regenerado en los procesos de freno. Esta última puede calcularse considerando que el tren ha frenado:

- En los procesos de reducción de velocidad.
- Al bajar pendientes mayores de que la pendiente crítica, para no exceder de las velocidades máximas.

Energía de frenado disipada o regenerada en los procesos de reducción de velocidad.- Cuando el tren *frena* para reducir su velocidad (porque la *resistencia al avance* no es suficiente para conseguir la deceleración en un tiempo razonable) una parte de la energía cinética perdida se disipa en el freno y otra parte se emplea en vencer la resistencia al avance. El balance energético en el proceso de frenado responde, por ello, a la siguiente ecuación:

$$\nabla E_{cin} = \int F_{fr} \times dl + \int R_a \times dl \qquad [37]$$

es decir, que la energía (E_{fr}) perdida en el frenado es:

$$E_{fr} = \nabla E_{cin} - \int R_a \times dl \qquad [38]$$

Energía de frenado disipada o regenerada en la bajada de las pendientes.- Cuando un tren baja una pendiente, la energía potencial que cede se emplea para vencer la resistencia al avance y, en ocasiones, para aumentar su velocidad. Si no se aplica tracción ni freno, la fuerza que impulsa al tren es la fuerza gravitatoria (de valor M *x* g *x* i), y la fuerza que se opone al movimiento es la *resistencia al avance* (R_a). Si la primera es mayor que la segunda, el tren tendería a acelerarse, y cuando circula a la velocidad máxima debe hacer uso de freno para evitar rebasar la velocidad máxima. Siendo p_r la pendiente real existente (en milímetros por metro), la fuerza de frenado que debe hacerse para no rebasar la velocidad máxima (V_{max}) es la siguiente:

$$F_{fr} = M \times g \times p_r - (A + B \times V_{\max} + C \times T_f \times V_{\max}^{\ 2}) \quad [39]$$

Si p_e es la pendiente de equilibrio a la velocidad V_{max} (aquella a la que el tren mantiene la velocidad sin aplicar tracción ni freno), y l_p la longitud de la pendiente, se verifica que,

$$M \times g \times p_e = A + B \times V_{\max} + C \times T_f \times V_{\max}^{\ 2} \quad [40]$$

y sustituyendo en la fórmula anterior, se obtiene que la fuerza de frenado es:

$$F_{fr} = M \times g \times p_r - M \times g \times p_e = M \times g \times (p_r - p_e) \quad [41]$$

y la energía disipada o recuperada en el frenado:

$$E_{fr} = F_{f_r} \times l_p = M \times g \times (p - p_e) \times l_p \quad [42]$$

Es decir, la energía del frenado disipada en una pendiente es igual a la energía potencial que se perdería en la pendiente si el valor de la pendiente fuera la diferencia entre la pendiente realmente existente y la *pendiente de equilibrio* (es decir, si la pendiente fuera de valor p_r-p_e). El resto de la energía potencial cedida (la que se corresponde con la *pendiente de equilibrio)* se emplea en vencer la *resistencia al avance* a la velocidad máxima.

La energía consumida por los servicios auxiliares del tren puede expresarse con la fórmula siguiente:

$$E_{aux} = (P_{aux} \times K_{uaux} \times T_{aux}) \times \rho_{aux} \quad [43]$$

Donde: E_{aux} es la energía consumida por el tren para sus servicios auxiliares; P_{aux} es la potencia de los equipos auxiliares del tren; K_{aux} es el coeficiente de utilización de los servicios auxiliares (depende, por ejemplo, de la temperatura: cuando menos extrema sea ésta, menor necesidad hay de calefacción o aire acondicionado; T_{aux} es el tiempo de uso de los servicios auxiliares, que comprende tanto el tiempo en que el tren se está moviendo como el tiempo en que el tren está parado pero con los servicios auxiliares funcionando; ρ_{aux} es el rendimiento de los equipos de servicios auxiliares (relación entre la energía que entra en el tren -en pantógrafo si es de tracción eléctrica- y la que se mide a la salida de los convertidores de los vehículos).

Expresado en función de la velocidad media con tiempo de rotación:

$$E_{aux}[kWh] = (P_{aux}[kW] \times K_{uaux} \times \frac{L[km]}{V_{medrot}[km/h]}) \times \rho_{aux} \quad [44]$$

Donde L es la longitud del recorrido y V_{medrot} es la velocidad media con tiempo de rotación.

Pérdidas en los procesos de transformación y transporte

Para conocer la energía primaria consumida, a la energía útil hay que añadir las pérdidas que se producen en los procesos de transformación y transporte de energía, tanto antes de llegar al tren como en el propio tren. Éstas comprenden:

- Pérdidas en el vehículo en la cadena de tracción (transformadores, convertidores, motores de tracción y reductores) y de los convertidores para los servicios auxiliares.
- En tracción eléctrica, las pérdidas en la conversión de energía en la subestación y en el transporte por la catenaria.
- Pérdidas en el proceso de producción de la electricidad y en el transporte y transformación desde la central de generación hasta la entrada de la subestación (en el caso de la tracción eléctrica); o pérdidas en la extracción, transporte y procesamiento del combustible (tracción diesel).

El efecto del rendimiento en las pérdidas en el vehículo.- Es necesario tener en cuenta que las pérdidas en la cadena de tracción del vehículo de tracción eléctrica (expresadas a través de su rendimiento $\rho_{t,}$ menor que la unidad) intervienen en dos procesos:

- En el uso de la energía eléctrica importada por el tren (a las llantas llega la energía importada menos las pérdidas que se producen en la cadena de tracción).
- En el aprovechamiento de la energía eléctrica regenerada por el freno (al pantógrafo llega la energía regenerada en las llantas menos la energía perdida en la cadena de tracción en el proceso de regeneración).

El consumo de energía para el movimiento del tren a la entrada del mismo (y prescindiendo de la posibilidad de aprovechamiento de una pequeña parte de la energía regenerada en el frenado para la alimentación de los servicios auxiliares) puede expresarse así:

$$E_{moventapantógrafo} = \frac{E_{movllantas}}{\rho_t} - E_{regllantas} \times \rho_{treg} \qquad [45]$$

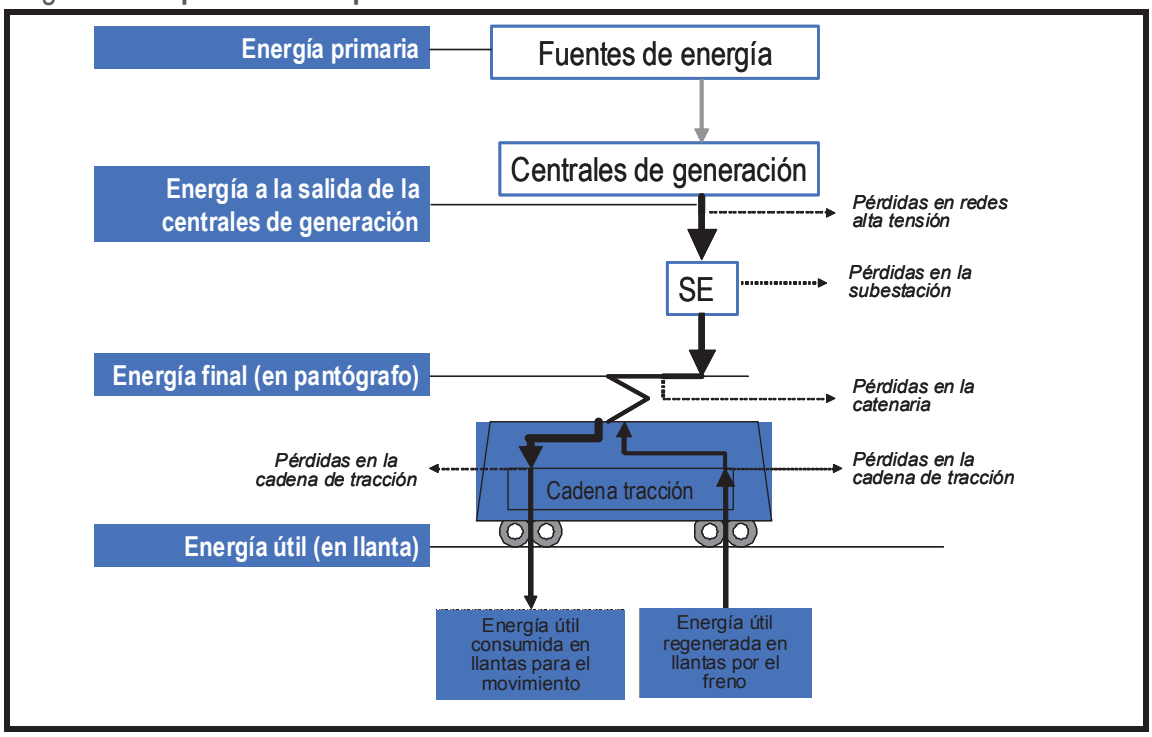
Donde: $E_{moventapantógrafo}$ es la energía (final) neta consumida por el tren para su movimiento, medida en el punto de entrada al tren (que es el pantógrafo si se trata de un tren de tracción eléctrica o en la boca del depósito si es de tracción diésel; $E_{movllantas}$ es la energía (útil) necesaria para el movimiento del tren, medida en la llanta; ρ_t es el rendimiento (en tanto por uno) de la cadena de tracción del vehículo en el proceso de tracción; ρ_{treg} es el rendimiento (en tanto por uno) de la cadena de tracción del vehículo motor en el proceso de regeneración; y $E_{regllantas}$ la energía regenerada en el freno, medida igualmente en la llanta.

Se puede suponer que el rendimiento del vehículo en la cadena de tracción en el proceso de tracción es igual al que se obtiene en proceso de regeneración (Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte (FFE) & Grupo de Estudios del IDAE, 2011). Entonces, la expresión anterior se convierte en la siguiente:

$$E_{movnetapantografo} = \frac{E_{movllantas}}{\rho_t} - E_{regllantas} \times \rho_t \qquad [46]$$

En la figura 41 pueden verse de forma esquemática las pérdidas de energía que se producen en tracción eléctrica.

Figura 41. **Esquemas de las pérdidas en tracción eléctrica**



Fuente: Elaboración propia

2.4.4. El modelo analítico de estimación del consumo

➢ Principio aplicado e hipótesis utilizadas

El modelo que se empleará para el cálculo de la energía en función de la velocidad es (como se ha expuesto) un modelo "bottom-up" que se concreta en una función aditiva de consumo que se apoya en el procedimiento que hemos denominado de "balance de energía" del tren.

Se calcula la energía que sale del tren sabiendo que es igual a la energía que entra al tren. El cálculo se realiza:

- En un recorrido circular (con origen y final en el mismo punto y, por ello, sin diferencia de altitud entre los extremos del recorrido),
- Con las características del ciclo teórico (infraestructura y servicio) de que se trate, y
- Con salida y llegada a velocidad nula.

Etapas.- El modelo ofrece sus resultados en dos etapas representadas gráficamente en la figura 43:

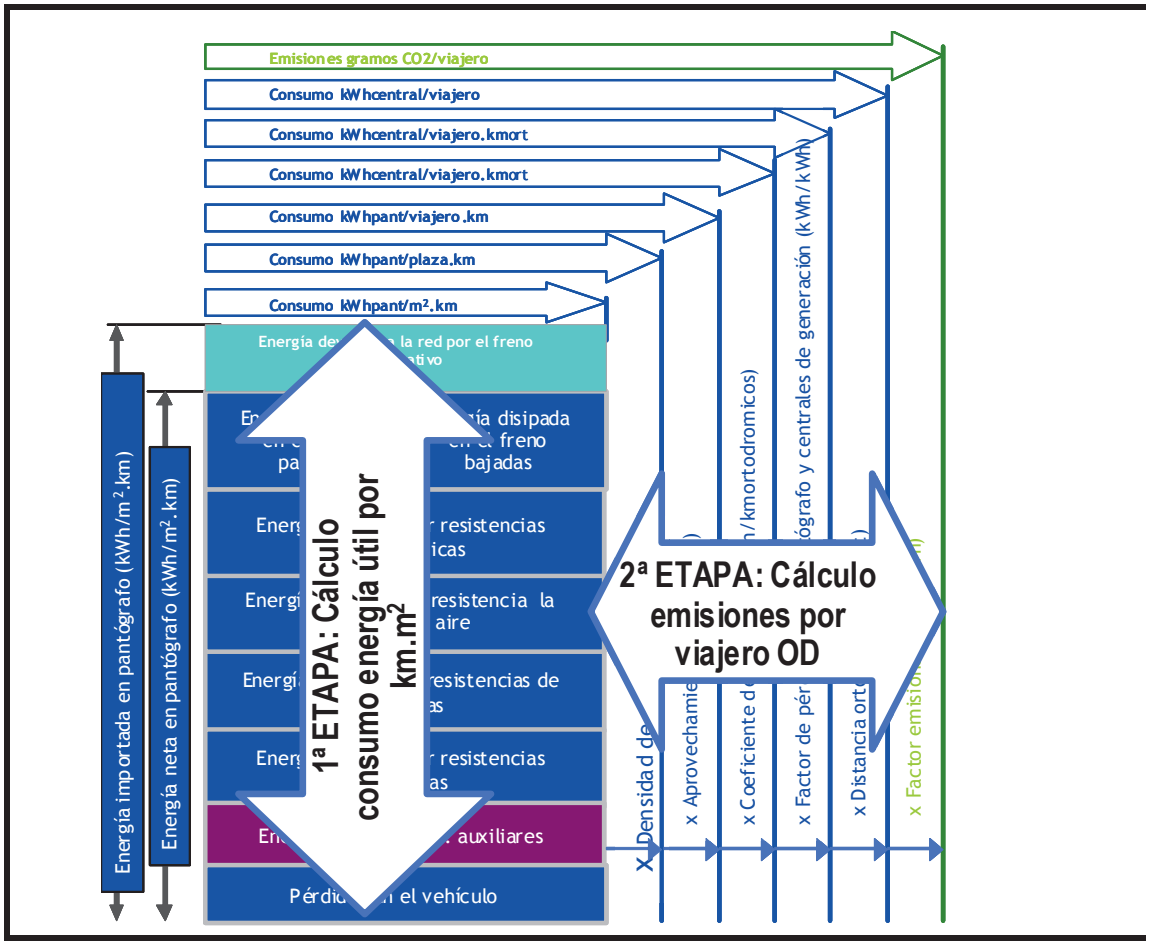
- Una primera etapa ofrece como resultado la energía final (es decir, la suministrada al vehículo medida en el pantógrafo o a la entrada de la boca de combustible) por unidad de oferta ($km.m^2$)
- La segunda etapa obtiene, a partir del resultado anterior, los indicadores por unidad de transporte (por plaza kilómetro, por viajero kilómetro, por

viajero.kilómetro ortodrómico, o por viajero origen-destino). Y ello, tanto en términos de energía como de emisiones de gases de efecto invernadero.

Las razones para separar estas etapas son dos:

- Por una parte, la separación ofrece una mayor claridad, atribuyendo cada una de las eventuales diferencias a la razón que la explica.
- Por otra, separa el efecto de los factores más inherentes al modo ferroviario (tecnología del tren, tipo de tracción, características de la dinámica); del efecto de otros factores "logísticos" y externos al sistema ferroviario que deben emplearse para la homogenización y comparación de los resultados, pero que tienen un carácter más contingente (así, por ejemplo, el factor de emisiones en la generación de electricidad, el aprovechamiento, la densidad de plazas, etc.)

Figura 42. **Etapas en la aplicación del modelo**



Fuente: Elaboración propia

➢ Sumandos integrantes del consumo

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

- Energía (útil) necesaria para vencer la resistencia mecánica al avance en recta (que denominaremos EU1)
- Energía necesaria para vencer la resistencia adicional de las curvas (EU2)
- Energía necesaria para vencer la resistencia a la entrada de aire (EU3)

- Energía necesaria para vencer la resistencia aerodinámica (EU4)
- Energía disipada en el freno para reducir la velocidad (EU5)
- Energía disipada en el freno en las pendientes (EU6)
- Energía consumida por los servicios auxiliares (incluyendo la consumida en los tiempos de parada asociados al ciclo) (EU7)

La suma de las cantidades anteriores es la energía (útil, en llanta o a la entrada de auxiliares). Para conocer la energía final importada debe añadirse:

- Energía perdida en el rendimiento de la cadena de tracción (E8)

En el caso de los trenes de tracción eléctrica con freno regenerativo, a la energía resultante de la suma anterior hay que restar:

- Energía eléctrica generada en el freno (EU9-), tanto si se emplea para la alimentación de equipos auxiliares, 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. Esta energía (en llanta) debe ser multiplicada por el rendimiento del motor (<1) para conocer la energía final importada en el pantógrafo.

Una vez calculado (de acuerdo con lo que se expone) el consumo de energía por cada unidad de oferta ($km.m^2$), para obtener el indicador específico (en la segunda etapa de aplicación del modelo) se dividirá el consumo por kilómetro.tren por la capacidad estándar, para así obtener el consumo por plaza_equivalente.kilómetro. Análogamente puede obtenerse por plaza.kilómetro (multiplicando por la densidad de plazas por metro cuadrado) o por viajero kilómetro (dividiendo la cifra anterior por el aprovechamiento).

En cada uno de sumandos, el modelo recoge el efecto directo que tiene una variación de la velocidad, así como de los elementos que caracterizan el sistema de alta velocidad, el sistema convencional mejorado o el sistema convencional.

➢ Ajuste del modelo

El modelo ofrece un resultado teórico del consumo, pero no incluye diversos fenómenos de carácter aleatorio que sí se presentan en los resultados medidos en casos reales.

Ocurre igual que en caso de los consumos homologados de los automóviles o de los aviones: se trata de un resultado teórico (de hecho, es un mínimo) que no incluye factores aleatorios (en algunos casos de tanta importancia como el consumo de los auxiliares en el consumo homologado del automóvil). Pese a ello, el "consumo homologado" se consideran relevante, ya que el propósito con el que se aplica es la comparación entre vehículos, y se entiende que los sesgos son similares y del mismo signo para todos los vehículos comparables, por lo que aquél que tenga menos consumo homologado, será el que tenga menos consumo real[15].

De hecho, en las medidas realizadas para contrastar el modelo "Alpi", desarrollado por el autor y que es muy similar (aunque algo más complejo) al empleado en esta tesis, se observa una desviación de hasta el 16 por ciento por encima del consumo

[15] En ensayos realizados con diferentes automóviles con distintos ciclos de uso, se ha encontra que el consumo real está en la práctica siempre por encima del consumo homologado, en una banda de diferencia entre el 21 y el 35 por ciento. Esta diferencia es atribuible en su mayor parte al consumo de los servicios auxiliares (no incluido en el consumo homologado) pero también a otros factores aleatorios como el estado del tráfico o el estilo de conducción.

calculado por el modelo en tracción eléctrica, y de hasta el 21 por ciento en tracción diésel.

Ello significa que los resultados directos del modelo son útiles para las comparaciones entre vehículos ferroviarios, tanto si son de alta velocidad como si son convencionales. En efecto, no hay nada que haga pensar que el error sea mayor en un tipo de vehículos que en otro. Sin embargo, si se comparan con datos reales de otros modos de transporte debe aplicarse un coeficiente de ajuste.

Las razones de las posibles desviaciones entre los resultados teóricos del modelo y los resultados medidos en la realidad son las siguientes:

- Los valores reales de temperatura y de humedad suelen ser diferentes a los valores medios previstos en el modelo, y por lo tanto el consumo de energía para los auxiliares es diferente. El consumo real suele ser mayor, puesto que cuando la temperatura exterior tiene un valor intermedio es justamente cuando menos energía se precisa para la climatización. También varía algo con la temperatura la cantidad de energía necesaria para vencer las resistencias aerodinámicas y a la entrada de aire, ya que dependen linealmente de la densidad del aire (que disminuye al aumentar la temperatura).
- En la práctica hay viento exterior (de valor y rumbo aleatorio) que produce una resistencia aerodinámica adicional al avance, no considerada en el modelo.
- La tensión en catenaria puede ser mayor o menor que la nominal empleada en el cálculo subyacente en el modelo.
- En la circulación real de los trenes suele haber limitaciones de velocidad de carácter temporal (no previstas, por lo tanto, en el cuadro de velocidades máximas, CVM) y además el estado del tráfico exige con frecuencia paradas, esperas o reducciones de velocidad para conciliar la circulación del tren con el resto de los trenes con los que comparte la infraestructura. Estas reducciones no previstas suponen una mayor energía disipada en el freno, y además obligan al tren a circular en otros tramos a mayor velocidad para lograr la misma velocidad media.
- El modelo de conducción subyacente en el modelo es un modelo semi-óptimo que supone una gran regularidad en la marcha, manteniendo siempre la velocidad necesaria para lograr la velocidad media. Una conducción muy eficiente (especialmente en alta velocidad donde el efecto positivo de la conducción en deriva se deja notar con más intensidad) puede lograr rebajar algo en consumo, pero en la práctica es mucho más frecuente que la conducción real produzca un aumento del consumo de energía con respecto a lo previsto en el modelo.
- Los rendimientos obtenidos en la realidad por los vehículos pueden ser (especialmente en tracción diésel) menores que los nominales, debido sobre todo a deficientes condiciones de mantenimiento.

Como puede deducirse de lo anterior, los consumos reales suelen ser mayores de los teóricos del modelo, lo que explica las desviaciones observadas en la práctica. Como consecuencia de ello, cuando se trata de realizar análisis en los que se comparen los resultados del modelo con resultados basados en medidas reales, aconsejamos (con la referencia de la comparación con resultados medidos en la realidad) emplear un coeficiente de ajuste de 1,07 en tracción eléctrica y de 1,11 en tracción diésel. Si además hay que tener en cuenta los movimientos en vacío, debe multiplicarse por otro coeficiente de 1,02.

Debe observarse que cuando se comparan los resultados del modelo con los de un estudio "top-down" basado en el reparto de los consumos observados por las unidades de tráfico, las diferencias suelen ser mayores. En parte son atribuibles a las inevitables limitaciones metodológicas de los análisis "top-down" en los que el perímetro del numerador y del denominador del indicador suelen ser difusos y contener errores de medida. Además de ello, y de las desviaciones aleatorias del modelo, los modelos "top-down" tienden a sobreestimar (van Essen et al., 2003) el resultado del consumo de los trenes porque incluyen los consumos parásitos, los de los trenes encendidos en talleres limpieza o andenes, los consumos de los trenes en vacío, etc.

2.5. Análisis del efecto de la velocidad en el consumo de energía final por unidad de oferta

La energía final (en pantógrafo o boca de combustible) por unidad de oferta (kilómetro recorrido y metro cuadrado de superficie útil) se calcula, como se ha indicado, sumando el efecto de cada uno de los componentes que intervienen en ella. Seguidamente de irán analizando cada uno de estos sumandos.

2.5.1. Energía empleada para vencer la resistencia mecánica al avance en recta

La resistencia mecánica generada por el rozamiento de los cojinetes y manguetas, por la rodadura entre ruedas y carriles, por las irregularidades en la vía…, etc., es la denominada *resistencia mecánica* (R_m), que depende de la masa del tren y del número de ejes, y responde a la siguiente expresión:

$$R_m[daN] = a[daN/t] \times M[t] + K \times N \qquad [47]$$

Como puede apreciarse, para un determinado peso por eje, esta fuerza es el resultado de multiplicar la masa del vehículo (que aquí expresaremos para homogeneizar por metro cuadrado de superficie útil bruta) por un coeficiente de resistencias mecánicas (a) que depende del vehículo. Este coeficiente, para la vía soldada, no tiene relación con la infraestructura.

En algunos casos (así ocurre en el entorno francés) se considera que una parte de las resistencias mecánicas depende linealmente de la velocidad (véase, por ejemplo, (C. Guiheu, 1982). Se ha preferido adoptar el enfoque alemán que aplica para las resistencias mecánicas únicamente un coeficiente (lógicamente superior) que es independiente de la velocidad. Como es natural, este coeficiente está calculado para las condiciones normales de funcionamiento del vehículo, incluida su velocidad, y por ello refleja adecuadamente la realidad en estas condiciones.

La constante de proporcionalidad (a) es del orden de magnitud de 1,2 a 2 decanewtons por tonelada para trenes convencionales (con los valores en la banda baja para trenes convencionales “mejorados”), y de 0,5 a 0,9 daN/t para trenes de alta velocidad (que, como es natural, necesitan un menor rozamiento para poder alcanzar su velocidad normal).

En cuanto a la energía necesaria para vencer esta fuerza, es el resultado de integrar esta resistencia a lo largo del recorrido. Como la fuerza es constante, la integral puede reemplazarse por el producto de la fuerza por la distancia. Por otra parte, como se persigue calcular el consumo específico de energía por unidad de longitud de recorrido, la energía por kilómetro (en kilovatios.hora por kilómetro) puede considerarse igual a la fuerza (en decanewtons) dividida por 360 (Tabla 27).

Por lo que se refiere a la masa, en la práctica se observa que los trenes de alta velocidad tienen normalmente una inferior masa por plaza (o por unidad de superficie), probablemente debido a la exigencia que para el diseño impone la limitación de 17 toneladas por eje que se prescribe en las ETIs para circular por encima de 250 kilómetros por hora. La masa por plaza (o por unidad de capacidad

medida a través de la superficie útil bruta) depende de la arquitectura del tren: según sea articulado o no, de caja ancha o normal, de tracción concentrada o distribuida, etc. (Véase al respecto (García Álvarez & Lukaszewicz, 2010). Los valores normales de masa por plaza para un tren de tracción distribuida pueden ser de 812 kg/m^2 para la alta velocidad (por ejemplo, el de la serie 103); de 994 kg/m^2 para los trenes convencionales de mejorados (serie 490) y de 1.003 kg/m^2 para los trenes convencionales (serie 448).

En la tabla 26 están resumidos los principales elementos relacionados con la energía necesaria para vencer la resistencia mecánica al avance.

Tabla 26. **Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia mecánica al avance en función de la velocidad**

Efecto directo de la velocidad				
No hay relación con la velocidad: V^0				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:	En los sistemas de alta velocidad, la masa por unidad de capacidad tiende a ser algo más reducida			
	En los sistema de alta velocidad el coeficiente de resistencias mecánicas tiende a ser más bajo			
Infraestructura	No hay relación (en vía soldada)			
Servicio	No hay relación			
Fórmulas aplicables	Fuerza (daN)		Energía por km y m^2 (kWh/m^2.km)	
	$Rm = (M) \times a \times V^0$		$E = (M/p_e) \times a \times V^0 /360$	
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
M/pe [t/m^2]	0,812	0,954	1,003	1,009
a [daN/t]	0,5 a 0,9	0,9 a 1,2	1,2 a 2	1,2 a 2
Valor orientativo de energía para tren de 450 m^2 (kWh/km)	**0,711**	**1,251**	**2,006**	**2,018**

Fuente. Elaboración propia

2.5.2. Energía empleada para vencer la resistencia mecánica adicional en las curvas

Al circular por una curva el tren soporta una fuerza longitudinal que provoca una resistencia adicional al avance, denominada *resistencia al avance en curvas,* y que se expresa, para una línea con ancho de vía estándar, como:

$$\mathrm{Res}_c[daN] = -\left[M_{c\,\mathrm{arg}}[t] \times \frac{600}{R_C[m]} \right] \qquad [48]$$

Para ancho de vía ibérico se sustituye el valor de 600 por el de 800.

Para recoger en el balance de energía el efecto de esta fuerza intermitente a lo largo del recorrido (solo aparece en las curvas y con intensidad diferente en cada curva, según su radio) se definió al coeficiente de curvas (a_{cur}) de una línea de longitud $L_{línea}$ como:

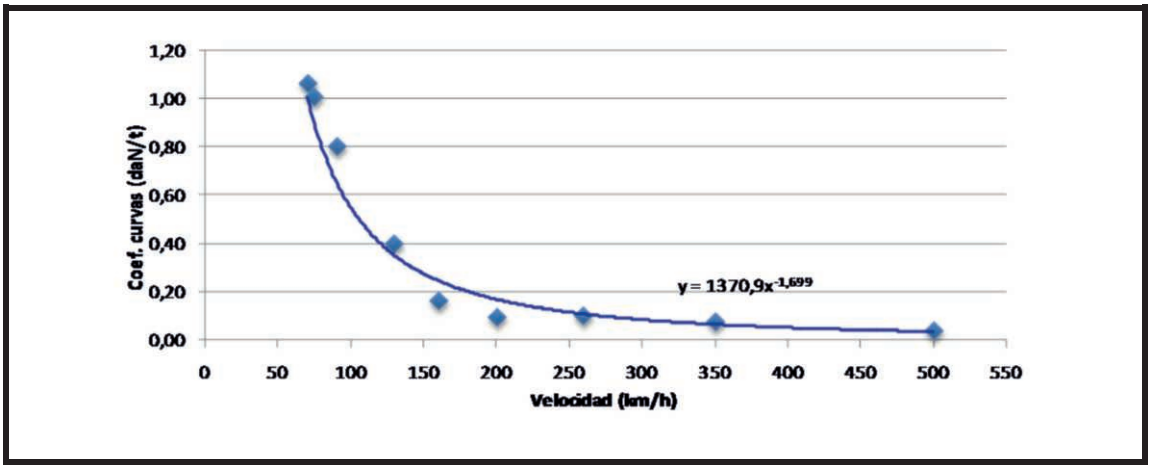
$$a_{cur}[daN/t] = \frac{1}{L_{línea}[m]} \times \sum lc[m] \times \frac{600\,u\,800}{R_C[m]} \qquad [49]$$

Por lo tanto, la energía necesaria para vencer esta resistencia (en un kilómetro medio de la línea y por metro cuadrado de superficie útil del vehículo) puede expresarse como:

$$E_{crAance}\left[kWh/m^2.km\right] = M / p_e[t/m^2] \times a_{cur}[daN/t] \times \frac{1}{360} \qquad [50]$$

Como puede observarse, la energía necesaria para vencer la resistencia adicional de las curvas no depende de la velocidad de circulación, aunque sí depende de la masa por unidad de capacidad (característica del vehículo) (tabla 27), y del coeficiente específico de curvas (característica de la infraestructura). En (García Álvarez, 2011b) (donde se introduce por primera vez el concepto de coeficiente de curvas) pueden verse los valores orientativos de este coeficiente para diversas líneas en función de su velocidad máxima (figura 43).

Figura 43. **Valores característicos del coeficiente de curvas en función de la velocidad máxima de la línea por trazado**



Fuente. Elaboración propia ((García Álvarez, 2011b))

Tabla 27. **Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia adicional de las curvas**

Efecto directo de la velocidad				
No hay relación con la velocidad: V^0				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:	En los sistemas de alta velocidad, la masa por unidad de capacidad tiende a ser algo más reducida			
Infraestructura	Cuanto mayor es la velocidad admitida por el trazado, hay menos curvas y éstas son de mayor radio.			
Servicio	No hay relación			
Fórmulas aplicables	Fuerza (daN) $Rm = (M) \times a_{cur} \times V^0$		Energía por km y m^2 (kWh/m^2.km) $E = (M/pe) \times a_{cur} \times V^0 /360$	
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
M/pe [t/m2]	0,812	0,994	1,003	1,009
a_{cur} [daN/t]	0,084	0,168	0,309	0,309
Valor orientativo de energía para tren 450 m^2 (kWh/km)	**0,085**	**0,210**	**0,391**	**0,391**

Fuente. Elaboración propia

2.5.3. Energía empleada para vencer la resistencia a la entrada de aire

La fuerza instantánea que se opone al avance del tren como consecuencia de la entrada de aire (en su mayor parte para la renovación del aire interior de los habitáculos de viajeros y para la ventilación de los motores) es la denominada *resistencia al avance debida a la entrada de aire* (R_{ea}) y se expresa como:

$$R_{ea}[daN] = -B[daN/(km/h)] \times V[km/h] = -Q\left[m^3/s\right] \times \rho\left[kg/m^3\right] \times \overline{V} \times \frac{1}{36} \quad [51]$$

La energía necesaria para vencer esta resistencia (a la entrada de aire) en un kilómetro medio se calcula como:

$$E_{entradaAire}\left[kWh/km\right] = B\left[daN/\left(km/h\right)\right] \times \overline{V}\left[km/h\right] \times \frac{1}{360} \quad [52]$$

La energía necesaria para vencer la resistencia a la entrada de aire es proporcional a la velocidad media, y no hay indicios que hagan pensar que (a igualdad del sistema de climatización del tren, de la densidad de plazas por unidad de superficie y de aprovechamiento), se pueda advertir ninguna diferencia derivada de las características del tren, ni de la infraestructura ni del servicio. Únicamente los trenes de tracción diésel requieren más aire para la refrigeración de los motores, como ya se pudo apreciar en las primeras pruebas de los trenes TGV en Francia con turbina de gas ((C. Guiheu, 1982)) y se comprueba en la observación de las curvas de resistencia al avance del tren dual (eléctrico+diésel eléctrico) de Talgo de la serie 730, cuya resistencia al avance en tracción diésel es ligeramente superior a resistencia en tracción eléctrica. En la tabla 28 se explicita la variación de la energía empleada para vencer la resistencia a la entrada de aire.

Tabla 28. **Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia a la entrada de aire**

Efecto directo de la velocidad				
Directamente proporcional a la velocidad media sin tiempo de paradas: V^1				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:	En los trenes diésel la entrada aire para la refrigeración de los motores (y por ello la resistencia al avance) es algo mayor a igualdad de los demás factores.			
Infraestructura	No hay relación			
Servicio	No hay relación			
Fórmulas aplicables	Fuerza (daN) $Rm = B \times V^1$		Energía por km y m^2 (kWh/m^2.km) $E = B/Pe \times V^1 /360$	
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
B/pe [daN/(km/h)$^{-1}$.m^2]	0,0062	0,0062	0,0062	0,0066
Vmed [km/h]	210	165	110	110
Valor orientativo de energía para tren 450 m^2 (kWh/km)	**1,627**	**1,185**	**0,852**	**0,907**

Fuente. Elaboración propia

2.5.4. Energía empleada para vencer la resistencia aerodinámica

La fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia del choque y el roce con el aire circulante, se denomina *resistencia aerodinámica* a cielo abierto y su valor (en ausencia de viento exterior) es:

$$R_{ada}[daN] = C \times V^2 \times \overline{T}_f \qquad [53]$$

El coeficiente C se puede descomponer en un componente derivado de la presión (C_p) otro debido a la fricción (C_f) que dependen de las características del tren (forma, tamaño y calidad superficial) y que multiplican respectivamente el área de la sección transversal del tren (*Sf*) y su "superficie mojada" (*pmoj* x *Ltren*):

$$C = C_p + C_f = c_p \times Sf + c_f \times p_{moj} \times L_{tren} \qquad [54]$$

A falta de otros datos concreto del tren pueden suponerse los siguientes valores:

Para vehículos de alta velocidad:

$$C_{p(AV)}\left[\frac{daN}{(km/h)^2}\right] = 0{,}00096 \times S_f[m^2] \qquad [55]$$

$$C_{f(AV)}\left[\frac{daN}{(km/h)^2}\right] = 0{,}000021 \times p_{moj}[m] \times L_{tren}[m] \qquad [56]$$

Y para vehículos convencionales:

$$C_{p(Conv)}\left[\frac{daN}{(km/h)^2}\right] = 0{,}0022 \times S_f[m^2] \qquad [57]$$

$$C_{f(Conv)}\left[\frac{daN}{(km/h)^2}\right] = 0{,}00003 \times p_{moj}[m] \times L_{tren}[m] \qquad [58]$$

La energía para vencer la resistencia aerodinámica en un kilómetro medio, se calcula como:

$$E_{aeroAbierto}[kWh/km] = C\left[\frac{daN}{(km/h)^2}\right] \times \left((V_{media})^2 + \sigma(V)^2\right)[(km/h)^2] \times \overline{Tf} \times \frac{1}{360} \qquad [59]$$

donde $\sigma(v)$ es la desviación típica de las velocidades con respecto a su media.

En la tabla 29 se muestran los valores orientativos de energía empelada para vencer la resistencia aerodinámica para un tren de 450 metros cuadrados expresada en kilovatios.hora por kilómetro.

Tabla 29. **Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia aerodinámica**

Efecto directo de la velocidad				
Directamente proporcional al cuadrado de la velocidad media sin tiempo de paradas más su desviación típica al cuadrado: $V^2+\delta(V)^2$				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:	Los vehículos de alta velocidad suelen tener un coeficiente aerodinámico C más bajo que los convencionales.			
Infraestructura	En las líneas convencionales, con un perfil de velocidades más irregular la desviación típica de las velocidades tiende a aumentar. El factor medio de túnel depende de características de la infraestructura, y en las líneas de alta velocidad tiende a ser menor por cuanto los túneles, por razones aerodinámicas, son de mayor sección.			
Servicio	En los servicios con más paradas, la desviación típica de las velocidades tiende a aumentar.			
Fórmulas aplicables	Fuerza (daN) $Rm= (Cf+Cp) \times (V^2+\delta^2) \times Tf$		Energía por km y m^2 (kWh/m^2.km) $E= (Cf+Cp)/Pe \times (V^2+\delta^2) \times Tf_{med} /360$	
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
C/pe [daN/(km/h)$^{-2}$.m^2]	$1{,}001\times10^{-4}$	$1{,}230\times10^{-4}$	$2{,}182\times10^{-4}$	$2{,}182\times10^{-4}$
V_{med} [km/h]	210	165	110	110
δ [km/h]	$0{,}03\times V_{med}$	$0{,}07 \times V_{med}$	$0{,}23 \times V_{med}$	$0{,}23 \times V_{med}$
Tf (medio)	1,002	1,003	1,003	1,003
Valor orientativo de energía para tren 450 m^2 (kWh/km)	**5,633**	**3,685**	**3,579**	**3,579**

Fuente: Elaboración propia

2.5.5. Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad

Energía disipada por el freno en la paradas.- La energía que se disipa a causa de las reducción de velocidad en las paradas se calcula multiplicando el número de paradas por la energía cinética disipada en cada parada, suponiendo que cuando el tren comienza a frenar circula a una determinada velocidad (*velocidad máxima de freno eléctrico*, $Vmfe$) y pasa a una velocidad nula (tren parado). Se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$E_{cin\,Re\,dV}[kWh] = N_{paradas} \times \frac{1}{2} \times \left(M_{c\,arg}[t] + M_{rot}[t]\right) \times \left(V_{mfe}\right)^2 [km/h] \times \frac{1}{3{,}6^3 \times 10^3} \qquad [60]$$

A esta energía hay que restarle la energía que se utilizada para vencer la resistencia al avance, en los tramos en los que se produce deceleración (siendo $deceleFS$ el valor de la deceleración del freno de servicio [m/s^2]).

$$E_{ravd}[kWh] = -N_{paradas} \times \left[\frac{A[daN] \times V_{mfe}^2[km/h]}{2 \times decel_{FS}[m/s^2]} + \frac{B \times {V_{mfe}}^3}{3 \times decel_{FS}} + \frac{C \times {V_{mfe}}^4}{4 \times decel_{FS}} \right] \times \frac{1}{3{,}6^3 \times 10^5} \qquad [61]$$

Energía disipada por el freno en las reducciones de velocidad.- Cuando no se trata de una parada sino de una reducción de velocidad desde la velocidad $Vmfe$ hasta una velocidad V_{lim}, puede suponerse que la cantidad de energía disipada es una fracción de la que supondría la reducción de la velocidad a cero. Por ello, la reducción de velocidad puede hacerse equivalente a una fracción de "parada equivalente" en la que la reducción de velocidad suponga una disipación de energía igual a la que supondría una parada.

$$N^o\ paradasequivalentes = \frac{{V_{mfe}}^2 - {V_{lim}}^2}{{V^{op}}^2 - 0^2} = \frac{{V_{mfe}}^2 - {V_{\lim}}^2}{{V_{op}}^2} \qquad [62]$$

El número de "paradas equivalentes" es una característica de la infraestructura que se puede precalcular a partir del perfil estático de velocidades.

Para el cálculo de la energía disipada, el número de *paradas equivalentes por reducción de velocidad* se suma al número de paradas comerciales y técnicas.

En cuanto a la relación con la velocidad de la energía cinética disipada por el freno en las reducciones de velocidad, cuanto mayor es la velocidad desde la que el tren comienza su frenado, mayor es la energía disipada.

Por lo que se refiere a la relación de esta energía con las características del sistema de alta velocidad, se observa que en las nuevas líneas de velocidad, el perfil de velocidades debe ser mucho más homogéneo (figura 44), por lo que el *número de paradas equivalentes por reducción de velocidad*, es muy bajo (tabla 30). Por el contrario, en las líneas convencionales son muy frecuentes las reducciones de velocidad, bien por limitaciones derivadas del trazado, por pasos a nivel, por señalización, etc.

Figura 44. **Perfiles de velocidad máxima de las líneas representativas en España de alta velocidad, convencional mejorado y convencional**

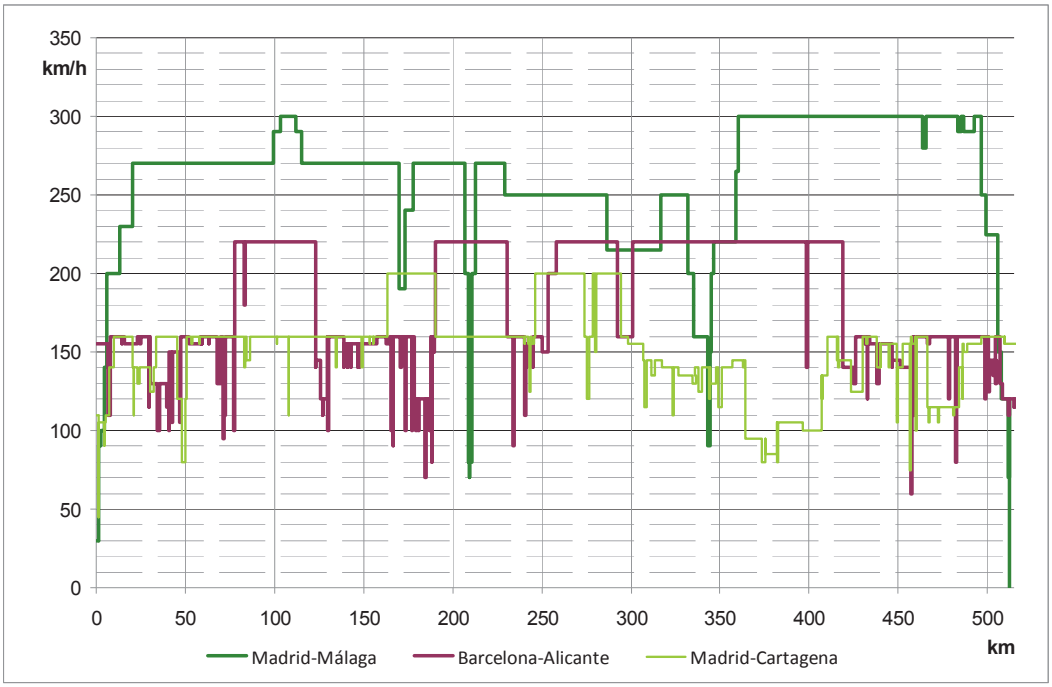


Tabla 30. **Distancia entre paradas equivalentes por reducción de velocidad en diversos tipos de línea**

	Distancia entre paradas equivalentes por reducción de velocidad (km)	Paradas equivalentes por reducción de velocidad cada 100 km
LAV Madrid Barcelona	555	0,180
LAV Madrid a Sevilla	120	0,833
LAV Madrid Málaga (media de España)	243	0,411
LCM Alicante-Barcelona	40,3	2,481
LC Madrid-Cartagena	50,2	1,992

No se han considerado las paradas comerciales ni técnicas, ni las reducciones temporales, solo el efecto de las paradas equivalentes por las reducciones de permanentes velocidad incluidas en CVM.

Fuente: Elaboración propia

En la práctica se observa también que la distancia entre paradas comerciales y técnicas en las líneas de alta velocidad es mayor que en las líneas convencionales mejoradas y que en las líneas convencionales (tabla 31). Las características de los diferentes tipos de servicio en el ferrocarril español (recorrido medio del tren del tren, distancia entre paradas, velocidad media, etc.) han sido analizadas en (Martín Cañizares & García Álvarez, 2011), y de este trabajo pueden obtenerse los siguientes valores relativos a la distancia entre paradas de los trenes de alta velocidad en líneas nuevas y de los trenes de largo recorrido en líneas convencionales. Los valores de la línea convencional mejorada (no disponible de forma explícita en el estudio) corresponden al servicio *Euromed*.

Tabla 31. **Distancia entre paradas comerciales de los servicios que se prestan en cada línea.**

	Paradas comerciales / 100 km	Paradas técnicas / 100 km	Paradas comerciales y técnicas / 100 km
Servicios en línea de alta velocidad	0,43	0	0,43
Servicios en línea convencional mejorada	1,35	0	1,35
Servicios en línea convencional	1,70	0,19	1,89

Fuente: (Martín Cañizares & García Álvarez, 2011) y elaboración propia.

La tabla 32 resume los elementos que intervienen en la variación de la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad.

Tabla 32. **Variación de la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad**

Efecto directo de la velocidad				
Directamente proporcional al cuadrado de la velocidad máxima de freno eléctrico, que es mayor (aunque no proporcionalmente) cuanto mayor sea la velocidad máxima: V_{mfe}^2				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:	Cuanto mayor es la masa y las masas rotativas por unidad de superficie útil, mayor será la energía perdida por este concepto			
Infraestructura	Cuanto más homogéneo sea el perfil de velocidades que permite la infraestructura, menor será la pérdida de energía por disipación en reducciones de velocidad.			
Servicio	Cuanto mayor sea el número de paradas (comerciales o técnicas), mayor será la energía disipada por ese concepto.			
Fórmulas aplicables	Energía por km y m² (kWh/m².km)			
	$E_{cin\,\mathrm{Re}\,dV}[kWh]/km = \frac{N_{paradas}}{L_{linea}} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{M_{c\,\mathrm{arg}}[t] + M_{rot}[t]}{Pe} \right) \times (V_{mfe})^2 [km/h] \times \frac{1}{3{,}6^3 \times 10^3}$ -			
	$= -\frac{N_{paradas}}{L_{línea}} \times \left[\frac{A[daN] \times V_{mfe}^2 [km/h]}{2 \times decel_{FS} [m/s^2]} + \frac{B \times V_{mfe}^{\ 3}}{3 \times decel_{FS}} + \frac{C \times V_{mfe}^{\ 4}}{4 \times decel_{FS}} \right] \times \frac{1}{3{,}6^3 \times 10^5}$			
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
Deceleración media servicio (m/s²)	0,4	0,5	0,6	0,6
$V_{mfe\ (km/h)}$	168	157	1342	132
Valor orientativo para tren de 450 m² (kWh/km)	**0,927**	**3,319**	**3,314**	**3,333**

Fuente: Elaboración propia

2.5.6. Energía potencial disipada en el freno en pendientes

Cuando un tren baja una pendiente, la fuerza que normalmente impulsa el tren es la de la gravedad. Si ésta es mayor que la fuerza que se opone al movimiento del tren (resistencia al avance) el tren tiende a acelerarse. Si el tren tiende a alcanzar una velocidad superior a la máxima permitida, debe utilizar el freno para no rebasar esta velocidad.

La energía potencial perdida al bajar una altura de h metros (resultado de una pendiente real de p_r [mm/m] a lo largo de una longitud de $L_{pend.}$ [km] es la siguiente:

$$E_{pot}[kWh] = M \times g \times h = M_{carg}[t] \times 9{,}81\left[m/s^2\right] \times \left(p_r[mm/m] \times L_{pend.}[km]\right) \times \frac{1}{3.600} \quad [63]$$

Pero no toda la energía potencial perdida en la pendiente se disipa en el freno. Como se ha expuesto, la mayor parte se emplea para vencer la resistencia al avance, y únicamente cuando la pendiente es muy fuerte (mayor que la pendiente de equilibrio) el tren debe frenar para "deshacerse" de la energía potencial que "le sobra". La energía disipada en el freno a causa de que la pendiente real es mayor que la pendiente de equilibrio (aquella en la que el tren mantiene la velocidad sin tracción ni freno) se calcula restando en la ecuación [63] la pendiente de equilibro de la pendiente real, resultando la siguiente expresión:

$$E_{potF}[kWh] = M_{carg}[t] \times 9{,}81\left[m/s^2\right] \times (p_r - p_e[mm/m] \times L_{pend.}[km]) \times \frac{1}{3.600} \quad [64]$$

Definimos el "exceso específico de altura" (*excAlt)* como el sumatorio de cada diferencia [en (mm/m)/km] entre la pendiente real (pr) y la pendiente de equilibro (pe) en los tramos en que la pendiente de equilibrio es mayor que la real, multiplicada (la diferencia) por la longitud en que existe esa diferencia; y dividido (dicho sumatorio) por la longitud total de la línea:

$$excAlt = \frac{\sum \left(p_{real} - p_{equilibrio}\right) \times l_{pendiente}}{L_{línea}} \quad [65]$$

Este es un parámetro de la línea que puede precalcularse para cada velocidad del tren.

Entonces, la energía disipada por el freno por el exceso de pendiente en el recorrido puede expresarse sustituyendo en la ecuación [64] la fórmula de la ecuación [65]:

$$E_{potF}[kWh] = M_{carg}[t] \times 9{,}81\left[m/s^2\right] \times excAlt[(mm/m)/km] \times L[km] \times \frac{1}{3.600} \quad [66]$$

En la tabla 33 se muestran los elementos de los que depende la variación de la energía disipada en la bajada de pendientes, así como valores orientativos, para un tren de 450 metros cuadrados útiles:

Tabla 33. **Variación de de la energía potencial disipada en la bajada de pendientes**

Efecto directo de la velocidad				
Cuanto mayor sea la velocidad, permitida en la pendientes (a partir de un cierto valor) menos necesidad tendrá el tren de frenar y, por lo tanto, menos energía se pierde por este concepto				
Elementos del sistema de alta velocidad				
Material rodante:				
Infraestructura	Cuando más suaves (de menor inclinación) sean a las pendientes, menos energía se perderá por este concepto			
Servicio				
Fórmulas aplicables	Energía (kWh/m^2.km)			
	$E_{potF}[kWh] = M_{carg} / pe[t/m^2] \times 9{,}81[m/s^2] \times excAlt[(mm/m)/km] \times \frac{1}{3.600}$			
Valores de los parámetros y coeficientes	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
M/pe [t/m^2]	0,812	0,994	1,003	1,009
ExcAltura [(mm/m)/km]	335	856	1.063	1.063
Valor orientativo para tren de 450 m^2 (kWh/km)	**0,333**	**1,001**	**1,307**	**1,315**

Fuente: Elaboración propia

2.5.7. Energía perdida en el vehículo

La agregación de los sumandos anteriores (EU1 a EU6) expresa la energía (útil) necesaria en llantas para el movimiento del tren. Para convertir esta energía en energía final, medida en el pantógrafo del vehículo de tracción eléctrica (o a la entrada del depósito de combustible en el caso de la tracción diésel), es necesario dividir la energía útil por el rendimiento de la cadena de tracción del vehículo.

Como se ha expuesto, los rendimientos dependen del tipo de motor, de la transmisión, del tipo de alimentación eléctrica y del tamaño del motor.

No hay, pues, relación directa entre este rendimiento y la velocidad.

En cuanto al sistema de alta velocidad, éste debe estar alimentado en corriente alterna en alta tensión, y no puede funcionar adecuadamente con tracción diésel. Por ello, los rendimientos del vehículo son los correspondientes a la electrificación en corriente alterna, mientras que los de los trenes que circulan en el sistema convencional mejorado y en el sistema convencional tienen los rendimientos del sistema de corriente continua (más altos en el vehículo por ausencia de transformador, pero más bajos en conjunto por las mayores pérdidas óhmicas y por la transformación en la subestación).

Los de alta velocidad son trenes modernos, y por ello con un rendimiento alto, pero para una comparación equitativa debe suponerse el mismo tipo de tecnología en el ferrocarril convencional. Así, la única ventaja en el rendimiento será la derivada de que, a igualdad de arquitectura, el tamaño del motor del tren de alta velocidad será mayor el del tren convencional.

Pueden estimarse los siguientes valores (tabla **34**) para los rendimientos de la cadena de tracción representativos de los sistemas analizados.

Tabla 34. **Rendimientos representativos de los sistemas analizados**

	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
Tipo de electrificación	A.C.	D.C.	D.C.	---
Tipo de motor supuesto	Síncrono	Síncrono	Síncrono	
Potencia motor (kW)	1.500	1.000	500	
Rendimiento de la cadena de tracción	**0,847**	**0,901**	**0,893**	**0,335**

Fuente: Elaboración propia

2.5.8. Energía consumida por los servicios auxiliares

Los servicios auxiliares de los trenes son equipos que consumen energía con finalidades técnicas (compresores, ventiladores de motores, etc.) o para el confort de los viajeros (calefacción, aire acondicionado, iluminación, etc.)

El consumo de energía de estos servicios es proporcional al tiempo de uso; y por ello, si aumenta la velocidad media, el consumo por kilómetro se reduce en la misma proporción que aumenta la velocidad media.

La energía necesaria para alimentar los servicios auxiliares en los trenes de tracción eléctrica procede directamente la catenaria, y por ello no se ve afectada por el rendimiento de la cadena de tracción. En tracción diésel, sin embargo, la energía eléctrica que alimenta los servicios auxiliares es producida por el grupo motor diésel-generador, por lo que el consumo debe ser dividido por el rendimiento correspondiente. Naturalmente, los equipos que convierten la energía eléctrica en energía útil para los servicios auxiliares también tienen pérdidas, pero son similares en tracción eléctrica y en tracción diésel, y están incluidas en la estimación del consumo.

Energía consumida por los auxiliares técnicos.- La energía consumida por los auxiliares técnicos se puede estimar suponiendo un consumo medio del 70% de la potencia instalada, y por ello tendría, en tracción eléctrica, la siguiente expresión:

$$E_{auxTecni\cos}[kWh] = pot_{AuxTec}[kW] \times T_{viaje}[h] \times 0{,}7 \qquad [67]$$

La relación de este consumo con la velocidad es doble:

- Cuanto mayor sea la velocidad, menor será el tiempo de uso de los servicios auxiliares y por ello será más reducido su consumo.
- A igualdad de los demás factores, los trenes de alta velocidad tienen motores de tracción más potentes, y por ello precisan más potencia de servicios auxiliares. (Recordemos la fórmula $P=4{,}462xV^{1{,}302}$ que se dedujo de la observación de la potencia adoptada por los trenes españoles).

Suponiendo que la potencia de auxiliares técnicos es del 2% de la potencia de tracción (valor observado en la práctica), la expresión anterior puede escribirse de la siguiente forma:

$$E_{auxTecni\cos}[kWh] = 0{,}02 \times 4{,}462 \times V^{1{,}302}[km/h] \times \frac{L[km]}{V[km/h]} \times 0{,}7 \qquad [68]$$

Simplificando la expresión anterior y expresando la energía por kilómetro en el pantógrafo del tren de tracción eléctrica, resulta:

$$E_{FINALTracElecAuxTecni\cos}/km[kWh/km)] = 0{,}0624 \times V^{0{,}302}[km/h] \qquad [69]$$

Para la tracción diésel, la expresión anterior se convierte en

$$E_{FINALTracDieselauxTecni\cos}/km[kWh/km)] = 0{,}0624 \times V^{0{,}302}[km/h] \times {}^{1}\!/_{\rho_{motgen}} \qquad [70]$$

Energía consumida por los auxiliares comerciales.- La energía consumida por los servicios auxiliares comerciales se puede estimar (con las naturales diferencias de un país a otro y de unos días a otros) considerando un consumo medio a la entrada de los equipos de 0,3 a 0,45 kWh por hora y metro cuadrado de superficie útil bruta.

$$E_{auxcom}\left[kWh\right]=0{,}3a0{,}45\left[kWh/h.m^2\right]\times S_{ub}\left[m^2\right]\times T_{trenencendido}\left[h\right] \qquad [71]$$

El consumo de energía de auxiliares se produce por tiempo, y por ello su consumo por kilómetro, disminuye con la velocidad.

Por kilómetro y por unidad de superficie útil del tren, el consumo en pantógrafo para auxiliares comerciales en los trenes de tracción eléctrica es:

$$E_{FINALTracElecauxcom}\left[kWh/km.m^2\right]=0{,}3a0{,}45\left[kWh/h\cdot m^2\right]\times\frac{1}{V_{comtiemporotacion}} \qquad [72]$$

Y en los trenes de tracción diésel, considerando las pérdidas en el grupo motor diésel-generador, la energía final (es decir, la medida a la entrada del vehículo) para los servicios auxiliares comerciales es:

$$E_{FINALTracDieselauxcom}\left[kWh/km.m^2\right]=0{,}3a0{,}45\left[kWh/h\cdot m^2\right]\times\frac{1}{V_{comtiemporotacion}}\times\frac{1}{\rho_a} \qquad [73]$$

Estimación de la energía consumida por los servicios auxiliares para diversos tipos de servicio.- De acuerdo con lo anterior, para diversos tipos de servicio, el cálculo del consumo de los servicios auxiliares comerciales y técnicos respondería a lo expresado en la tabla 35.

Tabla 35. **Consumos representativos de los servicios auxiliares**

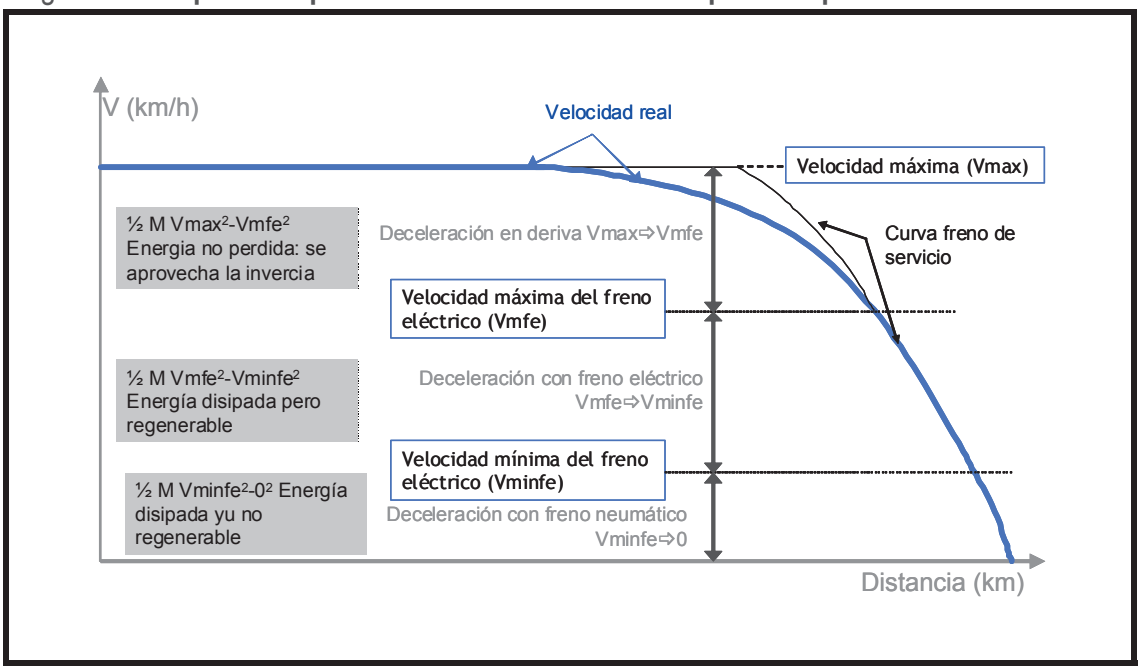
		Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
Auxiliares técnicos.	Fórmula	$E_{auxTecni\cos}/km[kWh/km)]=0{,}0624\times V^{0{,}302}[km/h]$			
	Valores para tren de 450 m² (kWh/km)	0,314	0,297	0,258	0,258 / ρ
Auxiliares comerciales	Fórmula	$E_{auxcom}\left[kWh/km.m^2\right]=0{,}375\times\frac{1}{V_{comtiemporotacion}}$			
	Valores para tren de 450 m² (kWh/km)	1,004	1,388	1,917	1,917 / ρ

Fuente: Elaboración propia

2.5.9. Energía recuperada en el freno regenerativo

En el caso de que el tren tenga freno regenerativo (es preciso advertir de que muchos trenes antiguos de tracción eléctrica no lo tienen, ni tampoco lo tienen los trenes de tracción diésel), una parte de energía disipada por la aplicación del freno (figura 45) se convierte en energía eléctrica que se devuelve a la red para que sea utilizada por otro tren, y en caso de que la red no la admita, es quemada en las resistencias (en el llamado "freno reostático").

Figura 45. **Esquema de proceso de deceleración ante un punto de parada**



El proceso de deceleración ante un punto de parada puede tener hasta tres fases: ❶ En la primera el tren decelera en deriva (sin usar el freno). En esta fase la energía necesaria para vencer la resistencia al avance procede de la energía cinética y no hay pérdida en el freno (aunque sí que se pierde tiempo con respecto al tiempo mínimo). ❷ En la segunda fase, desde la *velocidad máxima con freno eléctrico* (escogida por el maquinista dentro de la estrategia de conducción eficiente) actúa el freno, pero si el tren tiene freno regenerativo, esta energía se puede recuperar. ❸ Por debajo de cierta velocidad (*velocidad mínima del freno eléctrico*) actúa el freno neumático y la energía disipada en el freno se pierde y no puede recuperarse.

Fuente: Elaboración propia

Hay que tener en cuenta que no toda la energía disipada en el freno puede convertirse en energía eléctrica, ya que el freno eléctrico no puede funcionar por debajo de cierta velocidad (típicamente por debajo de 10 a 30 km/h). Podemos suponer que toda la energía disipada en la bajada de pendientes (EU6) se puede convertir en energía eléctrica. En cuanto a la energía disipada en los procesos de deceleración (EU5), se aprovecha un porcentaje (que designaremos $K_{aprelect}$) que es mayor cuanto mayor sea la velocidad (ya que la parte desaprovechada de produce por debajo de cierta velocidad y solo en las paradas, no en las reducciones de velocidad).

Si definimos un coeficiente dependiente del tipo de freno, K_{tf} que adopta el valor 1 si el tren tiene freno regenerativo y el valor 0 si no lo tiene, entonces, la energía regenerada en llantas es:

$$Eregenerad allantas = K_{tf} \times (EU5 \times Kaprovelect + EU6) \qquad [74]$$

Para convertir esta energía en energía final (en pantógrafo) hay que multiplicar por el rendimiento de la cadena de tracción (que, como ha quedado expuesto, se supone que es igual para la tracción que para el freno regenerativo):

$$Eregenerad apantografo = k_{tp} \times (EU5 \times Kaprovelect + EU6) \times \rho_t \quad [75]$$

Esta cantidad de energía que puede llegar a convertir en energía eléctrica no llega a la red en su totalidad:

- Si las subestaciones no son reversibles (las de corriente continua no lo son normalmente, mientras que las de corriente alterna sí que lo son) solo se puede aprovechar la energía cuando hay otro consumo (por ejemplo, otro tren) en las proximidades demandando energía.
- Si las supervisiones son reversibles (las de alta velocidad, por ser de corriente alterna, lo son) se aprovecha toda la energía.

El porcentaje de aprovechamiento lo denominamos K_{devred} y por ello la energía efectivamente devuelta es:

$$Edevred = (EU5 \times Kaprovelect + EU6) \times \rho_t \times Kdevred \qquad [76]$$

Los valores representativos de la cantidad de energía regenerada por un tren de 450 metros cuadrados para los diversos sistemas ferroviarios son los recogidos en la tabla 36.

Tabla 36. **Valores representativos de la energía regenerada**

	Sistema alta velocidad	Sistema convencional mejorado	Sistema convencional tracción eléctrica	Sistema convencional tracción diésel
Fórmula	$Edevred = (EU5 \times Kaprovelect + EU6) \times \rho_t \times Kdevred$			
¿Tiene freno regenerativo? (K_{tf})	Sí (1)	Sí (1)	Si (1)	No (0)
Kaproveelect	0,9	0,8	0,65	---
Kdevred	1	0,5	0,5	---
Energía exportada en pantógrafo para un tren de 450 m^2 (kWh/km)	**-0,993**	**-1,657**	**-1,546**	**--**

Fuente: Elaboración propia

2.5.10. Resumen de la energía final necesaria para el movimiento del tren y para los servicios auxiliares

Relación funcional

En virtud de todo lo expuesto, la energía final consumida por el tren en pantógrafo expresada por unidad de oferta (por kilómetro recorrido y por metro cuadrado de superficie útil) podría formularse como la suma de varios términos, cada uno de los cuales tiene una relación diferente con la velocidad (tabla 37).

Tabla 37. **Relación con la velocidad de cada uno de los términos de la función de consumo**

V^0	**Términos independientes de la velocidad**	
	Energía necesaria para vencer las resistencias mecánicas al avance	$E/km.m^2 = [(M/p_e) \times a \times V^0 / 360] / \rho_t$
	Energía necesaria para vencer la resistencia adicional en las curvas	$E/km.m^2 = [(M/pe) \times a_{cur} \times V^0 / 360] / \rho_t$
V^1	**Términos dependientes linealmente de la velocidad**	
	Energía necesaria para vencer la resistencia a la entrada de aire	$E / km.m^2 = [B/Pe \times V^1 / 360] / \rho_t$
V^2	**Términos dependientes del cuadrado de la velocidad**	
	Energía necesaria para vencer la resistencia aerodinámica	$E / km.m^2 = [[(C_f+C_p)/P_e] \times (V^2+\delta^2) \times Tf_{med} /360] / \rho_t$
	Energía disipada en las reducciones de velocidad	$E / km.m^2 = [\frac{N_{paradas}}{L_{linea}} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{M_{carg}[t] + M_{rot}[t]}{Pe} \right) \times (V_{mfe})^2 - \frac{N_{paradas}}{L_{linea}} \times \left[\frac{A[daN] \times V_{mfe}^2[km/h]}{2 \times decel_{FS}[m/s^2]} + \frac{B \times V_{mfe}^3}{3 \times decel_{FS}} + \frac{C \times V_{mfe}^4}{4 \times decel_{FS}} \right] \times \left[1/\rho_t - K_{tp} \times K_{aprovelec} \times K_{devred} \times \rho_t \right]$
V^{-1}	**Términos inversamente dependientes de la velocidad**	
	Energía disipada en la bajada de las pendientes	$E / km.m^2 = M_{carg} / Pe \times 9{,}81 \times excAlt[(mm/m)/km] \times \frac{1}{\rho_t}$
	Energía consumida por los servicios auxiliares	$E / km.m^2 = 0{,}0624 \times V^{0,302} + 0{,}375 \times V_{medconrot}^{-1}$

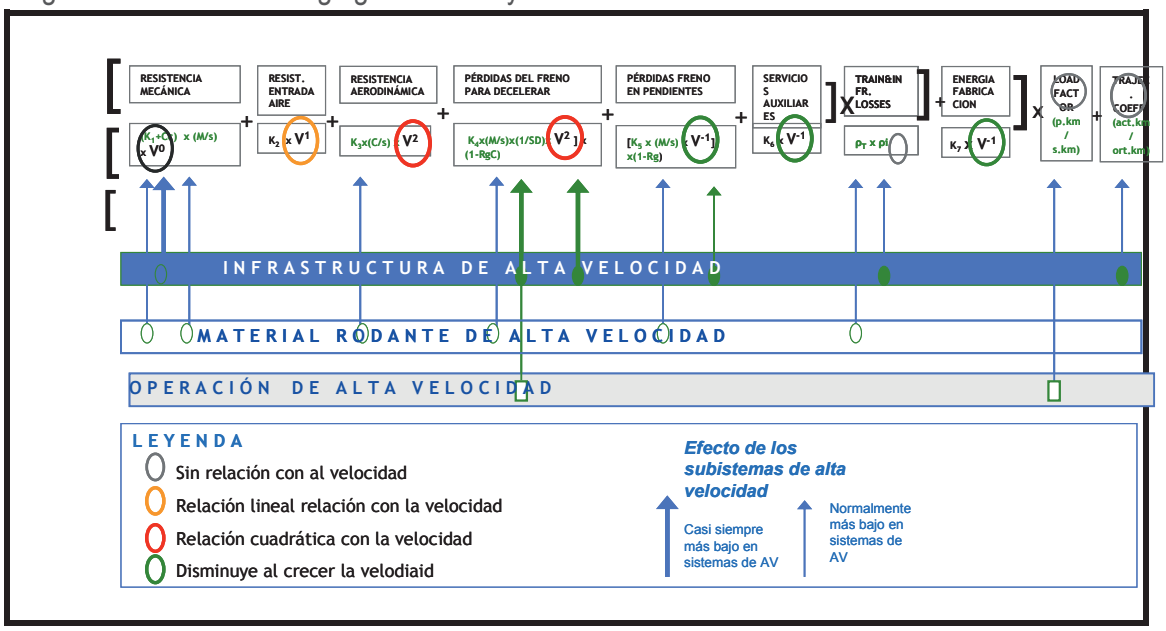
Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de la función de consumo muestra que cada uno de los sumandos presenta una relación diferente con el sistema de alta velocidad:

- En algunos sumandos, el consumo de energía se relaciona directamente con la velocidad:
  - o bien crece con la velocidad (así ocurre, por ejemplo, con la energía consumida por la entrada de aire);
  - o con su cuadrado (así la energía consumida para vencer las resistencias aerodinámicas);
  - o bien decrece linealmente con la velocidad (así ocurre con el consumo de energía de auxiliares y con la energía disipada por el freno al bajar las pendientes a partir de un cierto valor).
- En otros sumandos, la energía es independiente de la velocidad (así ocurre con la energía necesaria para vencer las resistencias mecánicas y con la adicional de las curvas).
- En otros casos, la relación entre consumo y la alta velocidad no se deriva directamente de la velocidad, sino de características propias de algunos de los subsistemas de alta velocidad (de los vehículos, de la infraestructura o de los sistemas operativos).

En la figura 46 se expresan gráficamente las principales relaciones y también se ha incluido el efecto de la velocidad en el consumo de energía empleada para la fabricación de los vehículos.

Figura 46. Consumo desagregado del tren y su relación con la velocidad media



Fuente: Elaboración propia: adaptado de (García Álvarez, 2010d)

➢ Valores resultantes

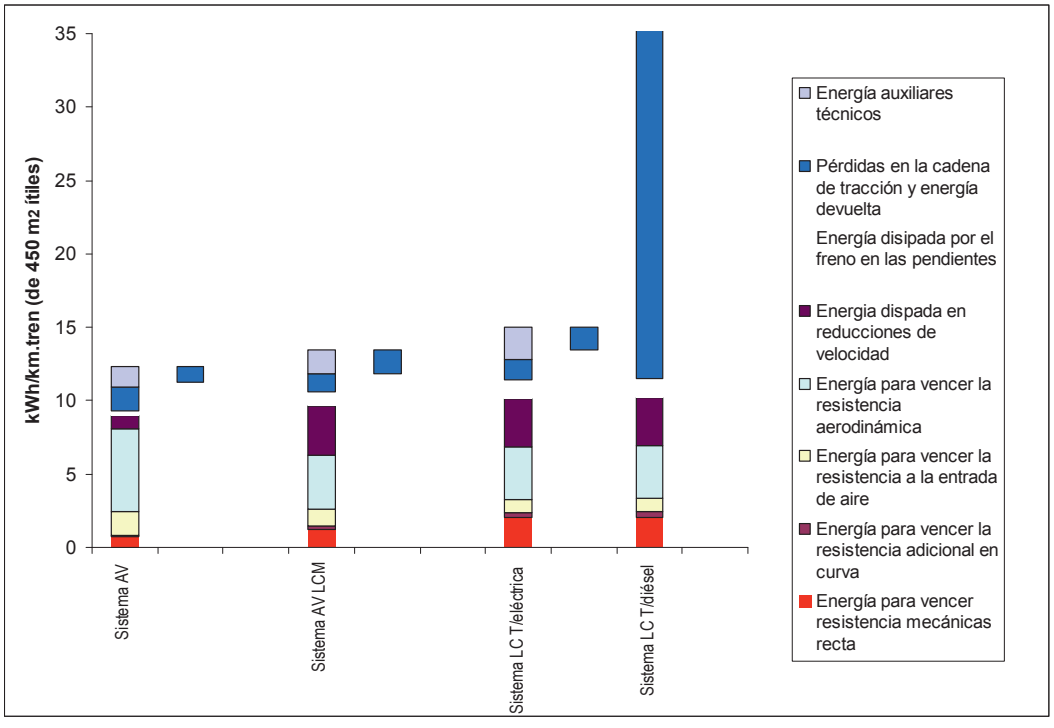
Ya se ha advertido sobre la enorme variabilidad del consumo de energía del ferrocarril (muy sensible a muchos parámetros como velocidad, masa, tamaño, número de paradas, etc.) Al comparar los resultados de consumo neto en pantógrafo de trenes operando en el sistema de alta velocidad con el consumo de trenes operando en líneas convencionales mejoradas y con el de trenes convencionales (éstos en versión diésel y eléctrica) se observan diferencias relevantes, no tanto en el resultado final, sino en los resultados intermedios.

En la tabla 38 y en la figura 47 se pueden apreciar los resultados obtenidos al aplicar a cada variable los valores que se han considerados como más representativos de la misma en el correspondiente sistema. Obsérvese que en la figura **47** las columnas situadas a la derecha de la principal correponden a la energía efectivamente devuelta en el proceso de frenado.

Tabla 38. **Resultados de la comparación del consumo de energía final por kilómetro tren empleando los valores representativos**

Velocidad media considerada (km/h)	Alta velocidad LAV *210*		Conven. Mejorada LCM *152*		Conv. tracc. electr. LCe *110*		Conv. tracc. diésel LCd *110*	
	kWh/km	%	kWh/km	%	kWh/km	%	kWh/km	%
Energía para vencer resistencia mecánicas recta	0,71	6,3	1,25	10,6	2,01	14,9	2,02	*4,8*
Energía para vencer resistencia adicional curva	0,09	0,8	0,20	1,7	0,39	2,9	0,39	*0,9*
Energía para vencer la resistencia a entrada aire	1,63	14,4	1,18	10,0	0,85	6,3	0,91	*2,2*
Energía para vencer la resistencia aerodinámica	5,63	49,9	3,68	31,1	3,58	26,6	3,58	*8,5*
Energia dispada en reducciones de velocidad	0,93	8,2	3,32	28,1	3,31	24,6	3,33	*7,9*
Energía disipada por el freno en las pendientes	0,33	3,0	1,00	8,5	1,31	9,7	1,32	*3,1*
Pérdidas en la cadena de tracción	1,64	14,6	1,17	9,9	1,37	10,2	24,53	*58,5*
Total energia importada para el movimiento	**10,96**	97,1	**11,80**	99,8	**12,82**	95,3	**36,07**	*86,0*
Energía auxiliares técnicos	0,31	2,8	0,28	2,4	0,26	1,9	0,70	*1,7*
Energía auxiliares comerciales	1,00	8,9	1,388	11,7	1,92	14,3	5,18	*12,4*
Total energía importada en el pantógrafo	**12,28**	108,8	**13,47**	113,9	**14,99**	111,5	**41,95**	*100,0*
-energia regenerada aprovechada	-0,99	-8,8	-1,65	-13,9	-1,55	-11,5	0,00	*0,0*
TOTAL ENERGÍA NETA EN PANTÓGRAFO	**11,29**	100,0	**11,82**	100,0	**13,45**	100,0	**41,95**	*100,0*
Comparación con alta velocidad	1,00		1,05		1,19		3,72	

Figura 47. Visión **gráfica de los resultados de la comparación del consumo de energía final por kilómetro tren empleando los valores representativos**



Fuente: Elaboración propia

2.5.11. Variabilidad del consumo de energía en cada sistema

Como se ha ido indicando a lo largo de la exposición del modelo, ha sido necesario otorgar a cada una de las variables (y para cada sistema) un valor para obtener un resultado final que permita la reflexión comparativa.

Sin embargo, como se ha podido observar, la asignación del valor concreto se ha realizado escogiendo de forma convencional para cada una de las variables (masa, coeficiente C, velocidad media,…) uno de los valores (el que se ha estimado más representativo) de entre los muchos valores que puede tomar la variable en cada uno de los sistemas (AV, LCM, LCe y LCd).

Si se aplica el modelo con los valores extremos de cada variable que se pueden encontrar en la realidad, el resultado final no será una cifra concreta, sino una "banda" o rango en el que se puede mover el consumo.

Al designar los valores extremos, empleamos la expresión "valor más desfavorable" para designar aquel que conduce al consumo de energía máximo, y "valor más favorable" para designar el que conduce a un menor consumo de energía. (No se emplean "valor máximo" y valor "mínimo" porque, según los casos, los máximos pueden conducir a un menor consumo y al revés). Con la nomenclatura adoptada, el uso de todos los indicadores más desfavorables ofrecerá el resultado del consumo de energía mayor de entre los posibles, y al usar todos los valores más favorables, el consumo de energía será el menor de los posibles.

Al realizar el cálculo dando los valores extremos a siete de las variables que intervienen en el modelo (las que se consideran más relevantes) puede observarse cómo la amplitud de los rangos resultantes para cada uno de los sistemas es muy superior a la diferencia de los resultados obtenidos aplicando a cada sistema con el valor más probable de las variables.

Rendimiento de la cadena de tracción.- Para el rendimiento de la cadena de tracción se ha supuesto que los trenes del sistema de alta velocidad pura solo pueden funcionar en corriente alterna (los rendimientos de los motores síncronos pequeños y asíncronos grandes son entonces los límites, y el valor representativo es uno intermedio); mientras que los trenes del sistema convencional mejorado y del convencional pueden funcionar en corriente continua o en corriente alterna: el peor valor es entonces el de motor síncrono pequeño en corriente alterna y el mejor el del motor asíncrono grande en alimentación en corriente continua. Para la tracción diésel el peor caso es el de la transmisión continua-continua, el mejor es el de la transmisión continua-alterna y el representativo es un valor intermedio. En la tabla 39**3939** se explicita el rango de las principales variables que intervienen en el modelo.

Tabla 39. **Rango de las principales variables que intervienen en el modelo**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema conv. tracción eléctrica (LCe)	Sistema conv. tracción diésel (LCd)
Masa por unidad de superficie (t/m²)				
Valor más desfavorable	0,954	1,003	1,110	1,015
Valor representativo	0,812	0,954	1,003	1,010
Valor más favorable	0,501 (a)	0,900	0,905	0,905
Coefic. C por unidad superficie (daN.(km/h)$^{-2}$.m^{-2}				
Valor más desfavorable	0,0001310	0,0002182	0,0002310	0,0002310
Valor representativo	0,0001001	0,0001231	0,0002181	0,0002182
Valor más favorable	0,000058 (a)	0,0001201 (b)	0,0002011	0,0002011
Coeficiente de curvas (daN/t)				
Valor más desfavorable	0,115	0,143	0,246	0,246
Valor representativo	0,084	0,168	0,309	0,309
Valor más favorable	0,065	0,201	0,401	0,401
Paradas comerciales y técnicas por cada 100 kilómetros				
Valor más desfavorable	0,715	2,112	2,222	2,222
Valor representativo	0,430	1,135	1,890	1,890
Valor más favorable	0,161	0,656	1,601	1,601
Paradas equivalentes por reducción de velocidad por cada 100 kilómetros				
Valor más desfavorable	0,652	1,873	2,032	2,032
Valor representativo	0,411	1,481	1,992	1,992
Valor más favorable	0,251	0,657	0,768	0,768
Velocidad media sin tiempo de paradas (km/h)				
Valor más desfavorable	236	169	119	119
Valor representativo	210	152	110	110
Valor más favorable	187	117	97	97
Velocidad máximo de freno eléctrico (km/h)				
Valor más desfavorable	200	155	145	145
Valor representativo	168	137	132	132
Valor más favorable	150	125	100	100
Rendimiento de la cadena de tracción				
Valor más desfavorable	0,847	0,847	0,847	0,302
Valor representativo	0,850	0,900	0,893	0,320
Valor más favorable	0,852	0,912	0,912	0,335

Se han utilizado, en la mayor parte de los casos, datos reales de los trenes de alta velocidad y de los servicios que prestan en España en el horario de invierno de 2010. Excepción: los datos marcados con (a) corresponden al tren japonés de caja ancha y dos pisos, Shinkansen Max-E4.El valor marcado como (b) corresponde al tren "Regina" sueco de caja ancha.

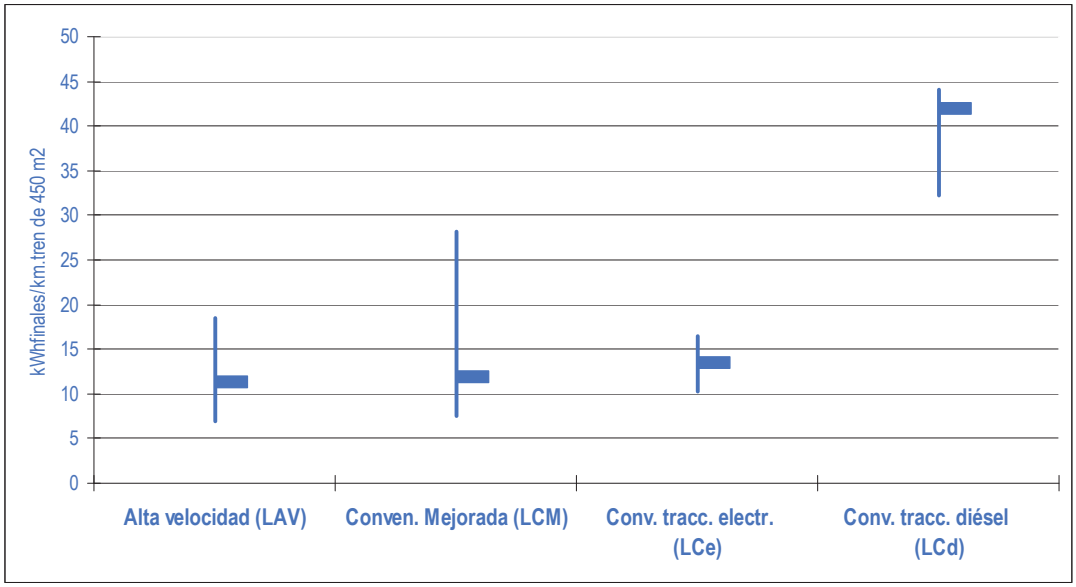
Fuente: Elaboración propia

La aplicación de estos valores extremos (más desfavorable y más favorable) permite conocer por la aplicación del modelo el rango de variación del consumo, que expresado en términos de energía final (consumo neto en pantógrafo o a la entrada del depósito de combustible) que presenta los valores indicados en la tabla 40 y representados en la figura 48.

Tabla 40. **Valores extremos que puede alcanzar el consumo de energía final importada y neta por kilómetro.tren**

		Alta velocidad LAV	Conven. Mejorada LCM	Conv. tracc. electr.	Conv. tracc. diésel LCd
Escenario más desfavorable (mayor consumo)					
Total energia importada para el movimiento	*kWh/km*	17,30	26,66	14,50	38,58
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	18,52	28,20	16,54	44,09
TOTAL ENERGÍA NETA EN PANTÓGRAFO	*kWh/km*	18,52	28,20	16,54	44,09
Esxcenario más probable op de referencia					
Total energia importada para el movimiento	*kWh/km*	10,96	11,80	12,82	36,07
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	12,28	13,47	14,99	41,95
TOTAL ENERGÍA NETA EN PANTÓGRAFO	*kWh/km*	11,29	11,82	13,45	41,95
Escenario más favorable (menor consumo)					
Total energia importada para el movimiento	*kWh/km*	5,82	6,70	9,17	25,74
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	7,25	8,77	11,59	32,29
TOTAL ENERGÍA NETA EN PANTÓGRAFO	*kWh/km*	6,90	7,45	10,28	32,29

Figura 48. **Representación gráfica de los valores extremos que puede alcanzar el consumo de energía final neta por kilómetro.tren**



Fuente de tabla y figura: Elaboración propia

➢ Elasticidad del consumo de energía

Para completar la explotación del modelo, y para sacar el máximo rendimiento del mismo se ha calculado, para cada uno de los sistemas (AV, LCM, LCe y LCd), la elasticidad del consumo de energía con respecto a diversas variables: algunas dependientes del vehículo (por ejemplo la masa, el coeficiente aerodinámico C o el rendimiento de la cadena de tracción); y otros dependientes del servicio o de la infraestructura (por ejemplo, la distancia entre paradas comerciales o técnicas, la distancia entre paradas equivalentes por reducción de velocidad o la velocidad media sin paradas, la velocidad máxima del freno eléctrico).

La elasticidad (ε) del consumo de energía (E_i) respecto a cada una de las variables de las que depende (que designaremos v_i) se define como el cociente entre el porcentaje en que varía la energía consumida al cambiar alguna de las variables y el porcentaje de cambio de la variable:

$$\varepsilon = \frac{\%\Delta E_i}{\%\Delta v_i} \qquad [77]$$

Como consecuencia, si el consumo aumenta al aumentar la variable, la elasticidad del consumo con respecto a esa variable es positiva; si, por contrario, disminuye al crecer la variable, la elasticidad es negativa. Un valor absoluto alto denota un cambio relativo importante en el consumo al cambiar la variable (el consumo sería entonces muy sensible a dicha variable). Lógicamente, el valor de la elasticidad (que puede asociarse a la derivada parcial de la función de consumo con respecto a la variable en el punto de referencia) es en general diferente para cada punto y para cada incremento de la variable.

Resultados del análisis de elasticidad

Los resultados del análisis de elasticidad (para un incremento del diez por ciento en cada variable de referencia) se muestran en la tabla 41.

Tabla 41. **Elasticidad del consumo de energía respecto a diversas variables**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Elasticidad con respecto a variables que dependen del vehículo				
Masa por unidad de superficie	0,129	0,410	0,477	0,536
Coeficiente C por unidad de superficie	0,586	0,340	0,292	0,259
Coeficiente de resistencia mecánica	0,073	0,113	0,162	0,144
Coeficiente específico de curvas	0,009	0,019	0,032	0,029
Rendimiento cadena de tracción	-0,971	-1,046	-0,981	-0,782
Elasticidad con respecto a variables operativas				
Número de paradas comerciales / 100 km	0,017	0,075	0,099	0,121
Número de paradas equivalentes / 100 km	0,016	0,135	0,105	0,128
Velocidad media sin tiempo de paradas	1,390	1,162	0,984	1,019
Velocidad máxima del freno eléctrico	0,066	0,426	0,411	0,499

Fuente: Elaboración propia

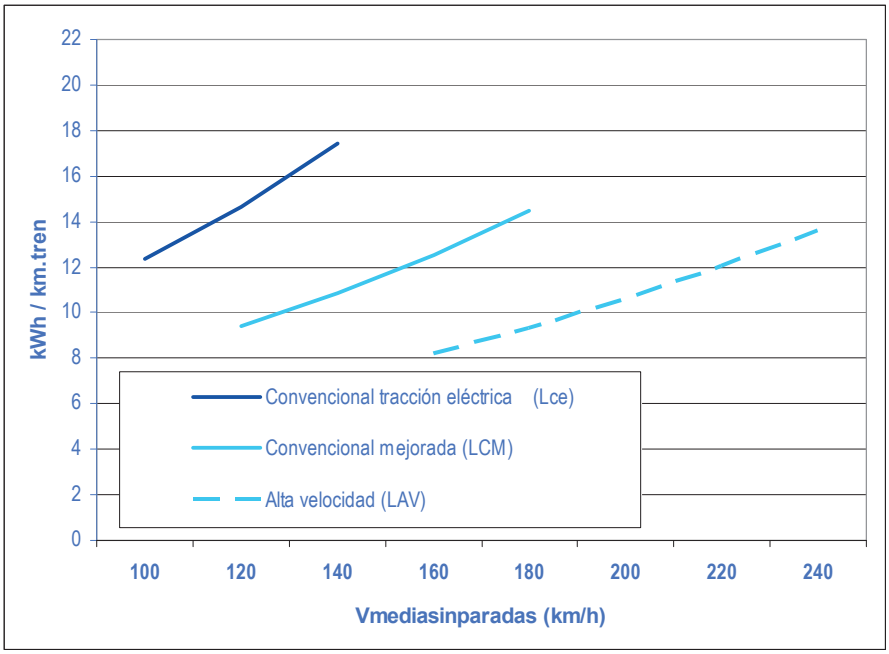
Incidencia en el consumo de una variación de la velocidad a igualdad de los demás factores

Resulta de especial interés, a los efectos del presente estudio, el análisis de la variación del consumo de energía al cambiar la velocidad media manteniendo iguales todos los demás factores.

Como se muestra en la tabla 41, la elasticidad del consumo con respecto a la velocidad es siempre positiva; es decir, al incrementarse la velocidad media sin paradas, aumenta el consumo de energía, y ello es así en todos y cada uno de los sistemas, siendo la elasticidad mayor en el sistema de alta velocidad. Ello no debe sorprender, ya que como se ha mostrado, la velocidad interviene con exponente positivo en la mayor parte de los monomios de la función de consumo, con excepción del relacionado con el consumo de los servicios auxiliares en el que interviene con signo negativo.

Como, por otra parte, el exponente máximo de la velocidad media sin paradas toma valor 2, resulta evidente que el exponente medio resultante tiene que ser menos que cuadrático. De hecho, en los valores de la elasticidad presentados se demuestra que en los casos analizados el exponente está en el entorno de la unidad.

Figura 49. Consumo neto de energía por kilómetro.tren y su relación con la velocidad media sin paradas según el sistema



Fuente: Elaboración propia.

Dentro del mismo sistema (a igualdad de todos los demás factores) el consumo de energía crece al aumentar la velocidad; y para la misma velocidad, el consumo es menor en el sistema de alta velocidad, y es menor en el convencional mejorado que en el convencional, como puede apreciarse en la figura 49. Ello es una consecuencia natural del hecho de que para lograr altas velocidades la mayor parte de los coeficientes que intervienen en la función de consumo tienen que adoptar valores más bajos a fin de hacer posible la elevación de velocidad (coeficiente de curvas, resistencia específica al avance, de pérdidas en la red eléctrica, etc.)

2.6. Análisis del efecto de la alta velocidad en el consumo de energía y emisiones por unidad de tráfico

En el apartado anterior se ha calculado el consumo de energía por kilómetro-tren. Sin embargo, para muchas comparaciones (intramodales o intermodales) el resultado debe ser el consumo de energía por viajero transportado de origen a destino en una ruta.

Para el cálculo del consumo de energía y emisiones por el viajero, es preciso multiplicar sucesivamente el consumo de energía en pantógrafo por kilómetro y por metro cuadrado por varios factores (que habitualmente se denominan en la literatura "logísticos") y que pueden variar fuertemente de un entorno a otro:

- El consumo de energía por kilómetro se ha calculado por cada unidad de superficie útil, y los como los trenes pueden tener diferentes factores de densidad de plazas, es preciso dividir el consumo por unidad de superficie por el factor de densidad (plazas/m^2) y así obtener el consumo por plaza.km.
- Para pasar a consumo por plaza.kilómetro a consumo por viajero.kilómetro se divide el consumo anterior por el "aprovechamiento" (viajeros.km/plazas.km)
- A fin de obtener el consumo por viajero.kilómetro ortodrómico se multiplica el indicador anterior por el "coeficiente de trayectoria" (kilómetros reales/ kilómetros ortodrómicos entre el origen y destino).
- Para convertir la energía eléctrica en pantógrafo en energía medida a la salida de las centrales de generación (que es la energía a la que se refiere el "factor de emisiones") es preciso tener en cuenta el factor de pérdidas en las redes eléctricas, tanto en las públicas, como en la catenaria y en las subestaciones.
- Finalmente, se multiplica el resultado anterior (en kilovatios.hora a la salida de central generadora o litros de gasóleo) por el correspondiente factor de emisiones, y así se obtienen las emisiones de dióxido de carbono por viajero.kilómetro ortodrómico.

(Lógicamente, estas divisiones y multiplicaciones se pueden hacer en diverso orden y, según el indicador que se desee obtener pueden hacerse todas ellas o solo algunas).

Algunos de estos factores "logísticos" son independientes de la velocidad del tren (así ocurre, por ejemplo, con el factor de emisiones de dióxido de carbono). En otros casos, puede haber alguna relación entre la velocidad y el factor (por ejemplo, la densidad de plazas o el factor de aprovechamiento), aunque la diferencia no es intrínseca al sistema de alta velocidad. Finalmente, en el caso del coeficiente de trayectoria sí que hay una relación clara entre el sistema de alta velocidad y un factor de trayectoria más reducido.

Seguidamente se analizan cada uno de estos factores, tratando de identificar su relación con la velocidad o con el sistema de alta velocidad, y de dar los valores más favorable, más desfavorable y más representativo, a fin de poder conocer la envolvente en que se mueve el producto de todos ellos, y por ello completar el resultado de la primera etapa del modelo.

2.6.1. Densidad de plazas

Recordemos que se ha definido la "densidad de plazas" como el número de plazas (asientos, literas, camas o plazas de pie) por cada metro cuadrado de superficie útil de que disponga el vehículo. Como la comparación se refiere exclusivamente a servicios de larga distancia (y no se incluyen servicios de cercanías o metropolitanos que pudieran admitir viajeros de pie), no hay razón para suponer que la densidad será distinta según la velocidad.

En todo caso la densidad de plazas se relacionaría más con el tiempo de recorrido, y por lo tanto la densidad sería más reducida (para la misma distancia) a medida que aumenta la velocidad: En efecto, para la misma distancia, cuanto menor sea el tiempo de recorrido, menor será el tiempo que los viajeros pasen en el tren, y teóricamente se necesitaría menos espacio para cada asiento; también menos espacio para la restauración y cafetería; e igualmente menor número de aseos por plaza. A mayor abundamiento, los trenes de alta velocidad tienen menos paradas intermedias y por ello teóricamente precisarían menos superficie para las plataformas de acceso.

Sin embargo, en la práctica se observa lo contrario: los trenes de alta velocidad tienen menor densidad de plazas por unidad de superficie, favoreciendo la comodidad en detrimento de la capacidad (tabla 42). Probablemente ello se deba que el diseño del servicio está orientado a viajeros cuyo *valor del tiempo* es mayor, y que, por lo tanto, tienen un mayor nivel de renta y mayor predisposición al pago. Este hecho es especialmente patente en España, si bien en el servicio AVE de Madrid a Valencia (que se cubre en 1 hora y 35 minutos) se ha aplicado por primera vez en España una oferta solo con dos clases (Turista y Bussines) en lugar de tres (Turista, Preferente y Club), y además cada coche hay una fila más de asientos. Ello hace que en los trenes Talgo de alta velocidad de la serie 112 tengan 365 plazas en 200 metros de longitud (1,01 plazas/m^2), frente a los 316 plazas en la misma longitud que tiene los trenes (prácticamente gemelos) de la serie 102 que se emplean, por ejemplo, en la ruta de Madrid a Málaga con tiempo de viaje de unas de dos horas y media.

Tabla 42. **Rango de valores de la densidad de plazas**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (p/m^2)	0,77	0,85	0,87	0,80
Tren o criterio empleado	*AVE s 103*	*10 coches Talgo-6*	*Alaris 490*	*Talgo S/4*
Valor representativo (p/m^2)	0,86	0,89	0,97	0,87
Tren o criterio empleado	*Media de 100,102,103,112*	*Media de Arco, 490, Talgo*	*Media 490, 448, coches 9.000*	*Media Talgo s 4 coches 9.000*
Valor más favorable (p/m^2)	1,58	0,93	1,09	0,93
Tren o criterio empleado	*MaxE4 Japón*	*252+7 s/9.000*	*Electrotrén 448*	*333 + 7 s/9.000*
Rango más alto /más bajo	*0,49*	*0,91*	*0,46*	*0,86*

Densidad de plazas expresada en plazas/m^2
Fuente: Elaboración propia sobre datos de (García Álvarez et al., 2008)

2.6.2. Aprovechamiento

El "aprovechamiento" es el cociente entre los viajeros.kilómetro transportados y las plazas.kilómetro ofertadas. Da una indicación de la relación entre la oferta y la demanda de un tren o de un servicio de transporte.

El aprovechamiento no tiene relación directa con la velocidad ni con el sistema de alta velocidad. Tiene que ver con la densidad de tráfico en la ruta así como con la política de oferta y de precios.

Sin embargo sí que se aprecia una clara relación del aprovechamiento con el número de paradas intermedias, véase (García Álvarez et al., 1998). En efecto, cuantas más paradas tenga un tren en su recorrido, menor aprovechamiento tendrá, ya que aunque el tren vaya lleno en el tramo de máxima ocupación (aprovechamiento vertical igual a la unidad) es casi imposible conseguir que en cada parada intermedia se repongan los viajeros que bajan, subiendo exactamente los mismos que han bajado. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de paradas, normalmente menor será el aprovechamiento.

También se producen aprovechamientos bajos en trenes que realizan recorridos muy largos dando lugar a estructuras de tráfico "en triángulo", lo que es muy característico de los servicios de largo recorrido, en lugar de las estructuras de tráfico "rectangulares" de rutas mas cortas y simétricas con condiciones más favorables para el aprovechamiento.

Se han empleado los datos de los aprovechamientos de los trenes españoles de larga distancia en 2010, por clases, para delimitar los rangos y escoger los valores representativos (tabla 43).

Tabla 43. **Rango de valores del aprovechamiento de trenes de larga distancia**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable	0,595	0,619	0,415	0,465
Tren o criterio empleado	*AVE Bcn-Andalucía2010*	*Euromed 2010*	*Media diurno conv.2010*	*Altaria Sur2010*
Valor representativo	0,604	0,626	0,524	0,540
Tren o criterio empleado	*Media AVEs2010*	*Media Euromed Alaris TalgoCM2010*	*Media Trenes 160 LD2010*	*Media Altaria Diesel2010*
Valor más favorable	0,616	0,639	0,572	0,615
Tren o criterio empleado	*AVE Mad Sevilla2010*	*Talgo CM2010*	*Media Talgo2010*	*Altaria Madrid Cartagena 2010*
Rango más alto / más bajo	*1,13*	*1,03*	*1,38*	*1,32*

Valores del aprovechamiento viajeros.km/plazas.km
Fuente: Elaboración propia con datos de (FFE, 2010)

2.6.3. Coeficiente de trayectoria

La función de consumo se ha calculado por kilómetro ya que parece en casi todos los sumandos la energía consumida por un tren es proporcional a la distancia recorrida[16] con la excepción de la energía requerida para los servicios auxiliares que se consume por tiempo y que, por lo tanto, también se relaciona con la distancia recorrida a través de la velocidad.

Los trazados de alta velocidad suponen menores recorridos que los de las líneas convencionales entre los mismos puntos. Si entre los mismos puntos la distancia es menor, el consumo de energía será menor en la misma proporción, a igualdad de todos los demás factores.

En concreto, en España, las líneas de alta velocidad tienen un recorrido medio menor en un 13% que el de la línea ferroviaria convencional entre los mismos puntos, si se mide en términos estáticos (como media simple de los coeficientes de las rutas), y del 12% si se mide el coeficiente de trayectoria efectivo (ponderando los coeficientes por los viajeros.kilómetro previstos en cada ruta. En algunas rutas (como la de Madrid a Segovia) la distancia en alta velocidad llega a ser inferior en un 23% y solo en algunas rutas de Madrid a Levante (Albacete, Murcia, Alicante) es mayor en alta velocidad, debido a la peculiar topología troncal de esta línea de alta velocidad.

Para el análisis del rango y los valores representativos, se emplean los datos del *coefiente de trayectoria* observado en las líneas ferrovarias españolas (tabla 44).

Tabla 44. **Rango de valores del coeficiente de trayectoria**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable	1,45	1,55	1,94	1,94
Tren o criterio empleado	*Madrid-Albacete*	*Media 200xrangoAV*	*Mad.-S.Sebastián*	*Mad.-S.Sebastián*
Valor representativo	1,26	1,35	1,47	1,47
Tren o criterio empleado	*Media líneas AVEsp.*	*Media líneas 200*	*Media líneas conv.*	*Media líneas conv.*
Valor más favorable	1,08	1,16	1,17	1,17
Tren o criterio empleado	*Madrid Segovia*	*Media 200xrangoAV*	*Madrid Burgos*	*Madrid Burgos*
Rango más alto / más bajo	*1,34*	*1,34*	*1,66*	*1,66*

Valores del coeficiente de trayectoria en $km/km_{ortodrrómicos}$

Fuente: Elaboración propia sobre datos de (García Álvarez & Fernández González, 2008)

[16] En rigor, sería preciso añadir la energía consumida por los servicios auxiliares en el tiempo en el que el tren está parado pero con estos servicios funcionando; por ejemplo, en las paradas comerciales o en el tiempo antes de salir del origen, mientras suben los viajeros, o mientras bajan en destino.

2.6.4. Pérdidas de energía en las redes eléctricas

Las centrales generadoras de electricidad (típicamente, pertenecientes al sistema eléctrico público) deben producir una determinada cantidad de energía para cada tren que es la energía neta demanda por el tren en el pantógrafo más las pérdidas se producen en las redes y subestaciones entre la salida de la central generadora y el pantógrafo (es decir, las pérdidas en la red eléctrica pública y en la red ferroviaria).

La energía perdida en los procesos de cambio de tensión y en el transporte de la energía desde la salida de la central generadora hasta que llega al tren es proporcional a la energía que llega a la locomotora, y el coeficiente de pérdidas depende de la tensión de funcionamiento del tren (tabla 46) (mayor tensión significa menores pérdidas), así como de algunas características de la electrificación (la sección de los conductores, la distancia entre subestaciones, etc.) Véanse (Pilo de La Fuente, E., 2003) y (Jiménez Octavio, Such Taboada, Carnicero López, & Pilo de la Fuente, E., 2010) para más detalles sobre la relación entre el diseño de la red eléctrica y las pérdidas de energía en ella.

Las líneas ferroviarias en España están electrificadas las siguientes tensiones:

- Las líneas nuevas de alta velocidad, están electrificadas a 25 kV en corriente alterna con frecuencia de 50 hercios (en dos versiones distintas: con el sistema 1x25 kV en la línea de Madrid a Sevilla y con el sistema 2x25 kV en las demás líneas nuevas de alta velocidad[17]).
- Las líneas convencionales (tanto las mejoradas como las no mejoradas) están electrificadas en España en todos los casos a 3 kV en corriente continua[18].

La mayor tensión de la electrificación supone menos pérdidas eléctricas en los procesos de transformación y transporte.

La cantidad adicional que hay que producir para subvenir las pérdidas entre la central generadora y el pantógrafo es del 11,8 al 12,2 % para el caso de los trenes que funcionan a 3 kV en corriente continua, y baja hasta el 3,5% si los trenes funcionan en corriente alterna con el sistema 2x25 kV. (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009).

[17] El sistema de 2x25 lleva un feeder negativo a -25 kV, por lo que la tensión entre el hilo de contacto y este feeder es de 50 kV. La mayor parte del recorrido de la energía (desde la subestación al tren) la energía tiene la tensión de 50 kV, y solo en el tramo final (desde el autotransformador hasta el tren) la tensión es de 25 kV. Ello significa menores pérdidas óhmicas, si bien en la práctica esta ventaja energética se ve reducida por el hecho de que sueles ser mayor la distancia entre la subestaciones aprovechando las menores pérdidas.

[18] En 2011 el Ministerio de Fomento ha dictado una resolución por la que se establece la tensión de 25 kV en corriente alterna para las nuevas electrificaciones, tanto de la red de alta velocidad como la convencional. La electrificación de Santiago a Coruña es la primera de la red convencional española en adoptar la electrificación en corriente alterna. Esta decisión se tomó hace años en algunos países (por ejemplo, en Francia), por lo que en la red convencional convive la corriente continua de las electrificaciones más antiguas no transformadas y la alterna. En muchos países centroeuropeos (Alemania, Austria,...) y en Suecia la tensión de electrificación de todas las líneas de la red principal es de 15 kV en corriente alterna y con frecuencia especial (16,66 Hz).

Tabla 45. **Rango de valores del coeficiente de pérdidas de las redes eléctricas**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Tensión de alimentación	**2x25 o 1x25 AC**	**3 kV DC o 1x25 kV AC**	**3 kV D.C.**	**-----**
Valor más desfavorable	1,059	1,122	1,122	----
Valor representativo	1,040	1,105	1,120	----
Valor más favorable	1,035	1,059	1,118	----
Rango más alto / más bajo	*1,009*	*1,059*	*1,004*	----

Valores de las pérdidas en kWh en central de generación / kWh en pantógrafo
Fuente: Elaboración propia sobre datos de (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009)

Para la determinación de los valores que delimitan el rango y los que se emplean como más representativos (y que aparecen en la tabla 45) se ha asumido que:

- Las líneas nuevas de alta velocidad están electrificadas en corriente alterna en 1x25 o 2x25 kV, con valor más representativo próximo al que corresponde al sistema de 2x25 kV.
- Las líneas convencionales mejoradas lo están a 3 kV en corriente continua o a 1x25 kV en alterna, con valor representativo más próximo al habitual en España de 3 kilovoltios en corriente continua.
- Las líneas convencionales están electrificadas a 3 kilovoltios en corriente continua. Se ha aplicado como valor más favorable el de una línea de cercanías con tráfico denso y como valor representativo uno intermedio entre éste y de una línea con tráfico menos denso.

2.6.5. Factor de emisiones de gases de efecto invernadero

Los factores de emisión de gases de efecto invernadero (gramos de CO_2 por kWh) son fijos, como ya se ha expuesto, en el caso de los vehículos de motor térmico (por cada litro de gasóleo, que tiene un equivalente energético de 10,2 kWh, se emiten 2,6 kilogramos de dióxido de carbono).

En cuanto a las emisiones producidas en la generación de electricidad, como también se expuso, son variables de año a año y de país a país. Para analizar el rango de variación de los datos posibles en España se han tomado el máximo y el mínimo en el periodo de 2005 a 2010, y como valor representativo, se ha tomado un valor medio ponderado dando más peso a los valores más recientes para así recoger el efecto de la tendencia decreciente en el largo plazo (tabla 46), pero evitando el uso del dato de emisiones de 2010 que fue, como ya se ha indicado, fue anormalmente favorable.

Tabla 46. **Rango de valores de los factores de emisión de gases de efecto invernadero**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable	372	372	372	261
Tren o criterio empleado	*Peor valor en España 2005-2010*			*Valor fijo*
Valor representativo	288	288	288	261
Tren o criterio empleado	*Valor medio España 2005-2010 ponderando según proximidad a 2010*			*Valor fijo*
Valor más favorable	166	166	166	261
Tren o criterio empleado	*Mejor valor en España 2005-2010*			*Valor fijo*
Rango más alto / más bajo	*2,24*	*2,24*	*2,24*	*1*

Todos los datos están expresados en gramos de dióxido de carbono por kilovatio hora

Fuente: Elaboración propia sobre datos de (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009), (López Martínez, Sánchez Alejo, & Fernández, 2009) y www.adena.es.

2.6.6. Resultado global de los factores logísticos y externos

Si se combinan todos los factores logísticos y externos para cada sistema, tanto en su valor más desfavorable como en el más favorable y en el más representativo, se puede observar cómo los rangos de variación son muy importantes. Los valores concretos y la amplitud de los rangos se indican en la tabla 47.

Puede observarse en ella cómo combinandso los factores logísticos y externos el rango de variación del resultado llega a ser de 1 a 6,5, lo que daría lugar a una variación en el misma proporción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 47. **Rango de valores extremos y valores más representativos del conjunto de los factores logísticos y externos**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (m^2.km.gCO_2/v.km_{ort}.kWh)	1.247	1.230	2,243	1.361
Valor representativo (m^2.km.gCO_2/v.km_{ort}.kWh)	727	771	933	817
Valor más favorable (m^2.km.gCO_2/v.km_{ort}.kWh)	191	343	348	534
Rango + desfavorable / + favorable	*6,54*	*3,58*	*6,44*	*2,55*
Rango + desfavorable / representativo	*1,72*	*1,59*	*2,40*	*1,67*
Rango + favorable / representativo	*0,26*	*0,44*	*0,37*	*0,65*

Fuente: Elaboración propia

La amplitud de este rango aumenta la variabilidad, ya apuntada, del consumo de energía del ferrocarril, lo que da lugar a un rango enormemente grande de valores posibles de las emisiones por viajero y por kilómetro ortodrómico.

2.6.7. Resultados del consumo y emisiones por unidad de tráfico

Si se multiplican los resultados obtenidos para el consumo final de energía por unidad de oferta ($km.m^2$) por el resultado del conjunto de los factores homogenizadores (logísticos y externos), se obtienen las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de demanda (por viajero y por kilómetro ortodrómico). Este proceso se ha realizado para cada uno de los cuatro sistemas (AV, LCM, LCe y LCd); y tanto para los valores más representativos de las variables que intervienen en la función del consumo, como para sus valores extremos (más desfavorables y más favorables).

Resultados más representativos por sistema.- Los resultados más representativos obtenidos para cada sistema son los que se incluyen en la tabla 48. Puede observarse cómo las emisiones por viajero y por kilómetro ortodrómico del sistema convencional mejorado son un 11 por ciento mayores que las del sistema de alta velocidad puro; las del sistema convencional con tracción eléctrica son un 53,3 por ciento mayores; y las del convencional con tracción diésel son un 318 por ciento mayores que las del sistema de alta velocidad, todo ello empleando los valores más representativos en cada uno de los sistemas.

Tabla 48. **Valores más representativos de las emisiones por unida de tráfico según tipo de sistema**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Emisiones por unidad de tráfico (gCO_2/v.km-ort)	18,2	20,3	27,9	76,2
Proporción con el sistema de alta velocidad	*1*	*1,115*	*1,533*	*4,187*

Fuente: Elaboración propia

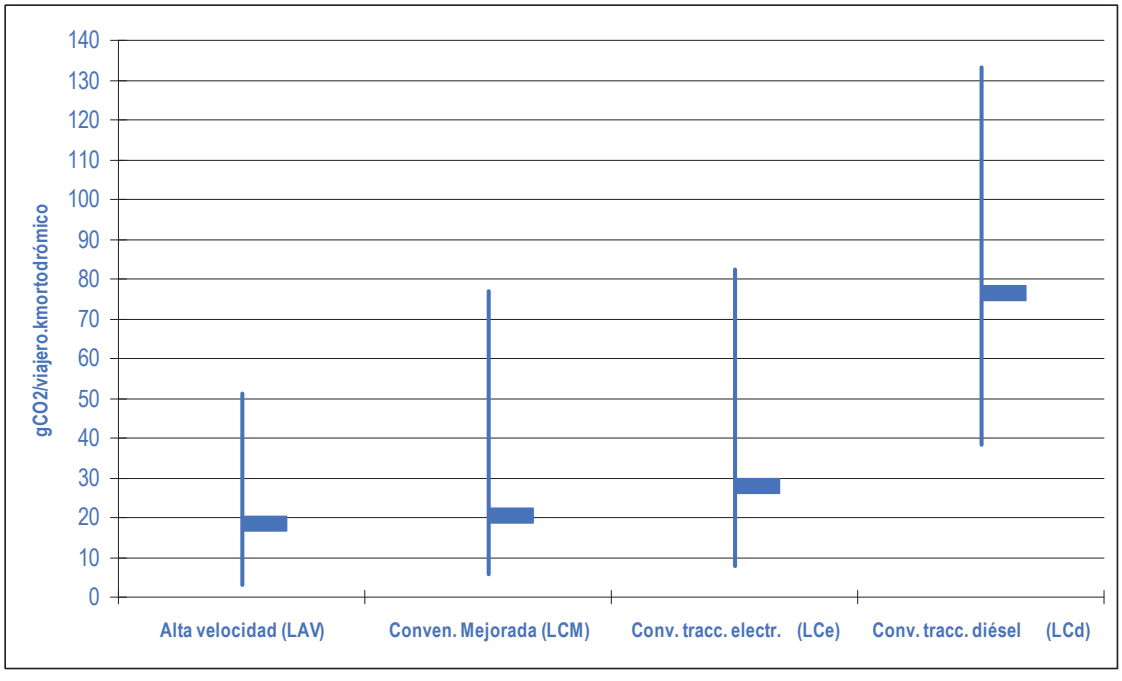
Si se aplican estos resultados a un recorrido como el de Madrid-Atocha a Barcelona-Sants (de 502,8 kilómetros ortodrómicos) resultan unas emisiones de dióxido de carbono de 9,15 kilogramos en alta velocidad, de 10,21 kilogramos en el sistema convencional mejorado; de 14,028 kilogramos en sistema convencional con tracción eléctrica y de 38,31 kilogramos de dióxido de carbono por viajero en sistema convencional con tracción diesel.

Rango de variación del resultado al emplear los valores más favorables y más desfavorables (tabla 49 y figura 50).- Si se comparan los resultados de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de demanda (es decir, por viajero y por kilómetro ortodrómico) que se obtienen al aplicar los valores extremos (el más favorable y el más desfavorable) además de los valores más representativos de cada sistema, se observa cómo el orden de los resultados por sistemas sigue siendo el mismo, pero el rango de variación es mayor aún que al analizar el consumo por unidad de oferta. Aquí los rangos de variación alcanzan proporciones de entre 1:2,21 y 1:7,82 en lo relativo al consumo de energía por unidad de oferta; y proporciones entre 1:3,48 y 1:17,51 para las emisiones de gases de efecto invernadero. La amplitud de cada uno de estos rangos es, por lo tanto, mayor que las diferencias entre los consumos y emisiones que arrojan los valores representativos en cada uno de los sistemas.

Tabla 49. **Valores extremos que pueden alcanzar las emisiones por viajero kilómetro ortodrómico**

		Alta velocidad (LAV)	Conven. Mejorada (LCM)	Conv. tracc. electr. (LCe)	Conv. tracc. diésel (LCd)
Escenario más desfavorable (mayor consumo)					
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	18,52	28,20	16,54	44,09
Energía neta final por kilómetro tren	*kWh/km*	18,52	28,20	16,54	44,09
Energía por viajero km ortodrómico	*kWh/v.km ort*	0,138	0,207	0,222	0,511
Emisiones por viajero km ortodrómico	*gCO2/v.kmort*	51,3	77,1	82,4	133,3
Escenario más probable o de referencia					
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	12,28	13,47	14,99	41,95
Energía neta final por kilómetro tren	*kWh/km*	11,29	11,82	13,45	41,95
Energía por viajero km ortodrómico	*kWh/v.km ort*	0,063	0,070	0,097	0,292
Emisiones por viajero km ortodrómico	*gCO2/v.kmort*	18,2	20,3	27,9	76,2
Escenario más favorable (menor consumo)					
Total energía importada en el pantógrafo	*kWh/km*	7,25	8,77	11,59	32,29
Energía neta final por kilómetro tren	*kWh/km*	6,90	7,45	10,28	32,29
Energía por viajero km ortodrómico	*kWh/v.km ort*	0,018	0,034	0,048	0,231
Emisiones por viajero km ortodrómico	*gCO2/v.kmort*	2,9	5,7	7,9	38,3
Rangos de variación					
Rango + desfavorable/ + favorable energía		*7,82*	*6,06*	*4,63*	*2,21*
Rango + desfavorable/ + favorable emisiones		*17,51*	*13,58*	*10,37*	*3,48*

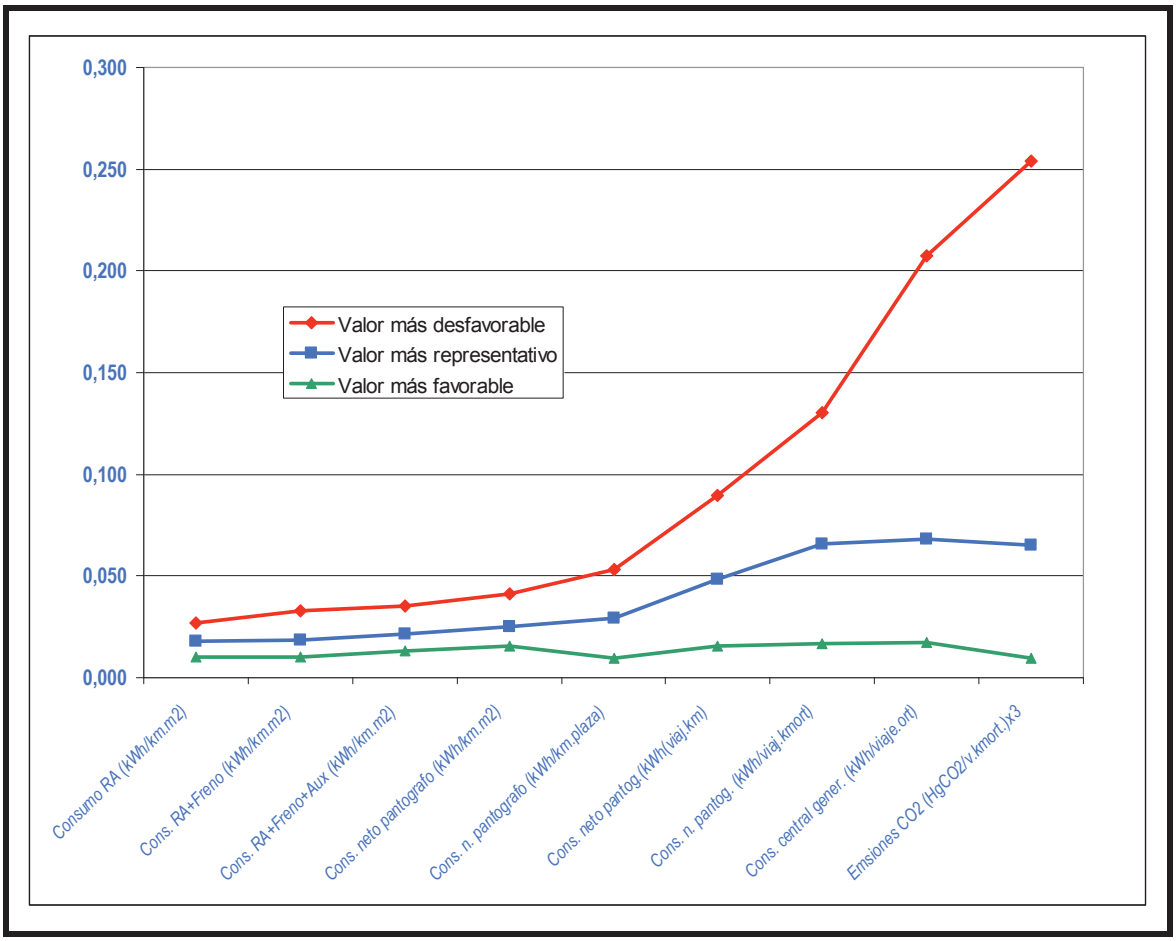
Figura 50. **Representación gráfica de los valores extremos que pueden alcanzar las emisiones por unidad de demanda (viajero kilómetro ortodrómico)**



Fuente: Elaboración propia

Cuanto mayor sea el grado de homogeneización que se pretenda en los resultados, mayor será la dispersión posible entre los resultados ya que se deben tener en cuenta más factores susceptibles de adoptar valores diversos como se puede apreciar en la figura 51.

Figura 51. **Representación gráfica de los valores extremos que pueden alcanzar diversos indicadores en el sistema de alta velocidad**



Fuente: Elaboración propia

2.6.8. Valores posibles de los diversos indicadores de energía y emisiones del tren de alta velocidad

Con los datos presentados anteriormente es posible explicitar en la tabla 50 los valores mas representativos, así como lo valores extremos (más favorable y más desfavorable) que puede adoptar cada uno de los diversos indicadores del consumo y de las emisiones del ferrocarril en el sistema de alta velocidad.

Tabla 50. **Valores más representativos y extremos de los diversos indicadores del consumo de energía y de las emisiones en el ferrocarril de alta velocidad**

	Unidad	Valor favorable	Valor más representativo	Valor más desfavorable
Energía importada en pantógrafo por kilómetro tren (de 450m^2)	*kWh/km*	7,25	12,28	18,52
Energía neta en pantógrafo por kilómetro tren (de 450 m^2)	*kWh/km*	6,90	11,29	18,52
Energía importada en pantógrafo por plaza kilómetro	*kWh/p.km*	0,0102	0,0235	0,0535
Energía neta en pantógrafo por plaza kilómetro	*kWh/p.km*	0,0097	0,0292	0,0535
Energía importada en pantógrafo por viajero.km	*kWh/v.km*	0,0166	0,0390	0,0899
Energía neta en pantógrafo por viajero.km	*kWh/v.km*	0,0157	0,0483	0,0899
Energía neta en central generación por plaza.km	*kWh/v.km*	0,0100	0,0304	0,0566
Energía neta en central generación por viajero.km	*kWh/v.km*	0,01623	0,0563	0,0951
Energía neta en central por viajero km ortodrómico	*kWh/v.km$_{ort}$*	0,0175	0,0709	0,1379
Emisiones por plaza.kilómetro	*gCO$_2$/p.km*	1,660	8,755	21,055
Emisiones por viajero.km	*gCO$_2$/v.km*	2,694	16,214	35,377
Emisiones por viajero.km ortodrómico	*gCO$_2$/v.km$_{ort}$*	2,905	20,319	51,299

Fuente: Elaboración propia

2.6.9. Comparación de los resultados obtenidos con otros resultados publicados sobre consumo y emisiones

A fin de comprobar la verosimilitud de los resultados obtenidos (al menos en cuanto a su orden de magnitud) se van a comparar éstos con los publicados en diversas fuentes sobre consumo de energía y emisiones del ferrocarril. El hecho de que para cada magnitud (consumo de energía final, energía útil, emisiones, etc.) hayamos calculado diversos indicadores (por plaza, por viajero, por viajero kilómetro, por kilómetro ortodrómico,…) permite encontrar el indicador adecuado para la comparación homogénea con cada uno de los publicados.

➢ Datos del Observatorio del Ferrocarril en España (2009)

El Observatorio del Ferrocarril en España, realizado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles por encargo del Ministerio de Fomento, publica desde su edición de 2009 datos de consumo de energía y de emisiones de gases de efecto invernadero en las principales rutas españolas por número de viajeros de larga y de media distancia. Para su cálculo utiliza el simulador ALPI, y para cada origen-destino se emplean los datos concretos de la oferta en la ruta en el año analizado: velocidad media, distancia entre paradas, aprovechamiento y tipo de vehículo empleado.

Al objeto de facilitar la comparación, se han realizado dos modificaciones en los datos publicados:

- Por una parte, se ha cambiado el valor del factor de emisiones de gases de efecto invernadero a fin de evitar la distorsión introducida por este externo al sistema de transporte. El Observatorio emplea el dato real de las emisiones en el sistema español peninsular en 2009 (233 gCO_2/kWh), mientras que los cálculos de esta tesis se han realizado con un valor medio ponderado del periodo 2005-2010 (288 gCO_2/kWh).
- Por otra parte, se ha cambiado la unidad empleada para las emisiones, utilizando gramos de dióxido de carbono por kilómetro ortodrómico en lugar de kilogramos de dióxido de carbono por cada 100 kilómetros ortodrómicos.

Puede observarse lo siguiente:

- En cuanto a los trenes de alta velocidad, el valor medio de las emisiones es relativamente similar al presentado anteriormente (el resultado del Observatorio es de 22,872 $gCO_2/v.km_{ort}$ frente a 20,319 $gCO_2/v.km_{ort}$). También el rango de variación es coherente, pues los resultados publicados en el Observatorio de cada una de las rutas (6,628 a 41,631 $gCO_2/v.km_{ort}$) entran dentro del rango presentado (2,905 a 51,200 $gCO_2/v.km_{ort}$)
- El resultado del consumo de energía neta en pantógrafo por kilómetro.tren en el ferrocarril de alta velocidad es también similar al obtenido anteriormente: la media de las rutas del Observatorio es de 11,722 kWh/km.tren frente a 11,29 kWh/km; y los resultados del Observatorio oscilan entre 3,626 y 17,919

kWh/km.tren, valores que están dentro del rango de 3,45[19] a 18,72 kWh/km.tren.

- En cuanto a los trenes convencionales de tracción eléctrica, el valor medio de emisiones (22,940 $gCO_2/v.km_{ort}$) del Observatorio encaja con los valores medios calculados (20,3 $gCO_2/v.km_{ort}$) para el sistema convencional mejorado (que es el tipo de servicio predominante entre los analizados por la FFE) y para el convencional de tracción eléctrica (27,9 $kgCO_2/v.km_{ort}$). También el rango del Observatorio (14,6 a 32,8 $kgCO_2/v.km_{ort}$[20]) está cubierto por el rango de los resultados obtenidos en la tesis (2,13 –dato corregido por la superficie- a 82,4 $kgCO_2/v.km_{ort}$).
- En los trenes de tracción diésel, el valor medio de 76,5 $kgCO_2/v.km_{ort}$ es similar al de 76,2 $kgCO_2$/v.kmort, lo que no es de extrañar porque precisamente el tren considerado como más representativo en esta tesis (que es el Talgo de Madrid a Murcia y Cartagena) es el único tren diésel de larga distancia que aparece en el estudio de la FFE, que únicamente incluye las rutas de mayor tráfico.
- Si se compara el valor medio de las emisiones por viajero.kilómetro ortodrómico en todas las rutas de alta velocidad (tanto de media como de la larga distancia) con el valor obtenido en todas las rutas de ferrocarril convencional (tanto mejorado como no mejorado, tanto de larga distancia como de media distancia) el resultado ofrece la misma conclusión ya encontrada anteriormente: las diferencias en las emisiones son pequeñas y son algo más reducidas en el sistema de alta velocidad: 22,782 gCO_2 por viajero.km ortodrómico en alta velocidad, frente a 22.940 $gCO_2/v.km$ en convencional (+6,9%). La diferencia en los valores medios es muy inferior a la variación del rango, por lo que es perfectamente posible encontrar casos en los que las emisiones en el sistema de alta velocidad sean mayores que en el convencional. En la tabla 51 se explictan las emisiones de gases de efecto invernadero en las principales rutas españolas.

[19] Debe observarse que el valor inferior del rango calculado en esta tesis (6,90 kWh/km.tren) se ha adecuado a la superficie útil bruta del tren más pequeño de entre los que aparecen en el estudio de la FFE, puesto que los valores de la tesis estaban homogeneizados para trenes de 450 metros cuadrados.

[20] En los servicios de media distancia los valores de la superficie son más reducidos que los considerados en la tesis, pero también lo es el aprovechamiento, lo que explica que los valores del Observatorio estén incluidos en el rango.

Tabla 51. **Emisiones de gases de efecto invernadero en las principales rutas españolas**

Vmedia sin paradas	Distancia entre paradas	Origen	Destino	Consumo por tonelada	t/ tren	Consumo por km	plazas/ tren	Consumo por plaza.km	viajeros .km/ plaza.km (aprov)	Consumo por viajero.km	L_{tren} / L_{orto}	Consumo por viajero.k_{mrt} o	Factor emisiones	Emisiones por viajero. km_{Orto}
km/h	*km*			*kWh/ t.km*		*kWh/ tren.km*		*kWh/ plaza.100km*		*kWh/ viajero.100 km*		*kWh/ viajero. 100km $_{Orto}$*	*gCO_2 / kWh*	*gCO_2 / viajero. km_{Orto}*
Alta velocidad larga distancia														
235,82	621,00	Madrid	Barcelona	0,042	*425*	17,912	*404*	4,434	*0,585*	7,583	*1,22*	9,264	*233*	26,680
188,40	471,00	Madrid	Sevilla	0,035	*392*	13,635	*329*	4,144	*0,637*	6,503	*1,21*	7,892	*233*	22,730
205,20	513,00	Madrid	Málaga	0,039	*322*	12,527	*319*	3,927	*0,607*	6,471	*1,24*	8,018	*233*	23,093
239,22	307,00	Madrid	Zaragoza	0,033	*425*	14,159	*404*	3,505	*0,585*	5,994	*1,12*	6,691	*233*	19,270
201,76	343,00	Madrid	Córdoba	0,038	*364*	13,848	*325*	4,257	*0,499*	8,532	*1,16*	9,923	*233*	28,579
223,95	321,00	Barcelona	Zaragoza	0,037	*425*	15,688	*404*	3,883	*0,585*	6,641	*1,26*	8,360	*233*	24,076
191,14	178,40	Madrid	Valladolid	0,040	*322*	12,948	*319*	4,059	*0,597*	6,804	*1,14*	7,782	*233*	22,411
211,20	176,00	Madrid	Tarragona	0,038	*425*	16,221	*404*	4,015	*0,585*	6,867	*1,23*	8,451	*233*	24,340
212,86	149,00	Madrid	Lleida	0,038	*425*	16,221	*404*	4,015	*0,585*	6,867	*1,16*	7,931	*233*	22,842
Alta velocidad media distancia														
150,00	75,00	Madrid	Toledo	0,033	*222*	7,389	*237*	3,118	*0,718*	4,342	*1,14*	4,934	*233*	14,211
204,72	170,60	Madrid	Ciudad Real	0,034	*222*	7,483	*237*	3,157	*0,572*	5,517	*1,08*	5,939	*233*	17,104
168,93	126,70	Sevilla	Córdoba	0,042	*222*	9,200	*237*	3,882	*0,496*	7,824	*1,06*	8,261	*233*	23,792
144,21	67,30	Madrid	Segovia	0,039	*222*	8,603	*237*	3,630	*0,597*	6,085	*0,83*	5,056	*233*	14,562
157,61	88,00	Barcelona	Lleida	0,037	*222*	8,154	*237*	3,441	*0,461*	7,467	*1,36*	10,187	*233*	29,339
167,25	89,20	Madrid	Valladolid	0,034	*252*	8,603	*280*	3,073	*0,597*	5,151	*1,14*	5,890	*233*	16,964
179,40	104,65	Madrid	Puertollano	0,034	*222*	7,483	*237*	3,157	*0,572*	5,517	*1,08*	5,972	*233*	17,198
164,22	73,90	Sevilla	Málaga	0,042	*222*	9,200	*237*	3,882	*0,496*	7,824	*1,85*	14,455	*233*	41,631
212,174	342,156	**Media**		0,037		11,722		3,740		6,588		7,942		22,872
18,012	164,681	**Desviación tipica**		0,003		3,626		0,428		1,085		2,301		6,628
239,221	621,000	**Máximo**		0,042		17,912		4,434		8,532		14,455		41,631
188,400	149,000	**Mínimo**		0,033		7,389		3,073		4,342		4,934		14,211
Larga distancia convencional tracción eléctrica														
129,47	123,00	Barcelona	Valencia	0,027	*312*	8,506	*298*	2,854	*0,613*	4,660	*1,21*	5,620	*233*	16,185
137,22	164,67	Madrid	Valencia	0,034	*159*	5,350	*161*	3,323	*0,651*	5,104	*1,64*	8,377	*233*	24,125
127,43	92,60	Madrid	Alicante	0,029	*312*	8,965	*298*	3,008	*0,677*	4,442	*1,29*	5,745	*233*	16,546
	107,75	Madrid	Pamplona	0,036	*252*	9,180	*238*	3,857	*0,610*	6,328	*1,41*	8,943	*233*	25,755
123,56	139,00	Barcelona	Alicante	0,027	*312*	8,506	*298*	2,854	*0,613*	4,660	*1,36*	6,351	*233*	18,290
105,27	104,22	Madrid	Asturias	0,036	*312*	11,215	*298*	3,763	*0,588*	6,403	*1,38*	8,826	*233*	25,420
130,53	142,50	Madrid	Albacete	0,034	*159*	5,350	*161*	3,323	*0,677*	4,907	*1,29*	6,328	*233*	18,226
121,86	131,00	Barcelona	Castellón	0,027	*312*	8,506	*298*	2,854	*0,613*	4,660	*1,09*	5,066	*233*	14,591
131,70	87,25	Madrid	León	0,031	*312*	9,772	*298*	3,279	*0,512*	6,411	*1,23*	7,878	*233*	22,689
Media distancia convencional tracción eléctrica														
85,77	7,25	Barcelona	Girona	0,035	*172*	6,061	*261*	2,322	*0,317*	7,323	*1,17*	8,543	*233*	24,605
80,00	20,00	Barcelona	Tarragona	0,031	*156*	4,902	*234*	2,095	*0,317*	6,606	*1,32*	8,692	*233*	25,034
77,19	14,87	Barcelona	Figueres	0,035	*172*	6,061	*261*	2,322	*0,317*	7,323	*1,12*	8,165	*233*	23,515
85,86	12,70	Barcelona	Reus	0,031	*156*	4,902	*234*	2,095	*0,317*	6,606	*1,13*	7,458	*233*	21,478
102,00	5,74	Girona	Figueres	0,035	*172*	6,061	*261*	2,322	*0,317*	7,323	*1,35*	9,886	*233*	28,471
137,88	58,60	Barcelona	Torredembarra	0,031	*156*	4,902	*234*	2,095	*0,317*	6,606	*1,72*	11,386	*233*	32,792
86,14	60,30	Madrid	Ávila	0,032	*156*	4,918	*234*	2,102	*0,317*	6,628	*1,36*	8,981	*233*	25,866
94,80	19,75	Barcelona	Salou	0,031	*156*	4,902	*234*	2,095	*0,317*	6,606	*1,30*	8,603	*233*	24,776
104,83	17,47	Sevilla	Jerez F.	0,035	*172*	6,061	*261*	2,322	*0,317*	7,323	*1,16*	8,530	*233*	24,565
94,774	27,458	**Media**		0,032		6,895		2,716		6,107		7,965		22,940
17,564	22,227	**Desviación típica**		0,003		2,052		0,601		1,055		1,614		4,649
137,882	60,300	**Máximo**		0,036		11,215		3,857		7,323		11,386		32,792
77,192	5,738	**Mínimo**		0,027		4,902		2,095		4,442		5,066		14,591
Larga y media distancia convecional con tracción diésel														
116,49	116,00	Madrid	Murcia	0,084	*245*	20,681	*262*	7,893	*0,620*	12,731	*1,33*	16,975		48,888
111,94	65,30	A Coruña	Santiago	0,114	*152*	17,251	*189*	9,128	*0,317*	28,785	*1,19*	34,176	*233*	98,426
93,26	57,90	Madrid	Salamanca	0,081	*157*	12,770	*185*	6,903	*0,317*	21,769	*1,31*	28,484	*233*	82,034
94,774	27,458	**Media**		0,093		16,901		7,975		21,095		26,545		76,449
17,564	22,227	**Desviación típica**		0,018		3,967		1,115		8,048		8,763		25,237
137,882	60,300	**Máximo**		0,114		20,681		9,128		28,785		34,176		98,426
77,192	5,738	**Mínimo**		0,081		12,770		6,903		12,731		16,975		48,888

Fuente: (FFE, 2010)

➢ Datos del informe del Rail Safety & Standards Board

En Gran Bretaña, el "Rail Safety&Standards Board" ha encargado a la Universidad de Lancaster un estudio sobre las unidades de medida a emplear en los análisis comparativos del consumo de energía y de emisiones de los diferentes modos de transporte y la realización de una comparación homogénea entre los consumos y emisiones de los modos de transporte existentes. Para el caso del ferrocarril ha empleado como fuente primaria datos publicados por la Asociación de Operadores privados (ATOC). Los resultados de este informe pueden verse en (Kemp, 2007).

La comparación de los resultados presentados anteriormente en esta tesis con los datos del informe británico tiene la limitación de que se producen en entornos operativos bien distintos, como lo son el británico y el español; no solo por el aplastante predominio de la tracción diesel en los servicios de larga distancia en Gran Bretaña, sino por la ausencia casi absoluta de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad, y por ello, de servicios en alta velocidad. Sin embargo, se considera de interés comprobar si el orden de magnitud de los resultados aportados en este trabajo (que se refiere además a resultados de otros países, como Japón) encaja con los publicados en la tesis.

Cunado se refiere a datos británicos, a fin de que la comparación resulte homogénea, se ha sustituido el factor de emisiones empleado por Kemp (455 gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora, que es el valor británico de 2005) por el de 288 gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora, que es el valor medio ponderado del periodo 2005-2010 en España y el utilizado como referencia en esta tesis.

Trenes diésel.- Los valores de consumo de energía para los trenes diésel convencionales son de 0,831 litros/100 plazas.km (para el tren de la serie 170 de tres coches); de 0,788 l/100 p.km (serie 170 de dos coches); y de 0,99 l / 100 p.km (serie 222, Meridian); que se pueden comparar con los 0,85 litros/100 plaza.kilómetro del tren HST(IC 125) que circula a 200 km/h y que sería equivalente a un tren diésel de alta velocidad circulando a 200 km/h sobre una línea convencional mejorada. Los valores equivalentes de emisiones de gases de efecto invernadero son de 40,52, 38,42 y de 48,27 gramos de CO_2 por cada viajero.kilómetro para trenes convencionales diésel y de 41,44 gramos de CO_2 por viajero.kilómetro para el HST.

Trenes eléctricos.- Para los trenes eléctricos apunta valores de 0,040 kWh por plaza kilómetro para un tren de 9 coches y de 0,035 kWh/plaza kilómetro para un tren de 11 coches (ambos de la serie 390, Pendolino). Ello sugiere unas ciertas (y esperables) eficiencias derivadas del tamaño del tren.

Considerando los factores "logísticos y externos" del caso español para que la comparación sea más homogénea (pérdidas en las redes, 1,105; aprovechamiento 0,524; factor de emisiones, 288 gCO_2/kWh; y coeficiente de trayectoria 1,47) se convierten respectivamente en 24,28 gCO_2/v.km y 21,245 gCO_2/v.km; y en relación con la distancia ortodrómica, equivalen a 35,698 y 31,22 $gCO_2/v.km_{ort}$ (por encima de la media de 22,9 $gCO_2/v.km_{ort}$, pero en el rango de verosimilitud que se extiende entre 14,591 y 32,792 gCO_2/km_{ort}).

Para el tren eléctrico de alta velocidad IC225 formado por una locomotora serie 91 y coches tipo Mk3, el consumo de medio de energía sería de 0,032 kWh/p.km, que equivale a 28,544 $gCO_2/v.km_{ort}$, por debajo de los trenes convencionales; por supuesto, también por debajo de los trenes diésel; y en la banda alta de los valores observados en España para servicios convencionales en líneas convencionales.

(Kemp, 2007) cita valores de otros países, tales como 0,03 kWh/plaza.km (26,76 $gCO_2/v.km_{ort}$) de los trenes japoneses de alta velocidad Shinkansen citando a Taniguchi.

➢ Datos de los trenes suecos

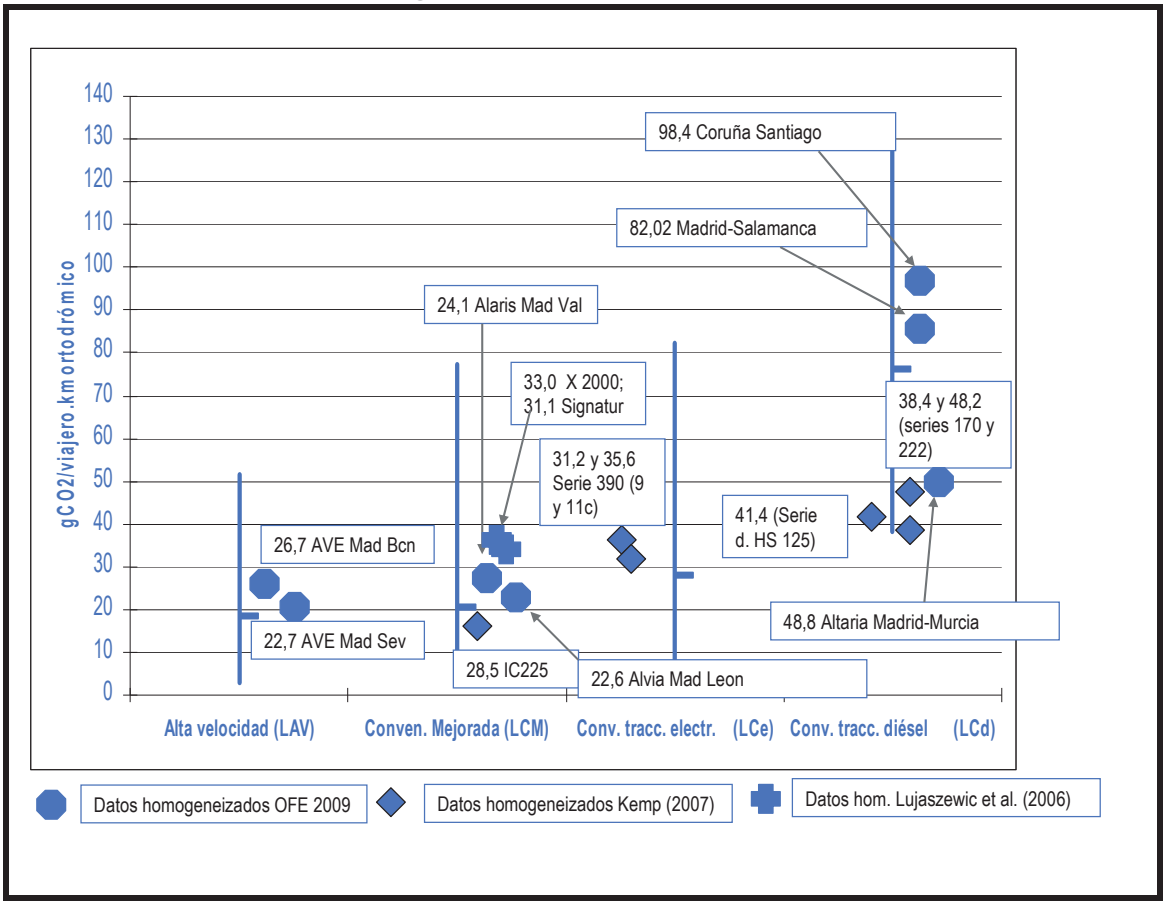
Para los tres suecos (Lukaszewicz & Andersson, 2006) ofrecen una muy amplia descripción de los consumos. Los valores del tren pendular de alta velocidad (que circula 200 km/h y que sería equivalente a un servicio convencional mejorado) son de 0,037 kWh/plaza.km (equivalente a 33,00 $gCO_2/v.km_{ort}$).

Para otros trenes que circulan a 200 km/h citan valores de 0,036 kWh/plaza.km (Signatur) o de 0,045 kWh/plaza.km (Fyoget) (que equivalen a 32,1 y 40,1 $gCO_2/p.km_{ort}$ respectivamente)

➢ Comparación global de los consumos

A fin de tener una idea global de las comparaciones mencionadas, en la figura de los rangos de valores verosímiles de las emisiones por viajero kilómetro ortodrómico según sistemas ferroviarios se han añadido datos del Observatorio del Ferrocarril en España (FFE, 2010) y de los estudios citados. Puede verse en la figura 52 cómo en todos los casos los datos encajan en los rangos propuestos, pero con sesgos curiosos; por ejemplo, en los trenes británicos los valores de los trenes eléctricos están en la parte alta de la banda, mientras que los diésel están en la parte baja de la banda.

Figura 52. **Comparación gráfica de los valores de emisiones por viajero kilómetro ortodrómico en diversos estudios con los rangos de valores verosímiles**



Fuente: Elaboración propia con datos de (FFE, 2010), (Kemp, 2007) y (Lukaszewicz & Andersson, 2006)

2.7. El efecto de la velocidad del ferrocarril en el consumo global de energía y emisiones en una ruta

2.7.1. La necesidad de realización del análisis global del consumo de energía y de las emisiones en una ruta

El efecto de la velocidad del ferrocarril en el consumo de energía y las emisiones que se produce en el conjunto de todos los modos de transporte en un corredor o en una ruta, se analizará (como se ha hecho con el consumo de energía y emisiones del ferrocarril) desde dos puntos de vista diferentes, aunque complementarios:

- Analizando el efecto del sistema de alta velocidad que, al implantarse en una ruta, produce muy notables cambios en el tráfico en ella.
- Analizando el efecto de un incremento de la velocidad del ferrocarril sobre una línea de alta velocidad existente. Como ya se expuso, el efecto directo de este aumento de velocidad es un aumento del consumo y emisiones del ferrocarril, pero los efectos en el conjunto del corredor deben analizarse desde el punto de vista de la incidencia del aumento de la velocidad en el trasvase de viajeros entre modos de transporte.

La construcción de una nueva infraestructura ferroviaria de alta velocidad (y la consiguiente implantación de los servicios de altas prestaciones asociados a ella) o el incremento de velocidad del tren sobre una línea existente produce una variación tanto en la cuantía del tráfico de un corredor (o de una ruta origen-destino) como en el reparto del tráfico preexistente entre los diversos modos de transporte que compiten en el corredor o en la ruta.

Ya se ha expuesto que la reducción del tiempo de viaje que permite la instauración de servicios de alta velocidad (sea sobre líneas nuevas, sea sobre líneas convencionales mejoradas) reduce el *coste generalizado* del servicio ferroviario. Por ello, a igualdad de precio, el aumento de la velocidad produce un importante aumento de viajeros:

- Unos proceden de otros modos de transporte, que ahora encuentran en el ferrocarril un menor *coste generalizado* gracias a la nueva velocidad.
- Otros son viajeros “nuevos” que anteriormente no viajaban (o lo hacían con menos frecuencia) porque la *desutilidad* del viaje (suma de los costes monetarios y del valor atribuido al tiempo empleado) era superior a la utilidad que obtenían. Al bajar el tiempo de viaje -y con él, la desutilidad-, aumenta el número anual de viajes realizados.

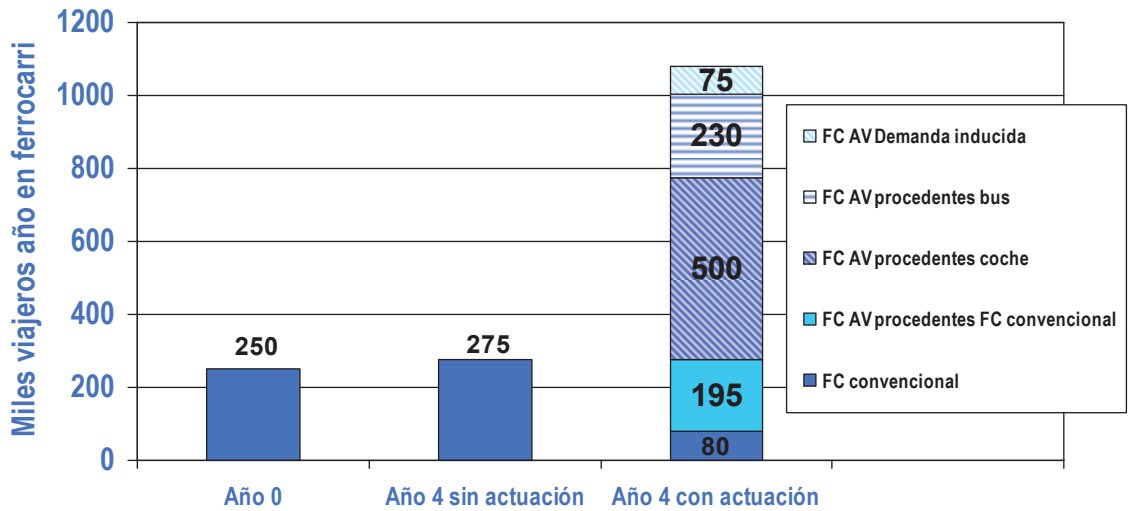
Por ello, la sustitución del ferrocarril convencional por un sistema de alta velocidad tiene efectos que van mucho más allá del trasvase de viajeros del tren convencional al de alta velocidad: la redistribución de viajeros entre los modos que compiten en el corredor tiene consecuencias de gran importancia sobre el tiempo de viaje, los costes de la operación, el consumo de energía y las emisiones. Estos efectos colaterales amplifican el efecto directo de la propia sustitución intramodal de un tren por otro.

Por ello, en los análisis coste-beneficio de las infraestructuras se sigue una metodología (ya expuesta) consistente en analizar en el conjunto de los modos de transporte presentes en el corredor los resultados de un escenario tendencial (es decir, el que se produciría si no se realizase ninguna actuación), con un escenario que contempla la realización de la actuación cuyos efectos se analizan. En el caso de la construcción de una nueva línea de alta velocidad se analiza el reparto modal y los consiguientes costes (incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero) si no se realizase la actuación y, por lo tanto, si el tráfico de cada modo de transporte siguiese la tendencia de años anteriores; y se compara con la nueva distribución del tráfico derivada de la aparición del tren de alta velocidad (tabla 52 y figura 53).

Tabla 52. **Ejemplo de comparación de tráfico y reparto modal con LAV**

Ruta OrigenDestino	Miles de viajeros al año en el ferrocarril			Procedencia de los viajeros captados por el ferrocarril en el año 4 con actuación							
				Vehículo privado		Bus		Ferrocarril convencional		Tráf. inducido	
	Escen. tenden-cial. Año 0	Escen. tenden-cial. Año 4 sin actuación	Año 4 con actuación Ferrocarril de alta velocidad / conven.	Miles de viajes	*% s/ Ferroc.*	Miles de viajes	*% s/ Ferroc.*	Miles de viajes	*% s/ Ferroc.*	Miles de viajes	*% s/ Ferroc.*
Ruta OD de B a C	250	275	1.000 / 80	500	*50,0*	230	*23,0*	195	*19,5*	75	*7,5*
Ruta OD de C a D	250	285	5.000 / 0	2.800	*56,0*	1.200	*24,0*	285	*5,7*	715	*14,3*
Ruta OD de D a E	0	0	150 / 0	110	*73,3*	25	*16,7*	0	*0,0*	15	*10,0*
TOTAL	**500**	**560**	**6.150 / 80**	**3.410**	***55,4***	**1.455**	***23,7***	**480**	***7,8***	**805**	***13,1***

Figura 53. **Representación de la variación del volumen del mercado y de la cuota de cada modo al introducir el tren de alta velocidad.**



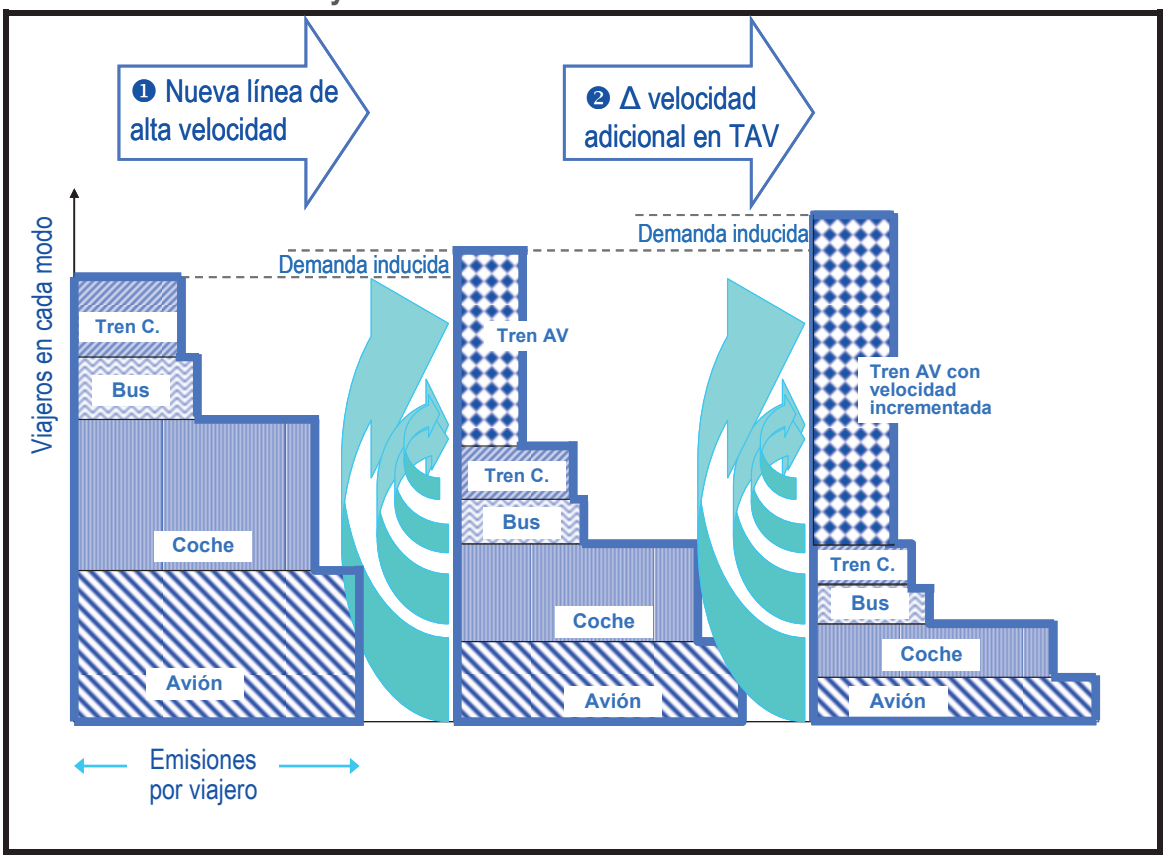
La introducción de una nueva infraestructura (en este caso una línea de alta velocidad) y los servicios sobre ella cambian el tamaño del mercado y la cuota de cada modo

Fuente: (Jaro Arias, 2011a). Se ha variado la nomenclatura para adaptarla a la empleada en la presente tesis.

Como cada modo de transporte tiene un diferente consumo de energía y produce unas emisiones distintas en la misma ruta, la redistribución del tráfico que produce la puesta en servicio de una línea de alta velocidad, o el incremento de velocidad en las líneas existentes, induce una variación del consumo de energía global y de las emisiones, en el conjunto de la ruta o del corredor. Esta variación puede ser positiva o negativa, y su signo y cuantía es precisamente el objeto de análisis en este apartado.

Para analizar el efecto del aumento de la velocidad, o de la implantación de un sistema de alta velocidad puro, o de la mejora del sistema convencional, es preciso conocer el consumo de energía y las emisiones del tren de alta velocidad comparado con otros modos de transporte en condiciones reales y homogéneas.

Figura 54. **Representación gráfica del efecto global en una ruta de la implantación de un sistema de alta velocidad y del aumento de la velocidad**



Las emisiones de gases de efecto invernadero (análogamente ocurre con el consumo de energía) se representan proporcionales a la superficie de los rectángulos cuya base son las emisiones por viajero en el modo de transporte en cuestión, y cuya altura representa el número de viajeros al año. Las emisiones globales en la ruta son la suma de las superficies de todos los rectángulos. Al aumentar la velocidad se trasvasan viajeros al tren de alta velocidad, lo que en general produce una reducción de las emisiones globales debida al trasvase de tráfico, aunque aumenten las emisiones por cada viajero del tren de alta velocidad con velocidad incrementada.

Fuente: Elaboración propia

Conociendo las transferencias de tráfico, y considerando el diferencial (positivo o negativo) de energía y emisiones del tren con la velocidad incrementada con respecto a cada uno de los modos de transporte alternativos (incluso con el tren sin mejorar la velocidad), se obtiene el impacto que incremento de velocidad tiene en el consumo de energía o en las emisiones en la ruta o corredor (figura 54).

La nueva demanda inducida por la alta velocidad siempre implica un aumento del consumo y de las emisiones con respeto a la situación de referencia (ya que estos viajeros no se desplazarían si no hubiera alta velocidad), y este aumento debe sumarse a la variación (generalmente negativa) debida a las trasferencia modales:

$$\Delta Emisiones = \sum_i (E_{TAV} - E_i) \times Viajeros_{i \to AV} + E_{TAV} \times Viajerosnuevos \quad [78]$$

Para el análisis de las variaciones del consumo de energía y de las emisiones en una ruta tras la mejora de la velocidad del ferrocarril o tras la introducción de la alta velocidad ferroviaria, es preciso por lo tanto; a) conocer los datos de consumo y emisiones por viajero en cada uno de los modos de transporte; y b) conocer las variaciones del reparto modal y la cuantificación de la demanda inducida al aparecer la nueva oferta.

2.7.2. Comparación del consumo y las emisiones según modos de transporte

Para analizar los efectos del incremento de la velocidad es preciso conocer el consumo de energía y las emisiones en cada uno de los modos de transporte presentes en el caso, incluido el tren con la velocidad convencional y el tren con la velocidad mejorada.

Como indicador emplearemos las emisiones de gases de efecto invernadero por cada viajero trasportado en la ruta origen destino.

➢ Metodología de cálculo de las emisiones por viajero en una ruta en cada modo de transporte

Para que la comparación sea homogénea se emplea la metodología y datos del proyecto EnerTrans. Véase, por ejemplo (Grupo de Investigación del Proyecto Enertrans, 2010)

Las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a un viajero que se desplaza entre los puntos *A* y B en un modo de transporte i se pueden representar como:

$$Emisiones_{ABi} = \frac{Energ./km_{ABi}[kWh/km_{ABi}]}{Plazas_i[p] \times Aprov._i[v.km/p.km]} \times CT_{ABi}\left[\frac{km_{ABi}}{km_{ort\,AB}}\right] \times Dist_{AB} \times FEi[kgCO_2/kWh_i]] \quad [79]$$

Sobre la expresión anterior, pueden hacerse las siguientes observaciones:

- El consumo de energía por vehículo.kilómetro ($Energ./km_{ABi}$), las plazas (p_i) y el aprovechamiento ($Aprov._i$) dependen la tecnología de cada modo de transporte y de factores logísticos. En los análisis pueden emplearse: o bien los datos propios de la ruta (con el vehículo realmente utilizado); o bien datos genéricos por defecto si se desconocen los datos del caso concreto.
- Puede sumarse, cuando sea relevante, el consumo adicional necesario para el acceso a los aeropuertos o terminales.
- La distancia ortodrómica entre A y B ($Dist_{AB}$) es común para todos los modos de transporte en la ruta. El coeficiente de trayectoria (CT_{Abi}) es diferente en una ruta para cada modo de transporte, y suele ser distinto en la misma ruta para el ferrocarril de alta velocidad y para el ferrocarril convencional.
- Los factores de emisiones (FE_i) son fijos para cada combustible en el caso de los modos de transporte que emplean motores térmicos (gasóleo, gasolina o

queroseno), pero es variable (de año en año y de país en país) para el ferrocarril eléctrico.

Peculiaridades de los modos de transporte.- Sobre las variables que intervienen en la fórmula para el cálculo de las emisiones por cada viajero en una ruta, deben tenerse en cuenta algunas peculiaridades propias de cada modo de transporte:

- Mientras que en el caso del avión, el autobús y el coche el consumo de energía por plaza.kilómetro es relativamente estable, en el caso del ferrocarril (tanto convencional como de alta velocidad) presenta variaciones muy importantes según el vehículo, tipo de tracción, características del servicio y de la infraestructura.
- Los *coeficientes de trayectoria* son diferentes para cada modo de transporte en la misma ruta; y para distancias medias y largas son relativamente independientes de la distancia con la excepción del avión. El mayor *coeficiente de trayectoria* es el normalmente el del ferrocarril convencional; seguido del coeficiente de trayectoria del tren de alta velocidad y del de la carretera (muy similares entre si). El avión lógicamente presenta los menores coeficientes de trayectoria, si bien se observa una cierta correlación con la distancia volada (a más distancia, menor *coeficiente de trayectoria*). Además, en el caso del avión suele ser relevantes las emisiones que se producen en el transporte del viajero desde el centro de la ciudad hasta el aeropuerto (que en el caso español, y en viajes de más de 300 kilómetros, es despreciable en tren, autobús y coche).
- El consumo de energía y las emisiones del avión, del autobús y del coche son independientes de la velocidad del tren, pero el consumo de energía del ferrocarril tiende a crecer ligeramente al aumentar la velocidad (a igualdad de todos los demás factores).

A la vista de estas reflexiones, la ecuación que permite el cálculo de las emisiones en una ruta desde un punto A hasta otro punto B puede particularizarse para cada modo de transporte según se indica seguidamente:

Para el ferrocarril de alta velocidad:

$$Emis._{ABFCAV} = \frac{Energia/km_{ABFCAV}\left[f(V_{FCAV})\right]}{Plazas_{FCAV}} \times \frac{1}{Aprov_{FCAV}} \times CT_{ABFCAV} \times Dist_{AB} \times FE_{elecricdad} \quad [80]$$

Para el ferrocarril convencional eléctrico:

$$Emis._{ABFCCONV} = \frac{Energía/km_{ABFCCONV}\left[NOf(V_{FCAV})\right]}{Plazas_{FCCONV}} \times \frac{1}{Aprov_{FCCONV}} \times CT_{ABFCONV} \times Dist_{AB} \times FE_{electricidad} \quad [81]$$

Para el autobús:

$$Emis._{ABBUS} = \frac{Energia/km_{ABBUS}\left[NOf(V_{FCAV})\right]}{Plazas_{BUS}} \times \frac{1}{Aprov._{BUS}} \times CT_{ABBUS} \times Dist_{AB} \times FE_{gasóleo} \quad [82]$$

Para el coche:

$$Emis._{ABCOCHE} = \frac{Energia/km_{ABCOCHE}\left[NOf(V_{FCAV})\right]}{Plazas_{COCHE} \times Aprov._{COCHE}} \times \frac{1}{Aprov_{COCHE}} \times CT_{ABCOCHE} \times Dist_{AB} \times FE_{gasoleoogasolina} \quad [83]$$

Para el avión:

$$Emis._{ABAVION} = [\frac{Energia/km_{ABAVION}\left[F(Dist_{AB}), NOf(V_{FCAV})\right]}{Plazas_{AVION}} \times \frac{1}{Aprov._{AVION}} \times CT_{ABAVION} f(Dist._{AB}) \times Dist_{AB}] \times FE_{queroseno} + K_{acceso}$$

[84]

➢ Valores verosímiles de las variables que intervienen en el cálculo de las emisiones por viajero en una ruta en cada modo de transporte

Para disponer de los rangos de resultados verosímiles de emisiones de diversos modos de transporte en una ruta, se recopilan los valores representativos y extremos (entendiendo por tales el más favorable y el más desfavorable entre los verosímiles) que pueden adoptar las variables en las fórmulas anteriores (tabla 54). Con estos valores de las variables se podrá calcular posteriormente los rangos de variación de los resultados.

Para mayor simplicidad expositiva, se ha supuesto una distancia volada de 450 kilómetros para el avión (que encaja bien con la existente en las principales rutas radiales españolas en las que coexiste con el AVE); y para el ferrocarril se han supuesto los valores de velocidad empleados anteriormente para el cálculo de su propio consumo de energía y emisiones.

También se ha partido del consumo por plaza kilómetro, suponiendo que se ha multiplicado el consumo por unidad de oferta (kilómetro y metro cuadrado de superficie útil bruta) por el factor de densidad de plazas:

$$\frac{Energía/km_{ABi}}{Plazas_i} = \frac{Energía/km_{ABi}}{Suputil_i} / \frac{Plazas_i}{Suputil_i} \qquad [85]$$

El enfoque adoptado para resolver la cuestión es emplear valores (representativos o extremos) procedentes de diversos estudios publicados o de resultados homologados u obtenidos de ciertos casos considerados, sin que necesariamente ninguna combinación de ellos tenga que presentarse en una ruta concreta. Los resultados de esta aproximación aparecen en la tabla 53.

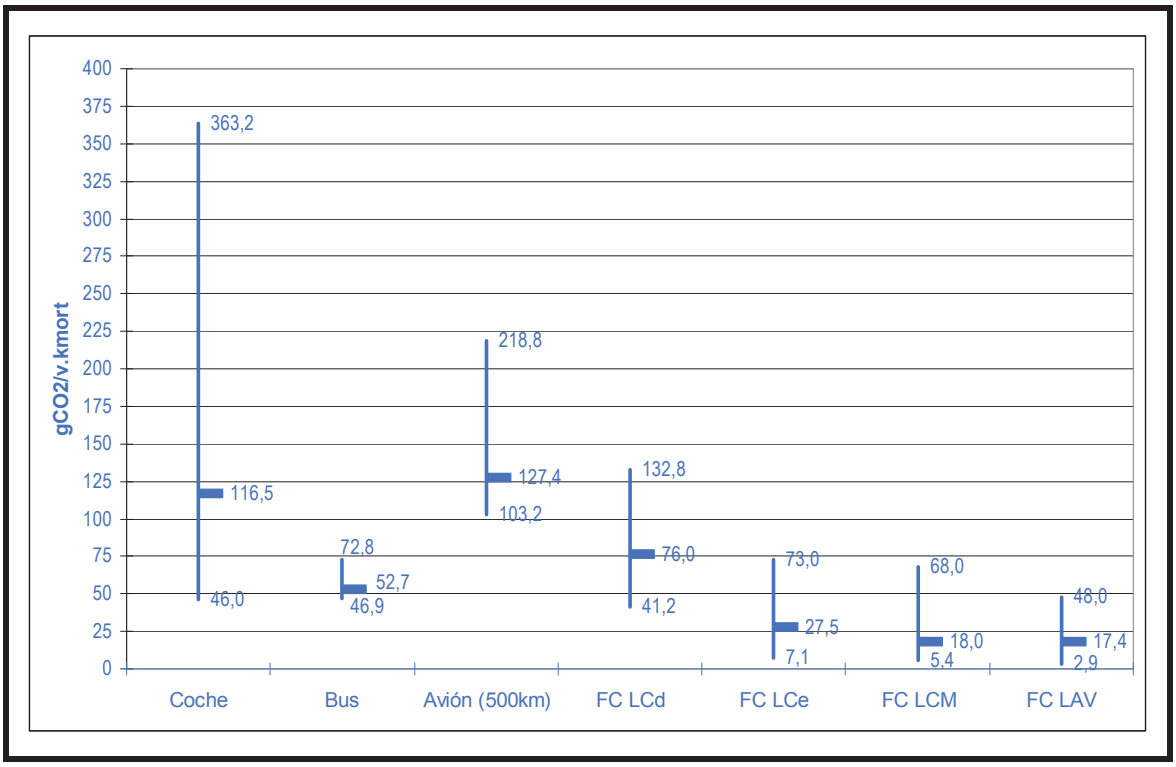
Tabla 53. **Valores más representativos y extremos de las variables que intervienen en la función de emisiones de cada modo de transporte**

	Ud.	Coche	Bus	Avión (500km)	FC LCd	FC LCe	FC LCM	FC LAV
Energía +Desfav.	*kWh/p.km*	0,196	0,125	0,340	0,122	0,042	0,073	0,053
Energía Represent.	*kWh/p.km*	0,123	0,077	0,271	0,107	0,034	0,029	0,029
Energía +Favorable	*kWh/p.km*	0,102	0,052	0,260	0,083	0,021	0,018	0,010
Aprovech. +Desfav.	*vkm/pkm*	0,2	0,35	0,60	0,465	0,415	0,619	0,595
Aprovech. Represent.	*vkm/pkm*	0,35	0,52	0,75	0,540	0,524	0,626	0,604
Aprovech. +Favorable	*vkm/pkm*	0,70	0,65	0,85	0,615	0,572	0,639	0,616
C.Trayec. +Desfav.	*km/km*ort	1,42	1,45	1,27	1,94	1,94	1,55	1,45
C.Trayec. Represent.	*km/km*ort	1,27	1,31	1,16	1,47	1,47	1,35	1,26
C.Trayec. +Favorable	*km/km*ort	1,21	1,21	1,11	11,7	1,17	1,16	1,08
F.emision. +Desfav.	gCO_2/kWh	261	261	304	261	372	372	372
F.emision. Represent.	gCO_2/kWh	261	261	304	261	288	288	288
F.emision. +Favorable	gCO_2/kWh	261	261	304	261	166	166	166

Fuente: Elaboración propia

Aplicando los valores indicados a las fórmulas expuestas, se obtienen los rangos reflejados en la figura 55.

Figura 55. **Representación del rango de emisiones por modos de transporte para una misma ruta**



Fuente: Elaboración propia

➢ Análisis del estudio sobre casos concretos

Con el objeto de validar el modelo analítico de asignación de emisiones por modo de transporte en una ruta, se analizará un estudio publicado (García Álvarez & Martín Cañizares, 2007) ampliado en (García Álvarez, 2007) con casos tomados de la realidad. Se trata de comprobar si sus resultados (debidamente homogeneizados cuando sea posible) se encuentran dentro de los rangos de los valores indicados como verosímiles.

El análisis comparativo incluido en el citado estudio sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de los modos de transporte que operan en diez rutas españolas en las que existe línea de alta velocidad confirma la variabilidad de los resultados de las emisiones de los diversos modos de transporte alternativos que puede dar lugar a numerosos y divergentes resultados dependiendo de los valores que se utilicen para índice de ocupación de los vehículos (aprovechamiento); factor de emisiones; rendimientos y pérdidas del sistema de generación, transporte y conversión de la electricidad; características de los servicios (velocidades y paradas, etc.)

La principal aportación de este trabajo (y su utilidad para nuestro análisis) es precisamente que emplea la combinación de los datos concretos del tipo de vehículo utilizado en cada ruta, las distancias realmente existentes entre las terminales y los aprovechamientos reales de esa ruta. En el caso del ferrocarril, en aquellas rutas en las que la aparición de la alta velocidad ha supuesto la desaparición de la oferta de tren convencional, se calcularon las emisiones del tren convencional con las características del vehículo, línea y servicios existentes inmediatamente antes de la entrada en servicio de la alta velocidad. El estudio, por ello, provee resultados

basados en combinaciones de datos de origen tomados de la realidad, y que no son ni los definidos como representativos, ni los más desfavorables, ni los más favorables.

Se han introducido algunas modificaciones en los datos de entrada empleados en el citado estudio a fin de conseguir los resultados más homogéneos con el modelo planteado en esta tesis y con sus parámetros.

- Se ha cambiado el factor de emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de electricidad, pues en (García Álvarez, 2007) se empleaba el valor de 337 gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora (correspondiente al año 2007) y se ha sustituido por el de 288 gramos de dióxido de carbono por kilovatio hora, que es el que se emplea como valor de referencia en los cálculos de esta tesis.
- Se han sustituido los rendimientos equivalentes correspondientes a las pérdidas entre la central generadora de electricidad y el pantógrafo para adaptarlos a los valores más actualizados aportados por (Pilo de la Fuente, E. et al., 2009). En concreto, los rendimientos equivalentes utilizados (0,8114 para electrificaciones en corriente continua a 3 kilovoltios, y de 0,9121 para las de corriente alterna a 25 kilovoltios) se han sustituido por rendimientos de 0,8929 para la electrificación D.C. en 3 kV, de 0,9443 para electrificación A.C. en sistema 1 x 25 kV, y de 0,9661 para el sistema de 2 x 25 kV.
- Se ha figurado el aprovechamiento real en 2009 de los servicios ferroviarios tomados de (FFE, 2010), pues los aprovechamientos empleados en el estudio correspondían a datos de mayor antigüedad o (como en el caso de Madrid a Barcelona) a datos previstos antes de la implantación del servicio, habiendo resultado en la realidad algo menores de los previstos con anterioridad.

Tabla 54. **Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero del tren de alta velocidad en comparación con otros modos en España.**

		Emisiones por viajero con aprovechamiento medio ($kgCO_2$/viajero)					*Proporción de emisiones con respecto al tren de alta velocidad (TAV=1)*			
	km ortod.	Coche	Bus	Avión	Tren conv.	TAV	*Coche*	*Bus*	*Avión*	*Tren conv.*
Madrid Barcelona	*486*	63,05	14,51	70,89	14,26	13,33	*4,73*	*1,09*	*5,32*	*1,07*
Madrid Málaga	*417*	55,11	13,50	61,16	9,64	8,45	*6,52*	*1,60*	*7,23*	*1,14*
Madrid Sevilla	*396*	54,10	13,87	61,36	10,45	8,51	*6,36*	*1,63*	*7,21*	*1,23*
Madrid-Alicante	*359*	43,97	11,95	58,60	7,79	10,97	*4,01*	*1,09*	*5,34*	*0,71*
Madrid-Murcia	*349*	41,00	10,43	68,09	14,90	7,65	*5,31*	*1,36*	*8,90*	*1,95*
Madrid-Valencia	*302*	36,33	10,05	63,10	6,92	8,22	*4,42*	*1,22*	*7,67*	*0,84*
Madrid-Albacete	*224*	27,24	7,30		31,9	4,35	*6,26*	*1,68*		*0,73*
Madrid Valladolid	*162*	14,19	5,82		4,88	3,39	*4,19*	*1,72*		*1,44*
Madrid-Cuenca	*139*	11,11	4,60		13,20	3,13	*3,56*	*1,47*		*4,22*
Madrid Toledo	*70*	5,82	1,96		1,54	1,11	*5,27*	*1,78*		*1,40*
Media		113,0	32,3	101,5	37,9	26,7	*4,47*	*1,20*	*5,10*	*1,29*

(gCO_2/vkmrecta)		

Fuente:(García Álvarez, 2007), homogenizado y actualizado

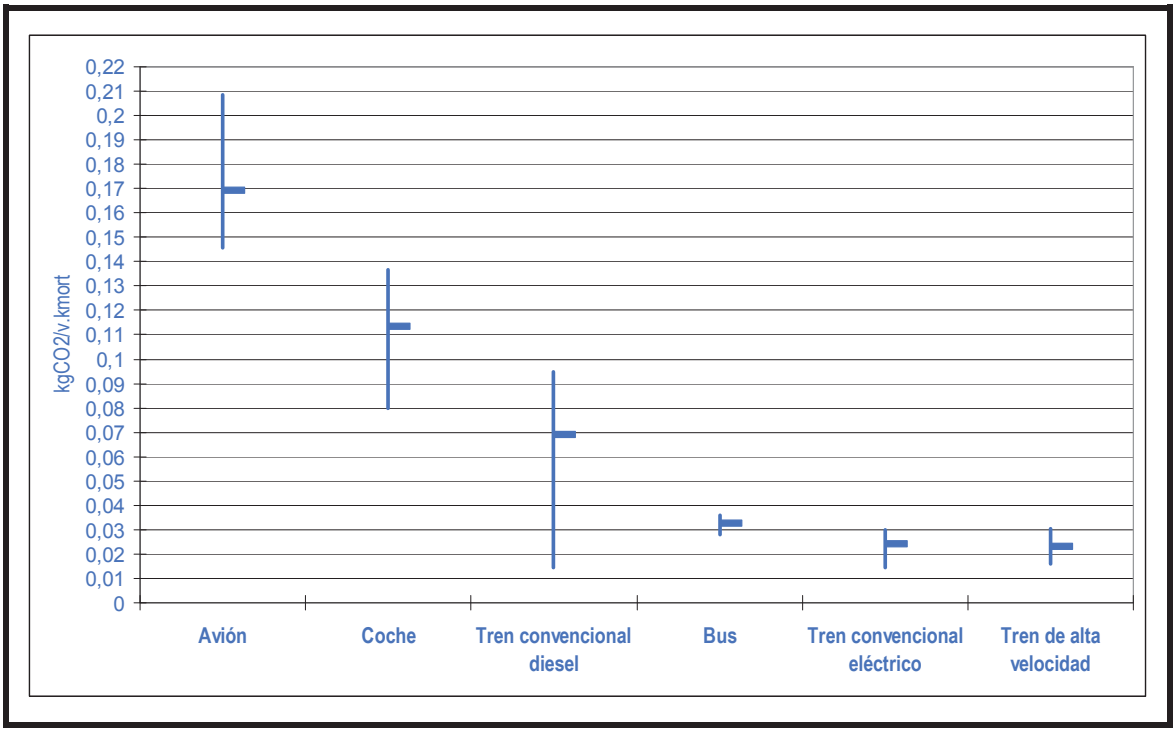
Las emisiones de gases de efecto invernadero ($kgCO_2$), para cada modo de transporte y para cada ruta, son los recogidos en la tabla 54, tanto en valores absolutos (por viajero.kilómetro medido en línea ortodrómica) como relativos con respecto a las emisiones del tren de alta velocidad.

De estos resultados pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- En siete de las diez rutas analizadas el tren de alta velocidad es el modo de transporte que menos emisiones produce. En las otras tres rutas el más eficiente es el tren convencional.
- Por término medio, el tren convencional produce un 29% por ciento más de emisiones en la misma ruta que el tren de alta velocidad. Cuando el tren convencional al que sustituye es un tren diesel, éste emite 3,1 veces más que el de alta velocidad; pero cuando es eléctrico, el convencional solo emite un 6,5 por ciento más que el de alta velocidad.
- El autobús emite en todas las rutas más que el tren de alta velocidad, pero las diferencias no son muy acusadas: en promedio emite un 20 por ciento más. Cuando se compara con el tren diésel, el autobús siempre produce menos emisiones.
- El coche (con 1,8 personas por automóvil) emite en promedio 4,47 veces más que tren de alta velocidad; y el avión 5,1 veces más.

En la figura 56 se representa el rango de variación de cada uno de los modos de transporte en el conjunto de las rutas sometidas estudio.

Figura 56. **Rangos de variación y valores medios de las emisiones de los diferentes modos de transporte en diez rutas españolas**



Fuente: Elaboración propia sobre datos de (García Álvarez, 2007) y (García Álvarez & Martín Cañizares, 2008).

Estos resultados confirman que cualquier transferencia de tráfico hacia el tren de alta velocidad reduce las emisiones globales en el corredor (considerando todos los modos de transporte). El efecto en la reducción de emisiones de la transferencia modal es, sin embargo, reducido cuando el modo de origen de los viajeros es el tren convencional eléctrico o el autobús; pero la reducción de emisiones es importante si el modo de origen del viajero es el tren convencional diésel, y es mayor aún (y muy relevante) si es el coche o el avión.

Comparación con los resultados de Ecopassenger

Al objeto de validar los resultados con otros trabajos externos comprables, se ha utilizado el calculador de emisiones para servicios de viajeros Ecopassenger (cuya metodología está explicada en If(Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, 2010).

Se ha realizado una corrección en las emisiones de gases de efecto invernadero, suponiendo que los datos de Ecopassenger (obtenidos en mayo de 2011) se han calculado utilizando el factor de emisiones del sistema peninsular ibérico de generación de electricidad de 2011 (es decir, 166 gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora). En su lugar se ha aplicado el factor de 288 gramos de dióxido de carbono por kilovatio.hora que es el utilizado como valor de referencia en este trabajo.

Los resultados de la comparación de las rutas estudiadas en (García Álvarez & Martín Cañizares, 2008) aparecen en la tabla 55.

Tabla 55. **Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero del tren de alta velocidad en comparación con otros modos en España.**

	Coche		Avión		TAV	
	Estudio de referencia	EcoPass.	Estudio de referencia	EcoPass.	Estudio de referencia	EcoPass.
Madrid- Barcelona	63,05	68,5	70,89	94,5	13,33	13,66
Madrid- Málaga	55,11	58,7	61,16	84,9	8,45	11,07
Madrid- Sevilla	54,10	58,7	61,36	79,1	8,51	10,72
Madrid-Alicante	43,97	46,4	58,60	77,5	10,97	13,32
Madrid-Murcia	41,00	44,5	68,09	78,0	7,65	----
Madrid-Valencia	36,33	44,9	63,10	66,3	8,22	7,44
Madrid-Albacete	27,24	28,7			4,35	5,52
Madrid-Valladolid	14,19	18,6			3,39	4,92
Madrid-Cuenca	11,11	15,3			3,13	4,62
Madrid-Toledo	5,82	8,2			1,11	1,33

Fuente: Elaboración propia con datos de www.ecopassenger.com

Puede observase que las emisiones ofrecidas por el calculador para el coche están en el orden de magnitud del estudio, pero aparecen siempre con valores superiores, entre el 5 y el 82 por ciento. Igual ocurre con las emisiones que atribuye al avión, con tendencia a estar sobrevalorados (entre el 5 y el 38 por ciento), y con las del tren.

2.7.3. Efecto en la cuota de mercado y en la demanda inducida de la introducción de la alta velocidad en una ruta

La aparición de la alta velocidad produce invariablemente fuertes cambios en la distribución modal del tráfico y en el tamaño del mercado en todas las rutas en los que se implanta.

En concreto, el tren de alta velocidad, allí donde pasa a coexistir con los otros modos de transporte, capta viajeros del avión, del coche particular, del autobús y del tren convencional (tanto si éste sigue existiendo como si es sustituido por el de alta velocidad).

Además, la nueva oferta supone un "coste generalizado"[21] más reducido lo que hace que, en virtud de la ley de demanda, aumente el número de viajeros. Es decir, el tren de alta velocidad ofrece una combinación de entre tiempo y coste económico que hace que la desutilidad sea más baja que la de todos los modos de transporte preexistentes para ciertos segmentos del mercado. Por ello, en estos segmentos se inducen viajes que antes no existían.

De esta forma, el balance energético (y de emisiones) de la puesta en marcha del AVE (tren de alta velocidad) en una ruta debe tener en cuenta todas las transferencias de viajeros de un modo de transporte a otro, multiplicando el número de viajeros que pasan de un modo a otro por la diferencia de emisiones entre los modos. Además, se debe añadir el incremento de consumo de energía y las emisiones del tren de alta velocidad imputable al aumento de la demanda global en la ruta; es decir, a la demanda que se induce.

Resulta difícil de conocer *a priori* las tasas de cambio modal y la demanda inducida, ya que hay muchos tipos de casos diferentes: dependiendo de la longitud la ruta; de que haya o no haya oferta aérea y de sus características; de la oferta de carretera; de los precios absolutos y relativos; y, en fin, de las características de la propia oferta de alta velocidad. Sin embargo, también parece posible disponer de unos patrones que permitan realizar una aproximación genérica a cada tipo de caso, lo que no exime de la necesidad de investigar los datos de cada caso concreto[22].

➢ Casos de larga distancia en competición con el avión

Dada la diversidad de casos, se analizará como muestra uno de ellos (el de la ruta de Madrid a Sevilla) y se expondrán las conclusiones más relevantes de los estudios relativos a otras rutas. Para una mayor información y el análisis de otros casos se remite al lector a los trabajos anteriores publicados sobre el tema como (García Álvarez & Martín Cañizares, 2008)

La ruta de Madrid a Sevilla.- Entre Madrid y Sevilla (470,5 kilómetros) se transportaron en 2005 un total de 2,521 millones de viajeros en ambos sentidos en trenes de alta velocidad con un tiempo de viaje medio de 2 horas y 28 minutos (velocidad media de 190,7 kilómetros por hora).

En las encuestas realizadas a los viajeros en los primeros años de funcionamiento del AVE se incluía una pregunta del siguiente tenor: "Si no hubiera existido el AVE, qué modo de transporte hubiera escogido para este viaje?". Se ofrecían como respuestas posibles: "tren convencional", "avión", "coche", "autobús" o "no hubiera realizado el viaje".

Los resultados de esta pregunta muestran las siguientes respuestas: el 13% de los viajeros del AVE habrían viajado en tren convencional; el 26%, en avión; el 24% en

---

[21] Recordemos que "coste generalizado" es la desutilidad total percibida por el viajero, e incluye tanto los costes monetarios -fundamentalmente el billete- como el coste del tiempo aportado por el propio viajero (que es, a su vez, el producto del valor del tiempo propio de cada viajero -€/h- por tiempo empleado en la totalidad de las etapas del viaje).

[22] Una interesante línea de investigaron sería profundizar en la cuota de mercado total y de la demanda inducida por el tren de alta velocidad en función de su propia velocidad y de otras variables, para poder modelar mejor el efecto de la alta velocidad en una ruta. En tanto en cuanto se disponga de ese modelo, es posible extraer consecuencias del análisis de un número finito de casos, modelando únicamente la transferencia del avión.

coche particular; el 3% en autobús; y el 34% de los viajeros del AVE no habría viajado (este último grupo es que integra la llamada "demanda inducida").

En la tabla 56 se incluyen los resultados de la variación de las emisiones de dióxido de carbono en esta ruta en el caso de que no existiera el AVE. Para ello, los 2,52 millones de viajeros del AVE en 2005 se "reparten" entre el resto de los modos de transporte (o se supone que no viajarían) según los porcentajes deducidos de la encuesta. En la transferencia de cada modo hacia el AVE hay una diferencia de emisiones, siempre con mayores emisiones en el caso de que no existiera la línea de alta velocidad (LAV), excepto en el caso de la demanda inducida que no produciría emisiones si no existiera el AVE. Debe observarse que en el análisis solo se incluyen los 2,52 millones de viajeros susceptibles de cambiar de modo, no todos los viajeros en la ruta. Para el resto de los viajeros no hay cambio de modo (y por ello, tampoco de emisiones), por lo que no aparecen en este análisis diferencial.

Tabla 56. **Diferencia de emisiones de dióxido de carbono en la ruta de Madrid a Sevilla con y sin alta velocidad**

	Emisiones por viajero	Dif. por viajero s/LAV	Escenario sin LAV		Escenario con LAV	
			Viajeros en el AVE	Emisiones	Viajeros que pasarían al AVE	Emisiones
	$kgCO_2$/ v	*$kgCO_2$/ v*	*Mviajeros año*	*$MkgCO_2$*	*Mviajeros al año*	*$MkgCO_2$*
FC LAV	*8,51*	*0,00*	2,521	21,45	0,000	0,00
FC LC eléctrica	*10,45*	*1,94*	0	0	0,328	3,43
Avión	*61,36*	*52,85*	0	0	0,655	40,19
Coche	*54,10*	*45,59*	0	0	0,605	32,73
Autobús	*13,87*	*5,36*	0	0	0,076	1,05
No viajarían	*0*	*-8,45*	0	0	0,057	0,00
Total			**2,521**	**21,45**	**2,521**	**77,4**
Emisiones evitadas con LAV				77,4 - 21,45 = **55,95 $MkgCO_2$**		

Datos de tráfico de 2005. Únicamente se incluyen los viajeros que cambian de modo de transporte

Elaboración propia con datos de (García Álvarez & Martín Cañizares, 2008)

Puede observase que el transporte los 2,5 millones de viajeros que utilizan el AVE supone unas emisiones de 21,45 millones de kilogramos anuales de dióxido de carbono; pero si no existiera la línea de alta velocidad las emisiones serían 77,4 $MkgCO_2$, lo que supone que estas emisiones se han reducido en un 72,3 por ciento. Cada viajero del AVE evita, por término medio, la emisión de 22,2 kilogramos de dióxido de carbono.

Es preciso llamar la atención sobre el hecho de que el porcentaje de viajeros que viajarían en el tren convencional en ausencia de AVE es tan bajo (únicamente el 13% de los viajeros que emplean el AVE viajarían en el tren convencional) y el diferencial de emisiones por viajero es tan pequeño, que la reducción de emisiones debida al menor consumo del AVE frente al tren convencional es insignificante (3,43 $MkgCO_2$ de los 55,95 $MkgCO_2$ de reducción total). Ello muestra que la principal ventaja del AVE no es que consume menos energía y emite menos gases de efecto invernadero que el tren convencional. La principal ventaja es que, gracias a la velocidad, es capaz de

captar viajeros en un elevado porcentaje del avión y del coche particular que son los modos que aportan la mayor parte de los viajeros del AVE y que tienen un mayor diferencial de consumo y de emisiones por viajero.

De hecho, con los datos de la tabla se puede comprobar fácilmente que si el AVE, en vez de emitir un 18,5 por ciento menos por viajero que el tren convencional (8,51 $kgCO_2$ por viajero frente a 10,45 $kgCO_2$ por viajero), emitiera un 18,5 por ciento más (12,38 $kgCO_2$ por viajero), la existencia del tren de alta velocidad aún supondría una reducción de 52,16 $MkgCO_2$ anuales en la ruta (casi la misma cantidad que en el caso anterior), lo que confirma que la parte fundamental de la reducción de las emisiones del tren de alta velocidad no procede de su menor consumo frente al tren convencional, sino frente a otros modos de transporte.

Rutas con mayor presencia del avión.- De análisis de la ruta de Madrid a Barcelona, puede deducirse que en una ruta con una fuerte implantación del avión, el tren de alta velocidad capta más viajeros del avión (en números absolutos) aunque la demanda inducida es menor (baja al 10%). El efecto neto es que la reducción de las emisiones (y por tanto del consumo) aún mayor que en una ruta como la de Madrid a Sevilla. El caso de la ruta de Madrid a Barcelona puede considerarse excepcional por el gran peso del avión (antes, e incluso después, de la implantación del AVE).

Rutas con menor velocidad del tren. En las rutas de Madrid a Sevilla y de Madrid a Barcelona el AVE tiene velocidades máximas del orden de 300 kilómetros por hora y medias por encima de los 200 kilómetros por hora, lo que permite cubrir distancias de hasta 500 kilómetros en dos horas y media Sin embargo, en otros casos (por ejemplo en las líneas convencionales mejoradas o en servicios que emplean la alta velocidad en una parte del recorrido) las velocidades medias conseguidas son menores, y llevan a tiempos de viaje del orden de más de tres horas y media para los 500 kilómetros. En estos casos, el efecto de la velocidad en la distribución del tráfico en el corredor es diferente, y por ello también lo es el balance de emisiones

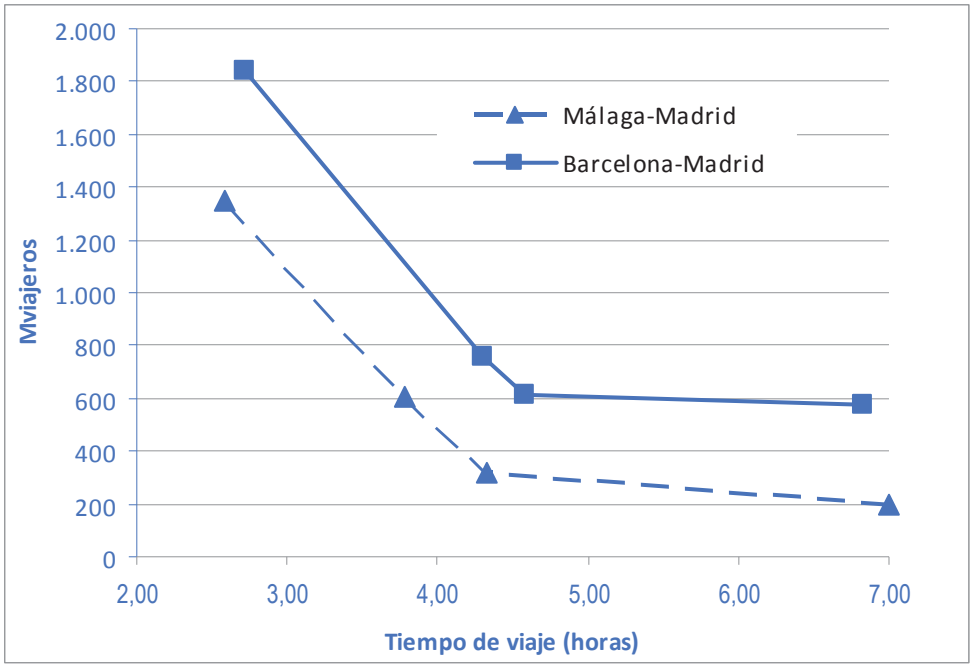
Como ejemplo representativo de estos casos puede tomarse la ruta de Madrid a Málaga en dos escenarios sucesivos: hasta 2006, cuando los trenes Talgo 200 ofrecían (al circular hasta Córdoba por la línea de alta velocidad) un tiempo de viaje de 4 horas y 20 minutos frente a la siete horas anteriores; y desde 2008, cuando ya con la línea de alta velocidad completa, consiguen viajar en 2 horas y 35 minutos. Igual ocurrió en la ruta de Barcelona a Madrid: la reducción de casi siete horas a cuatro y media apenas produjo incremento de viajeros, pero el posterior paso a algo menos de tres hizo que el tráfico se duplicase (tabla 57 y figura 57).

Puede observarse en (García Álvarez & Martín Cañizares, 2008) que con el tren Talgo 200 cuyas prestaciones equivalen a las de una línea convencional mejorada, los ahorros globales en la ruta son de 11 millones de toneladas al año (19,7 $kgCO_2$ por viajero del Talgo 200), pero con el tren de alta velocidad se consigue reducir las emisiones en 48 millones de toneladas de CO_2 (33 $kgCO_2$ por viajero del AVE).

Tabla 57. **Evolución de la demanda Málaga-Madrid y Barcelona-Madrid al cambiar el tiempo de viaje**

Málaga-Madrid			Barcelona-Madrid		
Año	Viajeros (miles)	Tiempo de viaje (h)	Año	Viajeros (miles)	Tiempo de viaje (h)
1990	200	7,00	1990	578	6,83
1996	321	4,33	2004	617	4,58
2007	606	3,78	2007	757	4,30
2009	1348	2,58	2008	1841	2,72

Figura 57. **Representación gráfica de la evolución de la demanda Málaga Madrid y Barcelona Madrid al cambiar el tiempo de viaje**



Puede observarse cómo cuando el tiempo de viaje esta por encima de las tres horas, importantes reducciones del tiempo de viaje producen modestos aumentos de la demanda, pero por debajo de 3 horas la elasticidad es muy grande.

Fuente: (Martín Cañizares, 2011)

➢ Casos de media distancia sin competencia con el avión

Otro caso distinto es el de las rutas de media distancia (75 a 300 km) con oferta ferroviaria en alta velocidad[23]. En ellas, los trenes consiguen velocidades medias algo inferiores a las de los servicios larga distancia; y por, otra parte, no hay oferta aérea en la ruta. En estos casos, tampoco hay estudios definitivos sobre el origen de los viajeros, pero algunos datos indiciarios del volumen del mercado y de reparto modal, combinados con las emisiones específicas calculadas anteriormente, permiten

[23] En España el producto comercial de los trenes de media distancia y alta velocidad se denominaba *Lanzadera* hasta 2005, y desde entonces se denomina *Avant*.

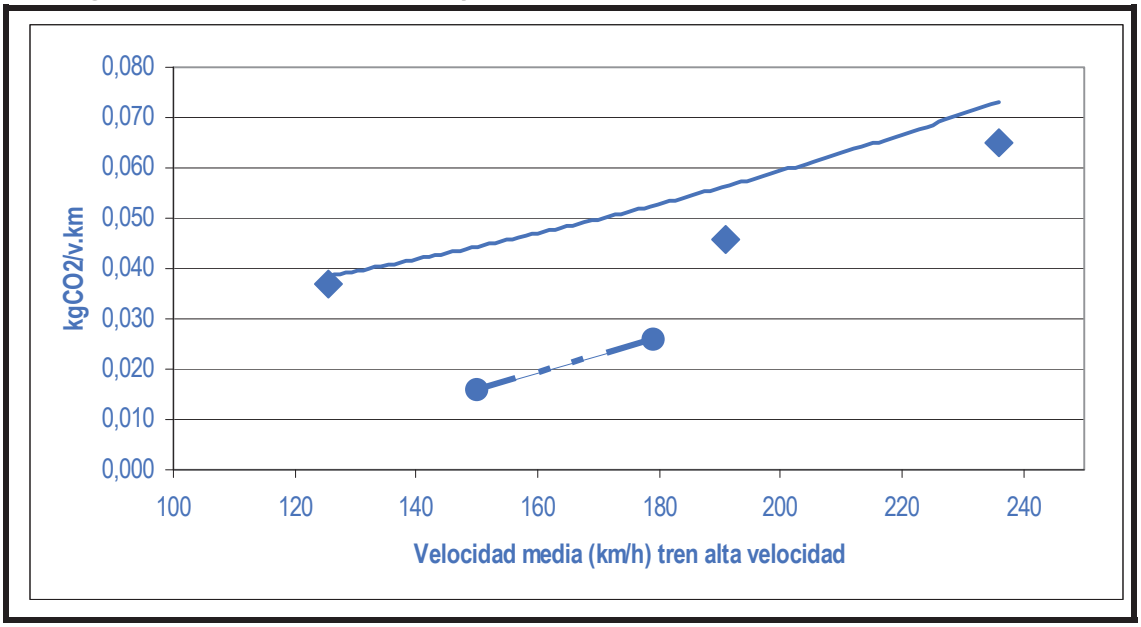
suponer los resultados que se producirán en dos tipos de distancias: los casos de Madrid a Toledo (75 km) y de Madrid a Valladolid (179 km). En ambos casos, al no contar con la aportación del avión, la reducción de emisiones por cada viajero del tren de alta velocidad Avant son menores que en las rutas de larga distancia. Sin embargo, al producirse una muy importante captación de viajeros de coche particular (especialmente en distancias más largas como la de Madrid a Valladolid) el porcentaje absoluto de reducción de las emisiones es muy importante.

Resumen de la comparación de las emisiones evitadas por cada viajero trasvasado al tren de alta velocidad.- Del análisis de los casos anteriores puede obtenerse una comparación de las emisiones evitadas en cada uno de ellos. En la tabla 58 se han figurado y en la figura 58 se representan estas emisiones evitadas por el AVE, expresadas en kgCO2 por cada viajero que utilizaría el tren de alta velocidad, y la comparación (absoluta y relativa) con la diferencia de emisiones entre el tren de alta velocidad y el tren convencional.

Tabla 58. **Comparación de emisiones evitadas en diversas rutas en función de la distancia y velocidad media del AVE**

	Distancia FC AV	Velo-cidad media FC AV	A. Diferencia emisiones entre FC Conv.y FC AV	B. Emisiones evitadas por cada viajero del FC AV	Cociente B / A	Emisiones evitadas por viajero. km FC AV
	km	*km/h*	*kgCO_2/v*	*kgCO_2/v*		*kgCO_2/v. km*
Madrid a Sevilla	*471*	*191*	3,32	21,57	6,5	0,046
Madrid a Barcelona	*621*	*236*	3,33	40,33	12,1	0,065
Madrid a Málaga (>2006)	*533*	*125*	1,40	19,71	14,1	0,037
Madrid a Málaga>2006	*513*	*199*	2,79	43,48	15,6	0,085
Madrid a Valladolid	*179*	*179*	2,34	4,65	2,0	0,026
Madrid a Toledo	*75*	*150*	0,37	1,17	3,1	0,016

Figura 58. **Relación entre la velocidad media del tren de alta velocidad y las emisiones evitadas en la ruta por cada viajero kilómetro que utiliza el tren de alta velocidad; distinguiendo rutas con oferta aérea y rutas sin oferta aérea**



Elaboración propia

Puede observarse que, aunque el tren de alta velocidad emite (y consume) menos que el tren convencional, el ahorro en el conjunto de los modos de transporte producido en la ruta por la existencia del AVE es de entre 2 a 15 veces superior al ahorro producido por comparación del AVE con el tren convencional. Ello subraya la

afirmación hecha de que la ventaja no consiste únicamente en el menor consumo respecto al tren convencional; sino, sobre todo, el efecto de "apalancamiento" en la ruta por trasvase de otros modos de transporte.

En la figura se representa gráficamente la relación entre las emisiones evitadas en la ruta por cada viajero.kilómetro que utiliza el AVE comparado con la velocidad media del AVE en la ruta de que se trate. Se aprecia que hay un claro aumento de las emisiones evitadas por el tren de alta velocidad al crecer la velocidad del tren. Y ello, tanto en las rutas en las que hay oferta aérea, como en las que no la hay. Puede también observarse que en las rutas sin oferta aérea las emisiones evitadas por el AVE son menores, pero crecen más rápidamente con la velocidad del tren, al menos en los casos analizados.

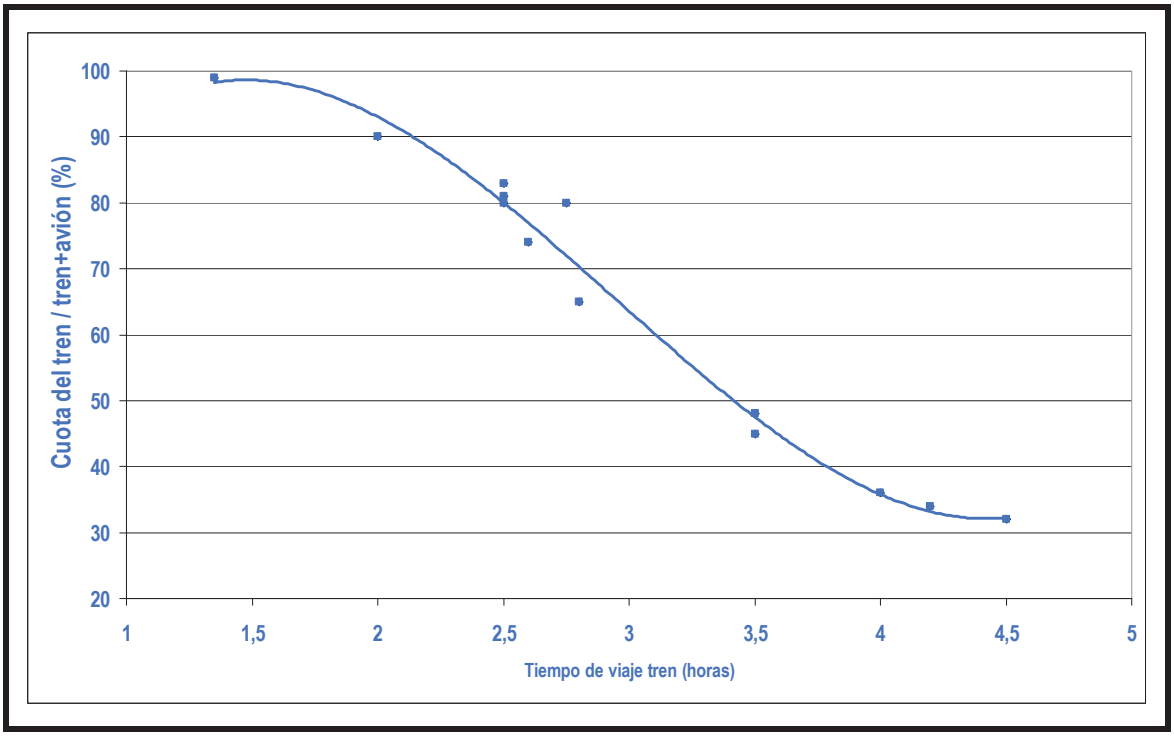
2.7.4. Incidencia de la velocidad del tren en la evitación de emisiones

En los casos anteriores se ha observado que cuando en una ruta existe oferta aérea, la mayor parte de las reducciones de emisiones procede de los viajeros que el tren capta del avión. La cuota de mercado del tren frente al avión en distancias de 400 a 900 kilómetros depende del tiempo de viaje del tren.

Gráficamente presenta un curva característica (denominada en muchas ocasiones "curva de las tres horas") en la que se observa que cuando el tren tiene un tiempo de viaje de menos de dos horas obtiene siempre cuotas de mercado por encima del 85%; y si tiene un tiempo de viaje de más de tres horas, obtiene cuotas de mercado por debajo de 50%.

En la figura 59 puede verse la participación del tren en el mercado tren+avión en diversas rutas europeas (elaborada con datos de (Barrón de Angoiti, 2005) completados con datos españoles).

Figura 59. **Relación entre la cuota del tren en el mercado tren+avión y el tiempo de viaje entre en las principales rutas mundiales y españolas entre 400 y 600 km.**



Fuente: (Barrón de Angoiti, 2005) y elaboración propia

Es posible aproximar una curva explicativa de la cuota de mercado del tren frente al avión cuya ecuación sería la siguiente:

$$TS(t) = 4{,}686 \times t^3 - 41{,}182 \times t^2 + 89 \times t + 40{,}5 \quad [86]$$

La curva presenta tres tramos: dos extremos de pendiente baja y uno intermedio (entre dos y tres horas) con mayor pendiente. Puede observarse que una reducción del tiempo de viaje de diez minutos supone un incremento de la cuota de mercado alrededor del 2 por ciento en los tramos extremos y del 5 cinco por ciento en el tramo central. Del mismo modo, un aumento de la velocidad máxima de 10 kilómetros por hora supone un incremento de la cuota del tren en torno al 0,5 por ciento en los extremos y de hasta un 4 por ciento en el tramo central.

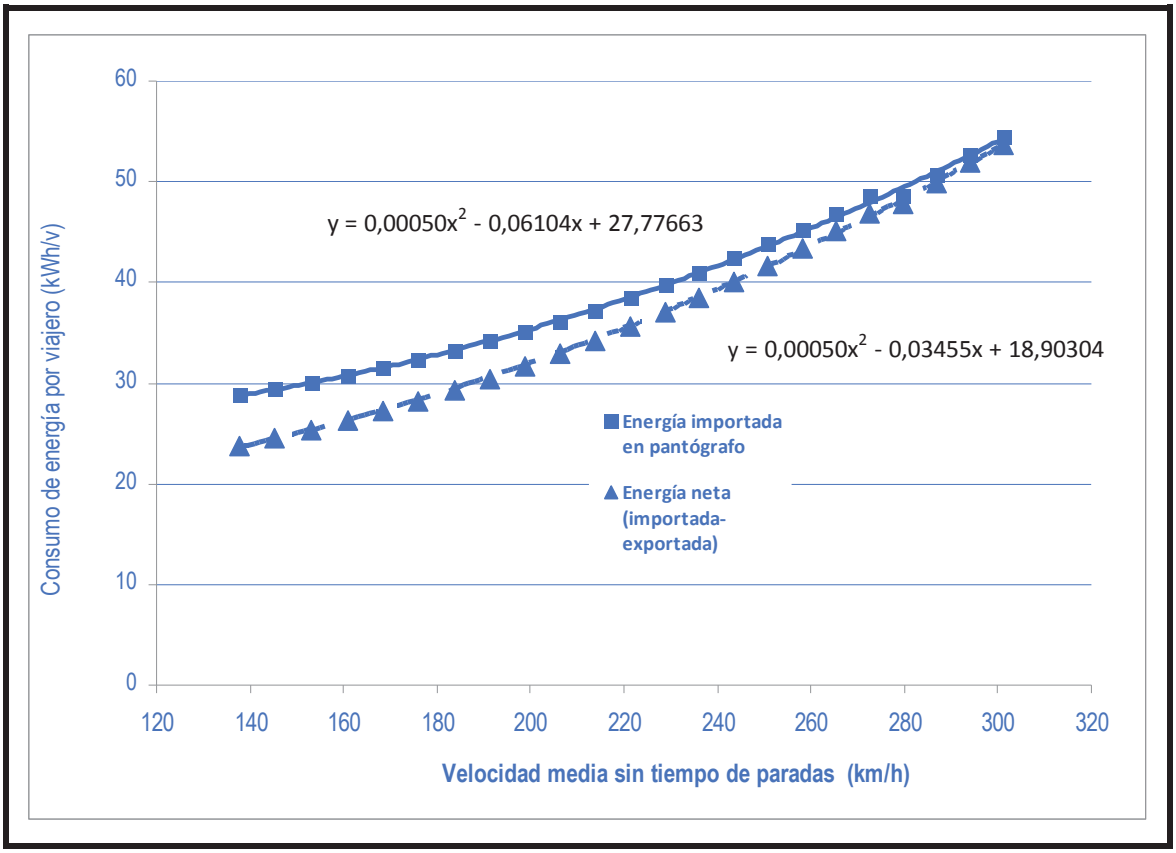
(López Pita, 2008) confirma la existencia de esta curva de tendencia general, concluyendo que es análoga para rutas nacionales e internacionales, pero apunta la existencia de una horquilla importante, indicando por ejemplo que para un tiempo de viaje en torno a cuatro horas, la cuota de mercado del ferrocarril puede variar hasta 30 puntos.

La experiencia española en las líneas de alta velocidad Madrid-Málaga y Madrid-Barcelona permite comprobar el ajuste de la curva. Ambas líneas fueron inauguradas por fases y explotadas hasta que la totalidad fue de alta velocidad por trenes de ancho variable. Cuando el tiempo de viaje se redujo desde las siete horas hasta alrededor de cuatro horas se produjeron incrementos modestos de la demanda (estos valores se corresponde al extremo derecho de la curva que tiene una pendiente muy reducida), pero cuando el tiempo de viaje se redujo sólo una hora más y pasó a ser

menor de tres horas, la demanda se dobló, pues estos valores se encuentran en el tramo central de la curva con una pendiente elevada.

Al aumentar la velocidad máxima de circulación de un tren (a igualdad de todos los demás factores, se incrementa también su consumo de energía y sus emisiones. A modo de ejemplo en la figura 60 se muestra la relación entre el consumo de energía y la velocidad media de circulación en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona para un tren de la serie 102, de 319 plazas y con un factor de aprovechamiento del 65%, realizando el servicio directo sin paradas. Las series de datos se corresponden a energía importada en pantógrafo y como neto, una vez descontada la energía regenerada[24].

Figura 60. **Consumo de energía importada y neta en pantógrafo en función de la velocidad media del tren en la línea Madrid-Barcelona**



Fuente: Martín Cañizares (2011)

Existe un caso en el que el incremento de la velocidad no supone un aumento del consumo de energía cuando, como demuestra (González Franco, 2011), dicho incremento de velocidad se efectúa exclusivamente en pendientes (bajadas). Ello es consecuencia directa del menor uso del freno un menor uso del freno supone menor pérdida de energía, y por tanto menor necesidad de importar energía. Obviamente este resultado se ve afectado si se puede aprovechar la energía del freno regenerativo.

[24] Los resultados se han obtenido con la herramienta de simulación de consumos ALPI2810 versión 9 desarrollada por el Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones del transporte de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Si asumimos que el tiempo de viaje (t_t, en horas) es la distancia recorrida en tren (L_t, en kilómetros) dividida por la velocidad comercial (Vc, en km/h) y siendo P el número anual de viajeros en la ruta (suma del tren y el avión), el número anual de viajeros del tren ($Viajerostren$) se puede calcular como:

$$V_{iajerosdeltren} = \frac{P}{100} \times (4{,}686 \times \frac{V_c^{\,3}}{L_t^{\,3}} - 41{,}182 \times \frac{V_c^{\,2}}{L_t^{\,2}} + 89 \times \frac{V_c}{L_t} + 40{,}5) \quad [87]$$

A partir de los datos de consumo de energía del tren en la línea de alta velocidad se ha extrapolado la función que relaciona el consumo de energía eléctrica (medida en en barras de la central) por viajero con la velocidad media del tren que responde a la expresión siguiente:

$$Energíatren[kWh/v] = 5{,}2718 \times 10^{-4} \times Vc^2 - 3{,}6572 \times 10^{-2} \times Vc + 20{,}011 \quad [88]$$

En cuanto al consumo del avión por viajero, a partir de los datos presentados en el trabajo IFEU (2010) se puede estimar la función que relaciona el consumo con la distancia recorrida. Para un Airbus 320 esta función puede aproximarse como:

$$Energíaavión porviajero[kWh/v] = \frac{39{,}599 \times L_a + 4750{,}4}{plazas_a \times aprov_a} \quad [89]$$

El factor de emisiones de la generación de la electricidad que emplea el tren de alta velocidad (FEt) es diferente para cada país, y varía además de año en año debido a los cambios en el mix de generación de energía eléctrica. Sin embargo, el factor de emisiones del queroseno (FEa) es constante, siendo de 3,15764 kilogramos de dióxido de carbono por litro de queroseno. Con estos datos, las emisiones en el corredor se pueden calcular como:

$$Emisiones_{t+a}[kg] = P \times \left(\left(\frac{100 - TS}{100} \right) \times C_a \times Energía_{avión} + \left(\frac{TS}{100} \right) \times Energia_{tren} \times FE_t \right) \quad [90]$$

Sustituyendo en esta ecuación las expresiones de la cuota del tren (TS), del consumo del avión ($Energíaavión$), de las emisiones del avión (FEa); del consumo del tren (Ct); y emisiones de la generación de electricidad (FEt); y dado un número de viajeros anuales, se puede calcular la velocidad óptima del tren que minimiza las emisiones en el corredor derivando la expresión $Emisiones_{t+a}$.

$$Emisiones_{i+a}{}'(v_t) =$$

$$0{,}01 \times P \times \left(\begin{array}{l} 0{,}3439 \times \left(14{,}06 \times \frac{L_t^{\,3}}{V_t^{\,4}} - 82{,}36 \times \frac{L_t^{\,2}}{V_t^{\,3}} + 89 \times \frac{L_t}{V_t^{\,2}} \right) \times (0{,}33 \times L_a + 39{,}59) + \\ \left(-14{,}06 \times \frac{L_t^{\,3}}{V_t^{\,4}} + 82{,}36 \times \frac{L_t^{\,2}}{V_t^{\,3}} - 89 \times \frac{L_t}{V_t^{\,2}} \right) \times (0{,}5272 \times 10^{-3} \times V_t^{\,2} - 0{,}0365 \times V_t + 20{,}01) \times \\ E_t + \left(4{,}686 \times \frac{L_t^{\,3}}{V_t^{\,3}} - 41{,}18 \times \frac{L_t^{\,2}}{V_t^{\,2}} + 89 \times \frac{L_t}{V_t} + 40{,}5 \right) \times (0{,}1054 \times 10^{-2} \times V_t - 0{,}3657 \times 10^{-1}) \times E_t \end{array} \right)$$

Caso ejemplo. Velocidad óptima en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

En la línea Madrid-Barcelona la velocidad máxima en el servicio comercial es en la actualidad de 300 km/h. Con una longitud de 621 kilómetros (circulando por los bypasses de Zaragoza y Lleida) el tiempo de viaje comercial del tren directo es de dos horas y 43 minutos.

Este ejercicio se ha realizado para de el tren de alta velocidad Talgo de la serie 102, con 319 plazas y con un factor de aprovechamiento del 65%. Para los factores de emisiones de la tracción eléctrica de los últimos años se ha estimado la velocidad media óptima del corredor y a partir de ésta, se ha estimado la velocidad máxima (tabla 59).

Tabla 59. **Velocidad óptimas de circulación en la línea Madrid-Barcelona para diferentes factores de emisiones en la generación de electricidad**

Año	Factor emisiones generación electricidad *$kgCO_2/kWh$*	Velocidad comercial óptima *km/h*	Velocidad máxima óptima *km/h*
2006	**0,335**	294,26	350,31
2007	**0,343**	292,78	348,55
2008	**0,278**	305,74	363,97
2009	**0,233**	316,24	376,48
2010	**0,166**	335,28	399,14

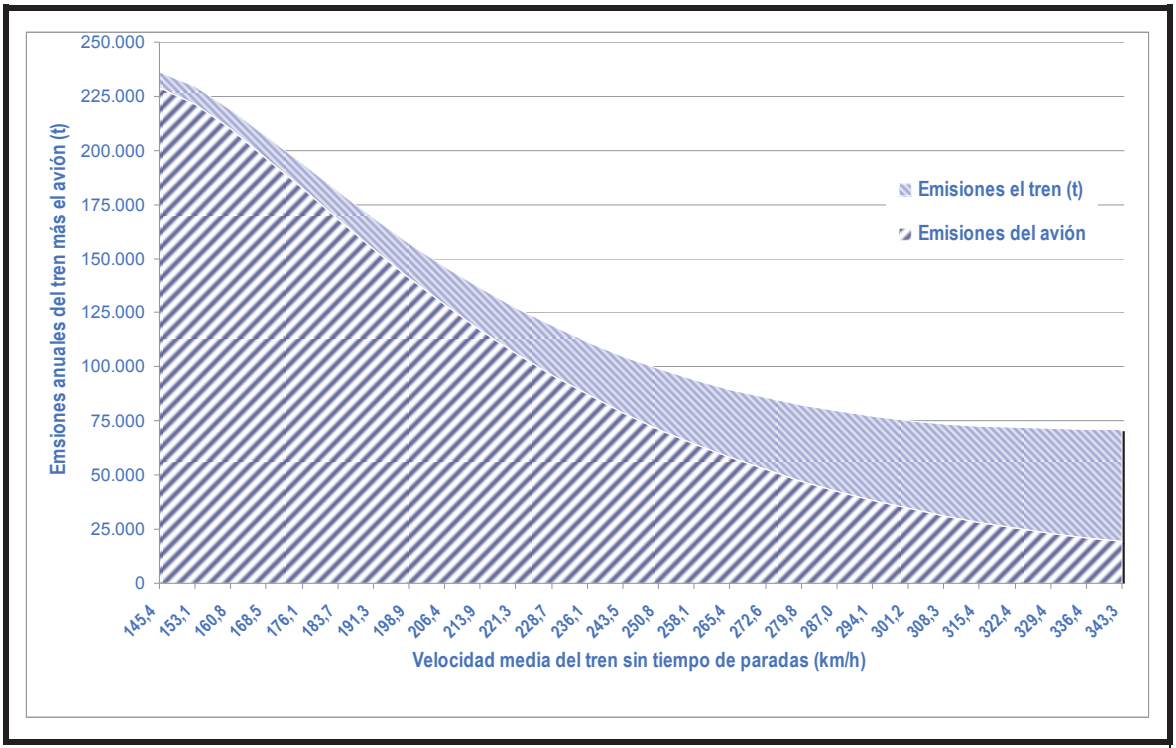
Fuente: (Martín Cañizares, 2011)

Como puede observarse, las velocidades que minimizarían las emisiones en el corredor, considerando conjuntamente el tren y el avión, se encuentran aproximadamente entre 350 y 400 km/h, velocidades superiores a los actuales 300 km/h.

Si se considera el paso de 348,55 km/h a 363,98 km/h, que serían las velocidades máximas óptimas para los factores de emisiones de los años 2007 y 2008 respectivamente, la velocidad se incrementa un 4,2% y el consumo del tren lo hace en un 6,2%.

La velocidad óptima del tren en un corredor, desde el punto de vista medioambiental, se puede visualizar gráficamente calculando las emisiones del tren y el avión variando la velocidad media, y consecuentemente la cuota de mercado. Así, para el ejemplo y con el factor de emisiones de 2010 del sistema eléctrico peninsular (0,166 kgCO2/kWh) se puede apreciar (figura 61) que la velocidad media óptima del tren es de 335,28 km/h lo que se corresponde con una velocidad máxima de casi 400 kilómetros por hora. Aumentar la velocidad hasta esos valores traería consigo un aumento del consumo de energía del tren, pero a la vez una reducción de consumo de energía en conjunto del corredor. Como las emisiones por viajero del tren siguen estando a esas velocidades por debajo de las emisiones por viajero del coche, los aumentos de velocidad además de captar de forma eficiente viajeros del avión en las cuantías descritas, también captan viajeros del coche reduciéndose las emisiones aunque en una cuantía más difícil de determinar.

Figura 61. **Emisiones del tren y el avión en el corredor Madrid-Barcelona para diferentes velocidades medias del tren**



Fuente: (Martín Cañizares, 2011)

3. RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LOS COSTES DE EXPLOTACIÓN EN EL FERROCARRIL

3.1. Introducción a los costes de explotación

Antes de avanzar en el estudio de los costes de explotación es conveniente formular algunas definiciones sobre los costes, puesto que con frecuencia se emplean las mismas definiciones para explicar conceptos diversos. Además, es preciso establecer algunas distinciones entre determinados tipos de coste en función de su relación con el movimiento del tren.

No existe doctrina unánime a la hora de denominar a cada uno de los costes, por ello la definición que presentamos en puramente convencional, aunque respetuosa y compatible con la teoría económica. Es la siguiente:

- **Coste y gasto**.- ● **Coste** sería el valor de cada uno de los sacrificios que se deben hacer para conseguir un resultado. Este sacrificio no tiene por que tener un contendido económico directo, sino que puede ser intangible, como por ejemplo el ruido. ● **Coste económico** sería la clase de coste que sí que supone el sacrificio o pago directo de unidades económicas, y suele denominarse **gasto** (por ejemplo, la remuneración del personal).
- **Costes de capital y costes corrientes**. ● **Costes de capital** serían aquellos que se producen como consecuencia de la realización de una inversión, y se caracterizan porque traen su origen en esa decisión inicial (por ejemplo, construir una línea o adquirir un tren) y tienen poca relación con el uso que haga posteriormente: son costes de capacidad, más que costes de uso o de producción. El problema general que plantea su análisis es cuál debe ser el criterio de reparto entre las unidades de uso. Los costes de capital son amortizaciones y costes financieros para remunerar al capital necesario para la inversión. ● **Costes corrientes** son aquellos que se producen periódicamente como consecuencia de la actividad.
- **Costes directos e indirectos**. ● **Costes directos** son aquellos que pueden imputarse de forma inmediata a una actividad productiva, y corresponden a recursos no compartidos con varias actividades (por ejemplo, el coste de la venta de billetes de un tren concreto). ● **Costes indirectos** son aquellos que precisan alguna operación intermedia para ser imputados a una actividad, ya que corresponden a recursos compartidos por varias actividades (por ejemplo, el coste de la actividad de dirección de la empresa). Naturalmente, dependiendo de la amplitud de la actividad considerada, el mismo coste puede ser directo o indirecto. (Así, el equipo de gestión de los trenes de un corredor es un coste indirecto para cada tren, pero es un coste directo si se considera el conjunto del corredor).
- **Costes fijos y variables**.- ● **Costes fijos** sería aquellos que no cambian al variar la cantidad de output producida. ● **Costes variables** serían aquellos que, por el contrario, aumentan al aumentar la producción del bien o servicio producido. La distinción entre costes y fijos y variables no es sencilla ya que además debe ponerse en relación con el plazo en el que se mide la variabilidad, ya que en el largo plazo todos los costes pueden considerarse variables.
- **Costes operativos y costes de explotación**. En este trabajo consideraremos **costes operativos** a los costes de la empresa operadora de servicios de transporte, incluyendo el canon que paga por el uso de las infraestructuras (son costes operativos, por ejemplo, los de personal, los de venta de billetes, los de los servicios a bordo, amortización de los trenes, etc.) ● Consideramos **costes de**

explotación a una parte de los costes operativos: los costes necesarios para la producción del servicios de transporte incluyendo el coste marginal que se produce sobre la infraestructura y los costes de remuneración del capital necesario para adquirir los trenes. (Por ejemplo, son costes de explotación, el de la energía, el de los maquinistas de los trenes, los de mantenimiento, amortización, etc.)

Sobre definiciones y conceptos relacionados con los costes en el transporte puede verse (de Rus et al., 2003); más específicamente sobre la teoría de los costes operativos y de infraestructura en el ferrocarril (García Álvarez, 2006). Sobre los costes operativos en el ferrocarril, incluyendo criterios de imputación véase (García Álvarez et al., 1998).

3.1.1. Utilidad del estudio de los costes en el transporte de viajeros

El conocimiento detallado de la función de costes operativos en el transporte de viajeros por ferrocarril resulta de utilidad para diversos objetivos:

- En la planificación de las infraestructuras de transporte; ya que los costes operativos forman parte del balance financiero y del balance económico-social, que son instrumentos importantes para la decisión a largo plazo.
- En la planificación de la oferta de los servicios de transporte, ya que los costes de operación son una parte importante del coste total del sistema y con frecuencia se intentará que la planificación minimice dichos costes totales.
- En la programación concreta y en la gestión diaria del servicio (en decisiones sobre la circulación de trenes de refuerzo, por ejemplo) por la misma razón anterior.
- En la fijación de los precios, ya que éstos requieren el conocimiento del coste marginal y del coste total.
- En el análisis técnico y económico del servicio.

¿Qué coste utilizar en los estudios?.- El conocimiento de los costes es útil, cómo se ha expuesto, para muy diversos propósitos (planificación, programación, fijación de precios, estudios de viabilidad), y para diferentes actores (para la administración, para la empresa operadora del servicio, para el gestor de infraestructura, para los analistas, etc.)

Cada propósito distinto requiere el uso de un nivel coste diferente. No hay, por lo tanto, un único coste que resulte útil para todos los propósitos ni para todos los interesados. En cada caso deben variarse el "perímetro" del coste considerado (empleando el indicador más adecuado), y el valor de cada una de las variables utilizadas.

La función de costes frente al valor medio.- Habitualmente, en los estudios en los que se involucran los costes (por ejemplo en los análisis coste-beneficio), suelen emplearse valores medios obtenidos de la experiencia.

El coste medio puede tener un cierto interés para analizar situaciones pasadas, pero resulta de poca utilidad cuando se trata de extrapolar costes hacia el futuro, especialmente en entornos en los que puede haber variaciones importantes sobre la situación de referencia.

Los costes medios del pasado dan una información muy limitada, puesto que (como se ha indicado) cada tipo de decisión requiere el empleo de un coste distinto. Utilizar el valor medio implica la elección de un nivel determinado de costes (excluyendo otros), y sobre todo ignorar cambios en las variables que puedan presentarse en la explotación concreta que se va a analizar.

Por otra parte, la fijación de precios empleando los costes medios trae consigo una pérdida muy importante de viajeros, y por ello de ingresos: cada persona está dispuesta a pagar un precio diferente por el mismo servicio, y por ello, atender a aquellos viajeros que estén dispuestos a pagar más que el coste marginal (aunque no estén dispuestos a pagar el coste total) puede contribuir a rentabilizar el servicio siempre que no se les vendan plazas que estén dispuestos a comprar otros viajeros a un precio mayor.

Por estas razones, en lugar del *valor medio* se debe conocer y emplear la *función de costes*, que relaciona el coste (total o marginal) con cada una de las variables relevantes que le afectan. Dando el valor adecuado a cada una de las variables se obtiene el coste en el caso concreto que se va a analizar.

La derivada de la función de costes con respecto a cada una de las variables ofrece una idea sobre la elasticidad del coste con respecto a esta variable relevante, aunque debe advertirse que, por no ser lineal la función de costes, la elasticidad cambia según el valor de referencia.

Las variables más importantes a incluir en la *función de costes* son: a) la velocidad y las características de los sistemas de alta velocidad, convencional mejorado y convencional; b) la distancia recorrida; c) el tiempo de viaje y otros tiempos involucrados; y d) parámetros relacionados con la eficiencia económica del tren.

La determinación de la *función de costes* es uno de los objetivos más relevantes del presente análisis y a ella se dedicará una parte importante del estudio, atendiendo especialmente a su relación con la velocidad y con el tipo de sistema en que se opera (alta velocidad puro, convencional mejorado, convencional eléctrico y convencional diésel).

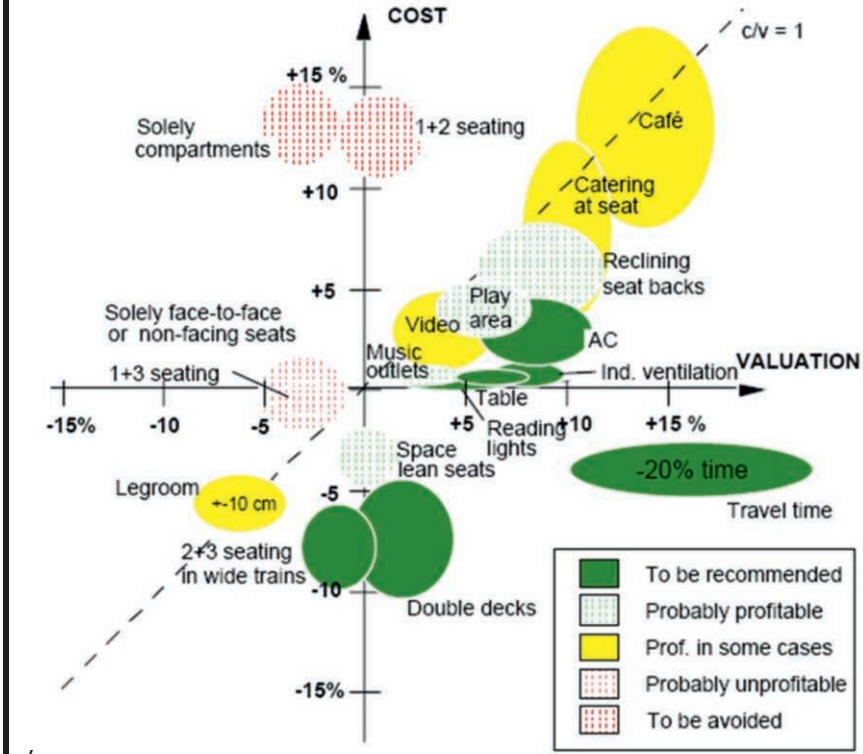
3.1.2. Antecedentes de estudios sobre la relación entre velocidad y costes de explotación

No hay numerosos estudios sobre la relación entre los costes de explotación y la velocidad en al ámbito del ferrocarril.

➢ La velocidad como atributo que aumenta el valor y reduce el coste

Un relevante estudio sobre la incidencia de diversas medidas a adoptar para la mejora de valoración de las prestaciones de los trenes por los viajeros y relación de cada una con los costes es el realizado por (Kottenhoff, 2003). En él se incluye una representación gráfica de los resultados de cada acción con estas dos variables (figura 63). En ella se comprueba que la mejora de la velocidad se sitúa en el cuadrante inferior derecho, donde se representa una disminución de costes y, simultáneamente, un incremento de valor para los clientes. En concreto, una reducción del tiempo de viaje del 20 por ciento aumenta en un 10-20 por ciento lo que los clientes estarían dispuestos a pagar. Y a la vez, los costes de servicio se reducen un entre un 3 y un 5 por ciento.

Figura 62 .- **Coste y valor para los clientes de algunos atributos del servicio de viajeros**



Fuente: (Kottenhoff, 2003)

➢ Referencias sobre la relación entre la velocidad y los costes de explotación del transporte

La literatura existente en el ámbito del ferrocarril sobre la relación entre los costes de explotación y la velocidad es bien escasa. Desde luego, pueden aplicarse al ferrocarril los conceptos generales válidos para todos los modos de transporte, como los que destaca (de Rus et al., 2003): "la velocidad determina la productividad del equipo móvil, ya que ésta se mide por el producto de la carga útil transportada por la velocidad. El output por hora aumenta cuanto mayor es la velocidad media a la que circula el vehículo (…). Otras partidas de coste (personal, mantenimiento, tasas aeroportuarias, etc.) no se incrementan normalmente con la velocidad, haciendo que, en términos unitarios, el coste de operar más rápidamente un vehículo pueda llegar a descender".

Ya en lo que respecta al ferrocarril hay que mencionar los detallados análisis técnicos y económicos realizados en Francia en los años 70 del siglo XX para la puesta en marcha de los servicios TGV. (Mourabit Fossas, 2003) hace un repaso de todos los costes de explotación (e incluso incluye referencias a costes de primer establecimiento) relacionados con el aumento de la velocidad en el ferrocarril, al buscar criterios para encontrar la velocidad óptima del sistema ferroviario. Especial interés tiene el dato que cita de (Vignes & Debosque, 1989) según el cual el coste de mantenimiento de una rama de alta velocidad del TGV París Sudeste fue en 1988 de 11,70 francos franceses por kilómetro frente los 12,21 francos del mismo año por kilómetro de coste del un tren convencional tipo Corail de un número similar de plazas a las del tren de alta velocidad.

Sobre el efecto de la velocidad en los costes en el caso español hay que recurrir a las publicaciones generadas con ocasión del Congreso "La importancia de alta velocidad en el ferrocarril", organizado por la Fundación Caminos de Hierro y celebrado en Córdoba en junio de 2008. Entre estos trabajos, el más relacionado con la materia que nos ocupa es el de (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2008): "Relación entre la alta velocidad ferroviaria y los costes operativos no energéticos". Y más recientemente, entre las ponencias presentada en el 7º Congreso mundial de alta velocidad celebrado en Pekín, China, en 2010 (García Álvarez, 2010f): "Relationship between Rail Service Operating Costs and Speed". También es destacable la reflexión sobre los costes operativos del ferrocarril y la necesidad de igualarlos a los que, en distancias semejantes, obtiene la aviación en los servicios "low cost" que se contiene en el articulo de Oskar Fröidh "Perspectives for a future High Speed train in the Swedish domestic travel market"(Fröidh, 2008).

En el transporte aéreo son mucho más numerosos los estudios, pero la mayor parte de ellos tienen un enfoque econométrico (desarrollados con metodología "top-down"), menos útil para medir la sensibilidad a cambios en variables como la velocidad. De entre los pocos que, por el contrario, aplican un enfoque ingenieril o "bottom-up" destaca (Adler, Pels, & Nash, 2009) "Aircraft trip cost parameters: A function of stage length and seat capacity".

3.1.3. Los costes totales del transporte

Antes de entrar en el análisis pormenorizado de los costes de explotación del ferrocarril y su relación con la velocidad, puede ser oportuno explicitar algunas ideas y reflexiones sobre los costes del transporte en su acepción más amplia, de los cuales los costes de explotación son una parte.

Llamaremos "costes totales del sistema de transporte" (o "costes económico-sociales") al conjunto de los costes de todo tipo, o los "sacrificios" que la sociedad debe soportar como consecuencia de la existencia del servicio de transporte.

➢ Clasificación de los costes totales del transporte por su ámbito

En el caso más general, los costes totales del sistema de transporte se pueden clasificar según el ámbito en que se producen, en tres grandes grupos:

- **Costes de infraestructura**: incluyen tanto costes de capital (construcción, ampliación y remuneración del capital), como costes corrientes (costes de mantenimiento y explotación de la infraestructura).
- **Costes de operación del servicio**: son los costes de capital (asociados a vehículos: adquisición, financieros, renting, …) y sus costes corriente de funcionamiento (energía, personal y mantenimiento, entre otros).
- **Otros costes del transporte**, entre los que se encuentran: a) el tiempo aportado por los viajeros; y b) los daños y los costes materiales y personales de los accidentes; los costes ambientales (contaminación, ruido, etc.); los costes sociales (accidentes, congestión, etc.)

➢ Clasificación de los costes totales según quién los soporta (costes "externos" o "internos")

Desde el punto de vista de quién soporta el coste, puede establecerse una división entre costes externos y costes internalizados:

- Son costes "internos" o "internalizados" los soportados por el usuario del transporte. Así, el coste de mantenimiento necesario para conseguir que el vehículo esté operativo es un coste internalizado.
- Son costes "externos" o "no internalizados" los que son soportados por alguien diferente del propio usuario del transporte. Así, el coste de la contaminación atmosférica o de la congestión, son frecuentemente costes no internalizados.

Normalmente los costes externos suelen asociarse a los costes ambientales y a los de los accidentes, pero es importante observar que un coste puede ser internalizado o no según cuál sea la regulación, según el modo de transporte de que se trate, y según las peculiaridades del caso considerado.

Así, por ejemplo, el coste de provisión de la infraestructura es un coste "no internalizado" en una autovía, pero es un coste "interno" o "internalizado" (a través del peaje) en una autopista.

➢ Agentes del sistema con costes o beneficios

En el transporte intervienen económicamente diversos agentes que soportan costes y/u obtienen beneficios. Estos agentes son los usuarios, las administraciones públicas, las empresas y terceros.

- El **usuario** es aquella persona que viaja o que es propietario de la mercancía que se transporta. Es quien percibe la mayor parte del beneficio directo de la actividad del transporte y quien, por lo tanto, debería soportar el coste.
- Las **administraciones públicas** son agentes interesados, en nombre de sus administrados, en favorecer el transporte. Así, cuando las Administraciones soportan costes, en realidad los soporta la sociedad (actual o futura) por la vía de los impuestos. Por otro lado, las administraciones públicas también obtienen ingresos de los impuestos sobre el transporte.
- Se pueden distinguir dos tipos de **empresas**: por un lado, las empresas operadoras de servicios de transporte (incluyendo las asociadas a ellas), y por otro, las empresas propietarias y las gestoras de la infraestructura (y las asociadas a ellas).
- Por último, hay que señalar que existen **terceros**, ajenos al transporte, que en ocasiones soportan costes u obtienen beneficios.

➢ Costes de capital (infraestructura y operación)

Los que denominaremos "costes de capital" comprenden:

- La depreciación de los activos[25] (sin incluir el IVA y otros impuestos indirectos recuperables).
- La remuneración del capital (que comprende el coste financiero si es capital ajeno, o el dividendo y reservas si se trata de capital propio) necesario para financiar los activos.
- Seguros o provisiones para pérdidas de valor.

Los costes de capital se refieren:

- En la operación de los servicios, a los vehículos de transporte.

[25] Entendemos por activos los bienes, derechos y otros recursos controlados económicamente por la empresa de los que se espera obtener beneficios o rendimientos económicos en el futuro

- En la infraestructura, a las estaciones, terminales y puertos; a las carreteras, canales, líneas ferroviarias, equipos y sistemas de control de tráfico, regulación y seguridad.

➢ Costes corrientes (infraestructura y operación)

Los costes corrientes son los que deben soportarse recurrentemente cada año para el funcionamiento de la infraestructura o para operación del servicio. Son, por ejemplo: la energía, los costes laborales, los servicios externos y los materiales.

Son costes corrientes en el ámbito concreto del transporte:

- En operación de servicios: son costes corrientes la energía para los vehículos, el personal de conducción, la venta de billetes y el mantenimiento de vehículos.
- En las terminales: son costes corrientes el mantenimiento, la limpieza, la energía y la vigilancia.
- En el control del tráfico: el coste del personal de explotación y el mantenimiento de equipos y locales.
- En infraestructura: son costes corrientes el mantenimiento y la vigilancia de la infraestructura y sus distintos subsistemas.

➢ Costes personales

Los costes personales son aquellos que son soportados por los usuarios. En el transporte son los siguientes:

- Costes del tiempo empleado para el viaje (incluyendo las esperas): Hay que señalar que quien soporta la espera, no siempre es el viajero (por ejemplo, en una situación de congestión o "atasco", el viaje de cada persona hace perder el tiempo a los demás usuarios de la vía).
- Coste de los desplazamientos accesorios hasta las terminales.
- Costes de la congestión (tiempo, energía, contaminación, etc.)
- Costes de los accidentes y daños no cubiertos por el seguro.

Tanto los costes de la congestión, como los costes de los accidentes y los daños no cubiertos por el seguro, suelen ser considerados costes externos.

➢ Costes medioambientales

Los costes medioambientales son aquellos que reflejan el deterioro del medio ambiente producido por el transporte. Son costes medioambientales los siguientes:

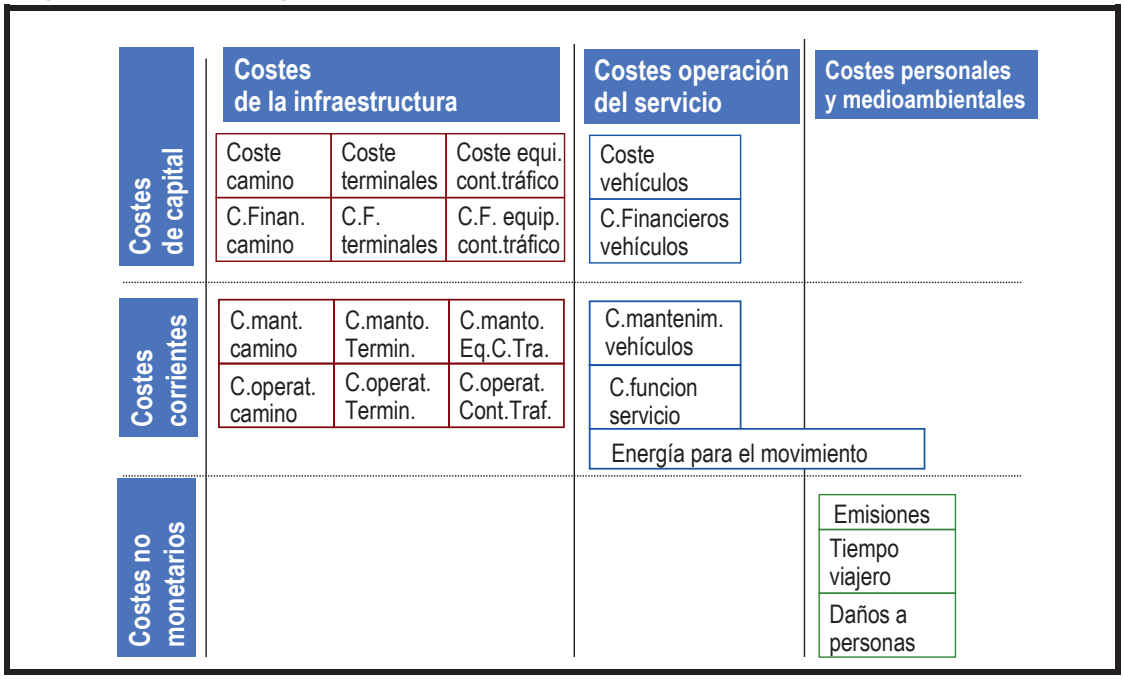
- Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Contaminación atmosférica.
- Ruido.
- Contaminación de aguas.
- Contribución al agotamiento de las fuentes de energía no renovables.

Todos estos costes son, normalmente, costes externos, si bien en ocasiones algunos de estos costes son internalizados a través de determinados impuestos o de mecanismos similares (por ejemplo, a través del pago de los "derechos de emisión" por las emisiones de gases de efecto invernadero).

➢ Esquema general de clasificación de costes

Según lo expuesto en los epígrafes precedentes, puede establecerse de manera gráfica en la figura 63, la siguiente clasificación de los distintos tipos de costes, de acuerdo con los criterios de clasificación anteriormente presentados.

Figura 63 .- **Esquema general de clasificación de costes del transporte**



Fuente: Elaboración propia

➢ Esquema general de la traslación de los costes

Los costes trasladan de unos a otros agentes a través de un flujo integrado por precios, impuestos, cánones y subvenciones; de forma que hay algún agente que acaban soportando cada uno de estos costes (figura 64).

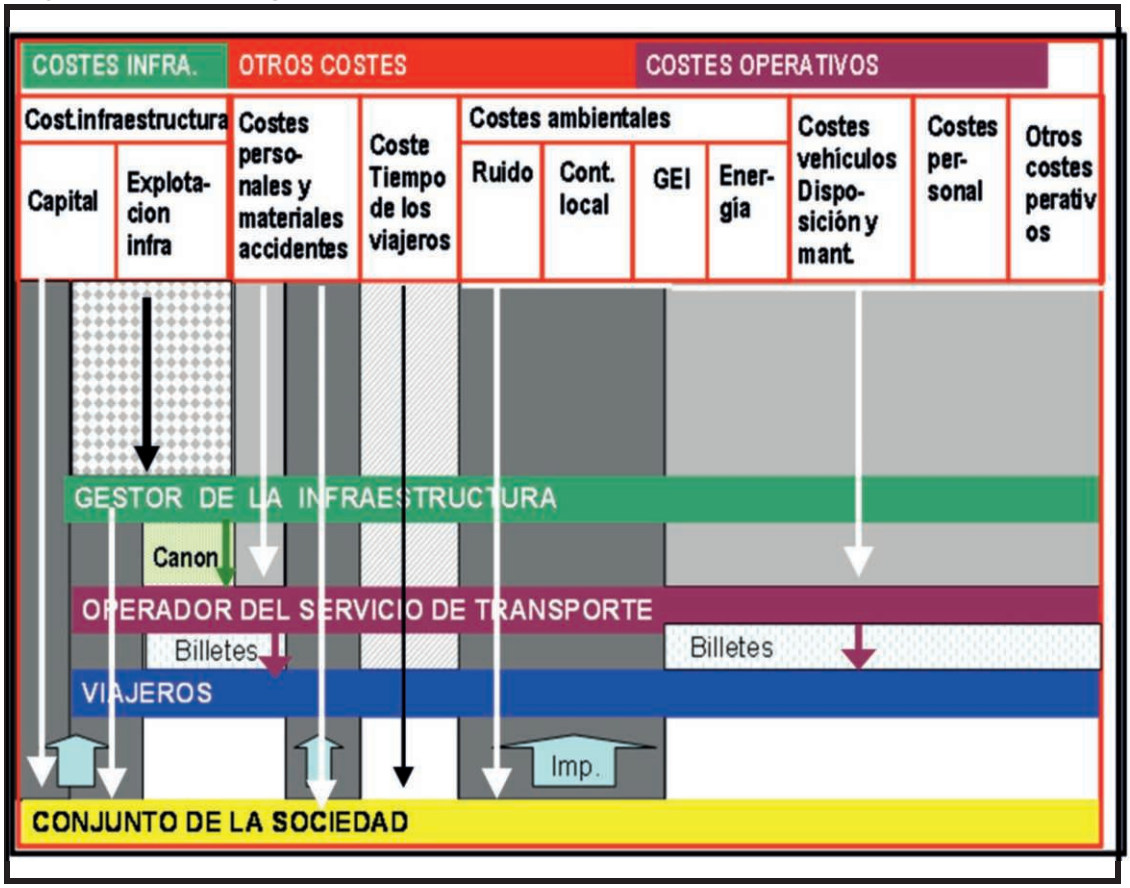
Para una mayor claridad, en la figura se muestran de forma gráfica los costes totales del transporte y su traslación entre los agentes, de forma que se convierten en externos e internos mediante el esquema general reflejado.

Puede observarse que una parte de los costes de capital de la infraestructura normalmente no son trasladados al gestor de la misma. Por ello, esta parte es un coste externo que soporta la sociedad en su conjunto

Otra parte de los costes de capital de la infraestructura y los costes de explotación de la infraestructura son soportados por la empresa gestora de la infraestructura, quien su vez los traslada parcial o totalmente a través del canon al operador del servicio y éste a los usuarios.

Los costes de la energía (que en el caso de la tracción eléctrica incluyen el coste de las emisiones de gases de efecto invernadero), de los vehículos, de personal y otros costes operativos son normalmente soportados el operador de servicios de transporte quien los traslada al viajero a través del billete, por lo que son costes "internalizados".

Figura 64 . **Esquema general de la traslación de los costes**



En la parte superior aparecen cada uno de los costes totales del transporte. En gris oscuro, los costes externos que son finalmente soportados por el conjunto de la sociedad. En gris claro, los costes que son soportados directamente por el operador que los traslada al viajero.

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. La tarifación en el transporte

La llamada *tarifación* en el transporte hace mención a los mecanismos económicos que se establecen para lograr los objetivos de la política de transporte.

Entre estos objetivos puede estar el de "internalizar" una parte o todos los costes del transporte para enviar a los usuarios señales de eficiencia económica, pero también puede haber otros objetivos relacionados con la necesidad de limitar el coste económico para la administración, permitir una adecuada competencia entre operadores y modos, reducir los efectos medioambientales negativos, etc.

Los mecanismos de tarifación son, en suma, "herramientas" al servicio de una política de transporte.

➢ Mecanismos de tarifación y flujos económicos

Los diversos mecanismos (o "herramientas") de tarifación pueden revestir distintas fórmulas, tales como precios, tarifas, impuestos, tasas, cánones por el uso de la infraestructura; pagos derivados del régimen de penalizaciones y bonificaciones, subvenciones al gestor de la infraestructura, subvenciones al operador, compra de servicios por la administración, impuestos medioambientales específicos, etc.

En cada uno de ellos hay un actor (empresa, usuario, administración,…) que debe soportar el coste, y hay otro actor beneficiario que lo recibe.

El conjunto de los mecanismos de tarifación que se apliquen establece el "modelo económico" de funcionamiento del sistema, que puede ser diferente en cada caso.

➢ Principios de la tarifación

Serán los objetivos concretos a alcanzar los que determinen qué herramientas son más útiles en cada uno de los casos, pero es importante enunciar dos principios básicos de la tarifación:

- Las herramientas de tarifación forman un conjunto que debe diseñarse armónicamente para alcanzar la función objetivo que se defina para el sistema. El resultado de cada una de ellas interactúa con los demás, por lo que no es adecuado emplear puntualmente determinadas herramientas de tarifación para alcanzar objetivos parciales.
- Es tan relevante la "estructura" de cada mecanismo tarifario como su cuantía. Es muy importante que cada mecanismo aplicado tenga la estructura adecuada para enviar a los agentes implicados las adecuadas "señales" de comportamiento. En muchas ocasiones, se hace más hincapié en fijar la cuantía económica que debe transferirse de uno a otro actor a través del mecanismo, que en la "estructura" de dicho mecanismo que es la que envía las señales económicas de eficiencia. Atendiendo solo a la cuantía se puede lograr en el primer momento el resultado económico deseado, pero inmediatamente se produce una reacción de los actores que actúan para mejorar su posición, por lo que no se consigue una optimización del conjunto, sino que se consigue la mejora de la situación de los uno solo de los actores, con el consiguiente perjuicio para el sistema.

➢ Esquema de flujos económicos

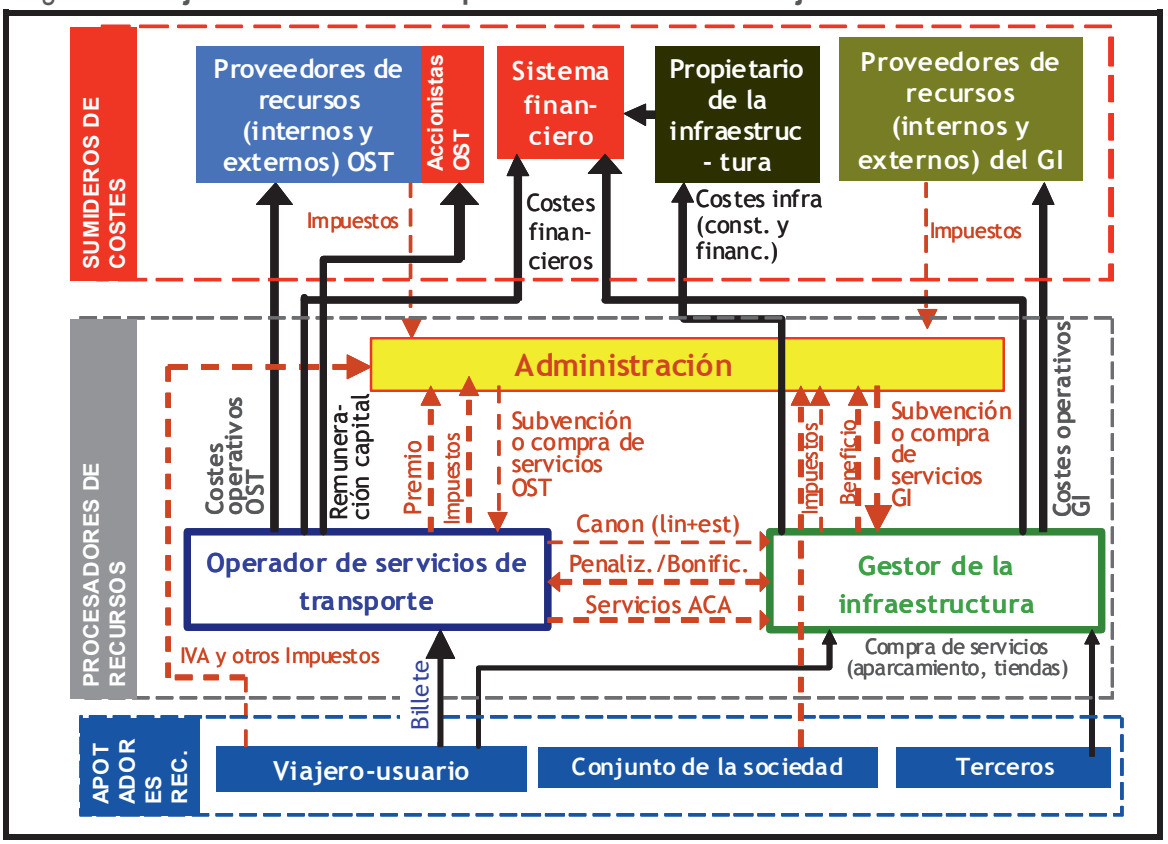
Los flujos económicos y de servicios que se producen en el sistema de transporte entre los diversos agentes son complejos y aparecen recogidos en la figura.

Como puede observarse, hay un grupo de agentes que actúan como proveedores de recursos (que por lo tanto son "sumideros de costes"), y los ingresos netos de este grupo son, por lo tanto, los costes económicos del sistema.

Otros agentes (viajeros, sociedad y terceros) aportan, de una u otra forma, los recursos económicos necesarios para el funcionamiento del sistema, y entregan estos recursos a otros agentes "procesadores" para que éstos produzcan el servicio. El total de las aportaciones de estos agentes también equivale a los costes económicos del sistema.

Los herramientas o mecanismos de tarifación producen transferencias económicas entre agentes procesadores, y entre éstos y los "agentes aportadores" de recursos, e inclusos los "sumideros de recursos", para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Puede deducirse la necesidad de que sistema de los mecanismos de tarifación sea un conjunto diseñado armónicamente.

Figura 65 . **Flujos económicos en la operación de servicios de viajeros**



Fuente: Elaboración propia (García Álvarez, 2011d)

➢ La problemática de la tarifación

Objetivo de la tarifación: ¿Quién debe soportar los costes del transporte?

Es necesario hacer una breve mención a quién debe soportar los costes del transporte. La Comisión Europea ha determinado que para lograr la máxima

eficiencia del transporte y el menor coste total, deben aplicarse dos principios fundamentales:

- El usuario paga
- El que contamina paga

Actualmente los usuarios sólo soportan una parte de los costes del transporte (que es diferente según el país y el modo de transporte), y lo hacen de diferentes formas:

- Mediante pagos directos por los servicios de transporte (billetes).
- Soportando ciertos peajes o tasas por el uso de infraestructuras.
- Soportando variados y heterogéneos impuestos sobre el transporte (matriculación, hidrocarburos, energía,…)
- Aportando su propio tiempo.
- Pagando primas de seguro.

Debido a esto, se tiende a la sustitución progresiva de los impuestos existentes (que gravan genéricamente el sistema de transporte) por instrumentos más eficaces, que integren los costes de infraestructura y los costes externos y que además envíen señales de eficiencia a los agentes del sistema. Estos instrumentos son:

- La tarifación por el uso de las infraestructuras, que (aplicada con una adecuada estructura) es especialmente eficaz para regular la congestión y para reducir los demás efectos nocivos para el medio ambiente, y
- Las medidas fiscales aplicadas a los combustibles, que permiten un buen control de las emisiones de dióxido de carbono.

Los sistemas tarifarios y fiscales deben ser armonizados entre modos de transporte y entre países.

Criterios para elegir el sistema de tarifación

La tarifación debe cumplir los siguientes principios:

- Ser suficiente (capaz de hacer pagar la cantidad necesaria para cubrir los costes).
- Ser eficiente en su gestión (es decir, que los costes de recaudación y de control sea los menores posibles).
- Debe enviar señales al destinatario (para que induzca en él un comportamiento que reduzca los costes del transporte).
- Debe ser transparente (es decir, fácilmente entendible por los usuarios).
- Debe ser equitativa (entre modos de transporte y países).

Se puede establecer la siguiente valoración de algunos sistemas de tarifación:

- Viñetas sobre los vehículos (ej.: el impuesto de circulación y el impuesto de matriculación). No son proporcionales al uso, y por ello, no envían señales adecuadas (una vez que se ha pagado se estimula el uso).
- Peajes: son poco económicos, tienen un coste de gestión alto, y no estimulan la reducción del consumo ni varían según el tipo de combustible empleado.
- Impuestos de combustible: tienen la ventaja de que pueden modularse de acuerdo con la eficiencia energética.

- Recargos en las tarifas por el uso de la infraestructura (valen para modos colectivos de transporte): reflejan bien los costes corrientes variables de la infraestructura. Además, es un sistema eficiente de recaudación.

➢ La propuesta de la Comisión Europea sobre la tarifación

La Comisión Europea, en el Libro Blanco "Tarifas justas por el uso de infraestructuras. Una estrategia gradual para el marco común de tarifación de las infraestructuras de transporte en la UE", 1999, propugna una tarifación basada en el pago al gestor de la infraestructura del coste social marginal total.

El coste social marginal total comprende:

- Costes de explotación: energía, costes laborales, algunos costes de mantenimiento.
- Costes derivados de los daños a la infraestructura: costes de mantenimiento y desgaste de la infraestructura.
- Costes de saturación: el coste de demoras de tiempo a otros usuarios o no usuarios, como resultado de la saturación del tráfico (en carreteras, colas en aeropuertos o estaciones ferroviarias). Además, la utilización de la infraestructura por un transportista puede impedir su uso por otro transportista (por ejemplo, la pista de aterrizaje o despegue).
- Costes producidos al medio ambiente: contaminación del aire y del agua y contaminación acústica.
- Costes de los accidentes: costes derivados de los daños materiales, el dolor y el sufrimiento, así como de las pérdidas de producción.

El planteamiento de que el operador del servicio de transporte pague al gestor de la infraestructura del coste marginal social implicae que este pago es un coste del operador del servicio que debe repercutir a sus clientes (los viajeros); así pues, al usuario le acaban llegando estos costes (si los viajeros no pueden pagarlo, las autoridades pueden subvencionar, pero ya no es una subvención genérica, sino a un servicio concreto).

Dentro de estos costes marginales sociales totales se incluyen los costes corrientes del gestor de la infraestructura, pero además incluyen más costes. Por eso, el gestor de la infraestructura cuando cobra un canon basado en el coste marginal social tiene un excedente económico que puede emplear para financiar la construcción de infraestructuras (La Comisión opina que, aún así, "sobraría" dinero). También se puede emplear este excedente para corregir los costes medioambientales o de otro tipo.

En la fijación de los sistemas de tarifación debe tenerse siempre en cuenta el equilibro entre modos de transporte, ya que si el sistema de tarifación al coste marginal social solo se aplica a un modo de transporte, pero no a otros, pueden producirse efectos indeseados como las transferencia de tráfico por razones fiscales entre modos de transporte, que probablemente haría perder eficiencia al propio sistema de tarifación.

3.1.5. Unidades a emplear en el estudio de los costes de explotación del transporte

Todo estudio de costes debe partir de la definición de la métrica empleada.

Unidad de medida.- Los costes unitarios se deben expresar en unidades económicas (por ejemplo, céntimos de euro) por unidad de oferta (normalmente por plaza.km o por unidad de superficie útil y kilómetro), dado que el coste lo produce el desplazamiento del vehículo, con independencia de su ocupación (por ejemplo, cuesta lo mismo mover un coche de cinco plazas cuando lleva a un viajero que cuando circula completo).

El orden de magnitud de los costes operativos suele ser de 3 a 12 céntimos de euro por plaza.kilómetro, y en esta horquilla puede encontrase el coste de la mayor parte de los modos de transporte.

Costes relacionados con los viajeros, los viajeros.kilómetro e ingresos.- Hay algunos costes (pocos) que se producen por viajero o que son función de los ingresos (por ejemplo, los costes restauración a bordo, venta de billetes, seguro de viajeros).

Los costes que se producen por viajero son fácilmente convertibles en coste por viajero.kilómetro, sin más que dividir el coste por viajero por el recorrido medio de los viajeros:

$$Coste/viajero.km = \frac{Coste/viajero}{\mathrm{Re}corridomedio(km)} \qquad [91]$$

Los costes que son función de los ingresos (por ejemplo, el coste de venta de los billetes o los costes de financieros del circulante, se pueden convertir en costes por viajero kilómetro empleando la percepción media:

$$Coste/viajero.km = Costeporingreso(€/€) \times Percepmedia(€/viajero.km)$$

En aquellos casos en los que se dispone del coste por viajero.km, para obtener el coste por plaza kilómetro es preciso multiplicar el coste por viajero.kilómetro por el "aprovechamiento" (que se define como el cociente entre los viajeros.kilómetro transportados y las plazas.kilómetro ofertadas).

$$Coste\ /\ plaza.km = Coste\ /\ viajero.km \times Aprovechamiento(viajeros.km\ /\ plazas.km) \qquad [92]$$

Como el aprovechamiento, por su propia definición, es igual o menor que la unidad, el coste por plaza.kilómetro es igual o menor que el coste por viajero.kilómetro.

$$Coste\ /\ plaza.km \le Coste\ /\ viajero.km \qquad [93]$$

El cálculo de la mayor parte de los costes operativos por plaza kilómetro no plantea grandes dificultades, ya que estos costes están inducidos por el uso del vehículo (mantenimiento, energía, personal) y por ello es fácil conocer el coste por vehículo-kilómetro, y (dividiendo por las plazas del vehículo) por plaza-kilómetro.

Otra ecuación útil para analizar los costes es la siguiente:

$$Coste\ /\ km.tren = (Coste\ /\ plaza.km) \times Plazas\ tren \qquad [94]$$

La medida de los costes externos.- Los costes externos aparecen expresados en muchas ocasiones por viajero-kilómetro (Mayers et al., 2001), (Schreyer et al., 2004) para tener en cuenta las diferencias "estructurales" de aprovechamiento entre los diferentes modos de transporte, lo que puede ser relevante al considerar el

automóvil particular ya que cuando se realiza el cálculo por plaza.kilómetro, resulta beneficiado porque su aprovechamiento real suele ser del orden del 30 a 40 por ciento, frente a los transportes colectivos con aprovechamientos más en la línea del 50 al 75%. En estos casos resultará necesario transformar estos costes a coste por plaza.kilómetro de la forma indicada.

Indicadores empleados en esta tesis.- A la vista de las consideraciones anteriores, los indicadores de costes empleados en la presente tesis serán dos:

- Coste por unidad de oferta, que se expresará en céntimos euro por plaza kilómetro. Es de destacar que se empleará esta unidad (y no la de céntimos de euro por unidad de superficie útil del vehículo y kilómetro que sería la equivalente a la empleada en el estudio de la energía) ya que sobre el uso de esta unidad sí que existe un consenso internacional extendido entre todos los modos de transporte. La internalización del factor logístico "densidad de plazas" no tiene grandes implicaciones ya que, como se ha comprobado, en el ferrocarril no existen grandes diferencias de densidad de plazas entre vehículos. Las diferencias se producen entre los vehículos de diversos modos de transporte, y en el terreno de los costes de explotación no se van a realizar comparaciones intermodales en esta tesis.
- Coste por unidad de demanda, que se expresará en céntimos de euro por viajero- kilómetro ortodrómico.

3.1.6. Delimitación y clasificación de los costes operativos y de los costes de explotación

➢ Costes operativos

Como se deduce del análisis del flujo económico en el sector del transporte, los costes del operador del servicio de viajeros pueden desagregarse en tres grupos principales:

a) Costes de producción de la empresa operadora de servicios de transporte
b) Costes financieros pagados a entidades de crédito, y la remuneración a sus accionistas.
c) Impuestos y "premios" pagados a la administración.
d) Canon y otros pagos por servicios adicionales, complementarios y auxiliares abonados al administrador de la infraestructura y cobros (de éste o de otros operadores) por penalizaciones o bonificaciones.

En un sentido más estricto, los costes de explotación (como una parte de los costes operativos) comprenden los costes necesarios para mover el tren (costes de tenencia del tren, mantenimiento, energía, personal operativo, comerciales y funcionamiento general de la empresa).

En un sentido amplio hay que incluir también en los costes operativos los costes financieros pagados a terceros y a los accionistas, impuestos, cánones por el uso de la infraestructura y de estaciones, así como pagos por otros servicios.

Enumeración de los costes de operativos

Los costes operativos, en el caso más general, son los necesarios para remunerar los recursos necesarios poder mover el vehículo y transportar a los viajeros con seguridad, comodidad, rapidez y eficiencia.

Se pueden considerar como costes operativos todos los necesarios para prestar un servicio de transporte, incluyendo aquellos costes de la infraestructura que, según la legislación vigente, debe soportar el operador a través del canon.

Pueden considerarse los siguientes:

- Costes derivados de la tenencia o posesión del material rodante (amortización, alquileres, seguros de los vehículos); y costes de capital (ajeno y propio) asociados a dicha tenencia.
- Costes de mantenimiento (preventivo y correctivo y accidental), reparación y limpieza (exterior e interior) y avituallamiento del material rodante. En el mismo capítulo cabe incluir los costes derivados del uso de talleres e instalaciones de inspección, limpieza y avituallamiento
- Costes de la energía de tracción (deduciendo los ingresos percibidos, en su caso, por la venta de energía regenerada) y costes pagados por la comercialización, transporte y distribución de la energía.
- Costes del personal operativo en los trenes (maquinistas, interventores)
- Costes de los servicios a los clientes en tierra y en los trenes (restauración, salas de espera preferente, prensa, aparcamiento, etc.)
- Costes de venta y distribución.
- Costes comerciales y publicidad.
- Costes generales asociados a las actividades anteriores, incluyendo costes del circulante, energía de usos diferentes de tracción y seguridad y vigilancia.
- Costes cargados por el uso de la infraestructura y terminales y por otros servicios prestados por el gestor de la infraestructura en la parte que responden al coste marginal producido en la propia infraestructura.
- Impuestos asociados a las actividades del transporte.

Costes de operación y costes del operador

Los costes operativos (tal y como se han definido) se corresponden aproximadamente (aunque no exactamente) con los costes que soporta la empresa operadora de servicios de transporte en su actividad ordinaria.

Cuando se analiza la cuenta de resultados de la empresa operadora de servicios de transporte, la remuneración del capital propio no forma parte de los costes, sino que es una parte del beneficio del operador que puede repartirse como dividendo o puede retenerse en forma de reservas.

Sin embargo, en un análisis de los costes totales del sistema puede considerarse que el beneficio del operador (al menos en la cuantía necesaria para remunerar "razonablemente" el capital propio) es un coste de capital, semejante al empleado en remunerar el capital ajeno.

Delimitación entre costes y menores ingresos

Existen ciertas partidas económicas en las que puede haber dudas sobre si deben ser consideradas un gasto o un menor ingreso. Hay además ciertos costes que pueden estar cubiertos por ingresos específicos diferentes del propio "billete".

Minoración del importe pagado en taquilla.- En el importe pagado por el viajero en la taquilla, están incluidas ciertas partidas que deben ser deducibles de esta cantidad por no formar parte del ingreso propiamente dicho. Estas partidas son:

- IVA
- Otros impuestos indirectos
- Tasa de seguridad
- Costes de gestión cobrados por la entidad vendedora del billete.

Todas estas partidas deben deducirse de lo pagado por el viajero para obtener el ingreso del operador, y por consiguiente, estas partidas (IVA, impuestos, costes de gestión de venta) no constituyen costes del operador

Ingresos accesorios.- En ocasiones, algunos operadores de transporte cobran (además del servicio de transporte), cantidades por otros conceptos tales como transporte y/o exceso de equipaje; restauración a bordo; acceso preferente; elección de plaza; alquiler de coche o desplazamientos en destino, etc. Partimos de la idea de que estos ingresos, cuando están ligados al propio servicio de transporte, deben ser considerados como parte de los "Ingresos por tráfico", aunque en una categoría que podría denominarse "ingresos accesorios". Cabe la duda de si los gastos correspondientes deben considerarse como parte de los costes operativos.

Nos inclinamos por una respuesta negativa: no se consideran como costes operativos los costes asociados a estas actividades cuando estén diferenciados de los costes operativos directos y son elegibles por el viajero que puede adquirirlos o no (por ejemplo, aprovisionamiento de comidas para venta en ruta, de otros objetos para vender a bordo, o pagos a empresas de alquiler de coches o taxis en destino).

Estructura de costes y precios pagados a proveedores

La empresa operadora de servicios de transporte contrata muchas actividades (cada vez más) a proveedores externos (por ejemplo, el mantenimiento de los trenes)

La producción de la actividad contratada tiene para el prestador una determinada estructura de costes con una parte de los costes fijos y otra parte de costes variables. Por ejemplo,

$$c = f\,(a+bq) \quad [95]$$

El precio pagado por el operador a su proveedor está fijado en el contrato, depende de unas determinadas variables y tiene una estructura concreta fijada por el propio contrato. La estructura del precio debe reflejar la estructura del coste de producción, es decir, la función del precio debe ser del tipo:

$$p = k \times c = k \times f(a+bq) \quad [96]$$

donde k (>1) refleja el beneficio del proveedor del servicio

Si la estructura del precio no es la misma que la del coste (por ejemplo, si el coste tiene un componente fijo alto y el precio es solo variable) cuando cambia la cantidad suministrada, se produce un desequilibro que penaliza a uno de los dos actores. El precio que no refleja el coste puede enviar señales inadecuadas, ofrece incentivos para comportamientos no eficientes.

Desde el punto de vista del análisis del coste y su relación con la velocidad, se estudia en esta presentación la estructura del coste, aunque si los precios están distorsionados por tener una estructura diferente de la del coste, el OST puede "ver" unos costes diferentes de los reales.

➢ Costes de explotación

Ya se ha indicado que consideramos como *costes de explotación* una parte de los costes operativos, que sería la integrada por todos los que son necesarios para mover el tren en sus condiciones normales de funcionamiento para prestar el servicio de transporte.

En los costes de explotación no se incluyen los costes operativos relacionados con los servicios de pasajeros y las ventas, ni tampoco incluyen los costes de explotación la parte del canon que excede el coste marginal del uso de las infraestructuras.

Sí se incluyen en los costes de explotación los costes de capital que resultan necesarios para remunerar a los recursos económicos utilizados en la compra de los trenes. Los costes incluyen pues, los costes financieros (remuneración del capital externo), y la remuneración del capital propio con el mismo tipo de interés que el capital externo. Esto se hace para incluir los costes de capital con independencia de de la estructura financiera. Ello también hace posible poner al mismo nivel los trenes adquiridos que los trenes alquilados.

Costes operativos que no se consideran costes de explotación.- Hay ciertos costes que, formando parte de los costes operativos, no son costes de explotación de acuerdo con la definición anterior. Pueden mencionarse tres grandes grupos de costes con estas características:

Los costes comerciales, de venta y los servicios a los viajeros a bordo del tren o en tierra. Incluyen la comisión de ventas a los distribuidores, las comidas a bordo incluidas en la tarifa, el seguro obligatorio de viajeros, etc.

- Los costes generales de empresa operadora, tales como su personal directivo, oficinas, etc.
- Los impuestos, tasas y premios pagados a la administración
- Los pagos por el uso de infraestructuras en la cuantía que excede por encima del coste marginal directo producido por el tren o el viajero de que se trate. En realidad, éstos son costes del operador pero no son costes desde el punto del sistema, puesto que se trata de transferencias internas entre agentes y sirven para compensar parcialmente otros costes del sistema o costes económico-sociales no cubiertos.

En la figura **60** aparece una clasificación completa de los costes operativos, indicando cuáles se consideran de explotación y cuáles no, incluyendo dos niveles de detalle.

Tabla 60. **Relación de componentes del coste operativo y del coste de explotación**

i) Costes de explotación	1	Costes de propiedad del tren	*1.a*	Amortización del tren
			1.b	Costes del capital propio y ajeno
			1.c	Seguros del tren
	2	Mantenimiento del material y limpieza	*2.a*	Costes fijos de mantenimiento del tren
			2.b	Coste variable taller
			2.c	Coste fijo taller
			2.d	Coste variable mantenimiento taller
			2.e	Coste de limpieza interior y exterior
	3	Energía	*3.a*	Energía de tracción
			3.b	Energía devuelta a la red (negativa)
			3.c	Energía para auxiliares
	4	Costes del personal operativo	*4.a*	Personal operativo del tren (maquinista)
			4.b	Personal de acompañamiento
	5	Coste marginal de infraestructura	*5.a*	Coste marginal de infraestructura
ii) Costes operativos que no se consideran costes de explotación	6	Distribución (ventas) y control de accesos	*6.a*	Distribución y ventas (parte fija)
			6.b	Distribución y ventas (parte variable)
			6.c	Comisiones de agencia (incluidas en el billete)
			6.d	Control de accesos
	7	Servicios al viajero	*7.a*	Servicios al viajero (por viajero)
			7.b	Servicios al viajero (parte variable por tren)
			7.c	Asistencia al viajero
			7.d	Seguro de viajeros
	8	Publicidad	*8.a*	Publicidad y promociones
	9	Generales y estructura	*9.a*	Gastos generales y de estructura
	10	Costes del circulante, bancarios y de tarjetas	*10.a*	Intereses del capital circulante
			10.b	Gastos bancarios y de tarjetas de fidelización
	11	Cánones de estaciones y seguridad	*11.a*	Canon de estaciones por viajero (s/marginal)
			11.b	Tasa de seguridad *(puede ser menor ingreso)*
	12	Cánones de infraestructura por encima del coste marginal	*12.a*	*Canon fijo por acceso*
			12.a	*Canon por viajero*
			12.c	*Canon por plaza.km*
			12.d	*Canon por estacionamiento*
			12.e	*Canon por uso de estaciones*
	13	Impuestos	*13.a*	*Impuestos y premios a pagar a la administración*

Fuente: Elaboración propia

3.2. La función de costes de explotación en el transporte de viajeros por ferrocarril

La función de costes de explotación debe expresar estos costes por agregación de sus diferentes componentes y cada uno de ellos en relación con las variables de las que dependen.

La velocidad como variable independiente.- De acuerdo con el propósito de la tesis, los costes de explotación tendrán necesariamente como variable independiente la velocidad del servicio (en sus diversas formas) y se calcularán los coeficientes de la función de costes para cada uno de los cuatro sistemas ferroviarios que se analizan: alta velocidad (LAV); convencional mejorado (LCM); convencional de tracción eléctrica (LCe); y convencional de tracción diésel (LCd).

Además, se emplearán en cada caso (y como se hizo en el análisis de la energía) los valores extremos (el más favorable y el más desfavorable) de entre los verosímiles, y también el valor más representativo. Todo ello con el objetivo de encontrar el rango en el que se puede mover el resultado.

Con carácter previo se presentarán algunas explicaciones necesarias para comprender la forma de valorar el coste de adquisición de un tren y su producción anual, que son elementos básicos para conocer el coste de explotación.

Además de la velocidad, otras variables con gran peso en la función de costes son tamaño del tren (con elasticidad negativa); el tiempo de rotación en cabeceras (elasticidad positiva); la política de atención a las puntas de tráfico (elasticidad positiva); y la densidad de plazas (elasticidad negativa).

3.2.1. Componentes y características de la función de costes de explotación

Componentes del coste de explotación.- El coste total de explotación se obtendrá sumando los costes que lo integran:

- Amortización del material rodante (vehículos).
- Remuneración del capital invertido en la adquisición de los vehículos.
- Coste de los daños propios y a terceros.
- Mantenimiento y limpieza.
- Costes de la energía para el movimiento del tren y sus servicios auxiliares.
- Costes de personal operativo.
- Coste marginal del uso de la infraestructura.

$$Cex = Amort + Cfinan + Cdaños + Cmant + Ceneg + Cpers + Cmain \quad [97]$$

Divisores de la función de costes.- En primer lugar se expresará el coste por unidad de oferta (céntimos de euro por plaza.kilómero), y posteriormente (teniendo en cuenta los factores logísticos *aprovechamiento* y el *coeficiente de trayectoria*) se expresará el coste por unidad de demanda (céntimos de euro por viajero.kilómetro ortodrómico) que es, como se ha señalado, un indicador más adecuado para las comparaciones entre sistemas ferroviarios (alta velocidad y convencional, por ejemplo) o con otros modos de transporte.

El coste por unidad de demanda se obtiene dividiendo el coste por unidad de oferta por el *aprovechamiento*, y multiplicando el resultado por el *Coeficiente de trayectoria:*

$$Coste/viaj.km_{ortd} = Coste/plaza.km \times \frac{1}{Aprovech.(v.km/p.km)} \times CT(km/km_{ortod}) \quad [98]$$

3.2.2. Consideraciones previas: coste de adquisición del tren y su producción anual

Para formular la función de costes de explotación es preciso disponer del coste de adquisición de un tren, y también es necesario conocer la producción que ese tren realiza en un año.

➢ Coste de adquisición de un tren (valor inicial)

Las cuotas de amortización del tren son independientes de la tasa de inflación. Por ello, dos trenes idénticos pero comprados en momentos distantes en el tiempo, tuvieron diferentes costes de adquisición, y por lo tanto, tienen cuotas de amortización y costes de capital diferentes (pese a ser idénticos). Como el propósito de este trabajo es aportar ideas de validez general, es preciso "objetivar" el precio del tren ya que la aplicación de valores concretos obtenidos de la realidad podría sesgar el resultado dependiendo de cuál haya sido el momento de compra del tren.

El precio de adquisición de un tren depende de la situación de oferta y de demanda en el mercado, pero partiendo de los precios observados en un determinado número de operaciones de compra, puede ajustarse una fórmula que ofrezca al menos una idea aproximada del precio esperable para un tren de determinadas características.

La fórmula para estimar el coste de adquisición (en 2010) de un nuevo tren (o su valor inicial), de acuerdo a diversas variables (masa, potencia, número de plazas, etc.), según (García Álvarez, 2010f) es la siguiente:

$$TP = 150.000 \times C + 26.500 \times M + 1.000 \times P + 25.000 \times NM + 6.000 \times p \times CC \quad [99]$$

donde: TP es el coste de adquisición del tren [euros de 2010]; C: es el número de cabinas de conducción (normalmente, son dos cabinas por tren); M es la masa en vacío [t]; P es la potencia continua [kW]; NM es el número de motores; p es el número de plazas; CC es un "coeficiente de confort" de cada plaza (por ejemplo, 0,8 en clase turista, 1 en clase preferente y 1,5 en primera clase).

A esta cantidad hay que añadir, en su caso, recargos por disponer de varios sistemas de seguridad o por ser trenes multicorriente, así como por realizar la compra en una serie corta. En esta tesis solo se considera (por ser el único que puede ser diferente en relación con la velocidad) un recargo de 540.000 euros$_{2010}$ por tren en el sistema de alta velocidad; pues este es, aproximadamente, el sobrecoste que tienen los sistemas de señalización, comunicaciones y de protección del tren (ATP) requeridos para operar en el sistema de alta velocidad frente a los requeridos en los sistemas convencionales.

Relación entre coste de adquisición del tren y su velocidad máxima

De los términos que aparecen en la ecuación anterior, solamente la potencia tiene una relación directa con la velocidad.

Ya se mostró que para un tren de ocho coches (es decir, de unos 200 metros de longitud), la potencia necesaria se relaciona con la velocidad máxima a través de la fórmula:

$$P[kW] = 4{,}46 \times V_{\max}^{1{,}31}[km/h] \quad [100]$$

Para otros tamaños de tren se puede suponer que la potencia crece algo menos que proporcionalmente con el tamaño del tren (recuérdese que una parte de la resistencia aerodinámica al avance aumenta proporcionalmente a la sección transversal del tren que es independiente de su longitud). Puede estimarse (García Álvarez, 2010b) que la que siguiente ecuación refleja la potencia necesaria para un tren de L metros de longitud:

$$P[kW] = \frac{L[m]-15}{215} \times 4{,}46 \times V_{\max}^{1.31}[km/h] \quad [101]$$

Para calcular el número de motores, se puede suponer (solo a los efectos de simplificar el modelo) que la potencia de cada motor es de 2.000 kW, y el número de motores, por tanto, sería el siguiente:

$$NM = \frac{P[kW]}{2.000} \quad [102]$$

Otra simplificación sería considerar una tara del tren de 2,1 a 2,4 toneladas por metro lineal para un tren no articulado de tracción concentrada.

Sustituyendo los valores anteriores (y suponiendo que el tren tiene dos cabinas de conducción y un coeficiente de confort de 1) puede expresarse el coste de adquisición del tren en función de su longitud, de su número de plazas y de su velocidad máxima con las siguientes fórmulas:

- Para el sistema de alta velocidad (LAV), incluyendo el sobrecoste del sistema de protección del tren:

$$TP = (690.000) + (58.300 \times L) + \left(1.012 \times \frac{L-15}{L} \times 4{,}46 \times V_{\max}^{1{,}31}\right) + (6.000 \times p) \quad [103]$$

- Y para trenes de los sistemas convencional mejorado y convencional.

$$TP = (150.000) + (58.300 \times L) + \left(1.012 \times \frac{L-15}{L} \times 4{,}46 \times V_{\max}^{1{,}31}\right) + (6.000 \times p) \quad [104]$$

Variabilidad observada en los costes de adquisición

A fin de conocer los valores más favorables y más desfavorables del coste de adquisición de los trenes, se ha aplicado la fórmula anterior a diversos trenes españoles adquiridos en los últimos años (1990-2008). No se ha realizado el análisis con trenes más antiguos por la falta de datos fiables y homogéneos sobre su coste de adquisición, y porque se ha podido comprobar (utilizando los pocos datos de costes disponibles) que se ha producido un alza muy importante en los precios si se comparan con los de los trenes adquiridos en las décadas de los años 70 y 80 del siglo XX, incluso teniendo en cuenta la variación de precios en el periodo. Ello hace que tales datos no resulten relevantes en el entorno actual.

Para tener en cuenta los diferentes contextos de mercado en los que se ha producido la compra de los trenes que se analizan, y la diferencia del número de unidades que integran cada lote de compra (lo que tiene mucha repercusión en el coste de los trenes, y más aún en España donde las compras son de series muy cortas), se han considerado como lotes de tamaño normal los comprendidos entre 15 y 30 unidades, y se aplicado en consecuencia, un "coeficiente de series largas" a los trenes que se han adquirido en lotes de más de 30 unidades.

Los resultados son los que se indican en la tabla 61.

Tabla 61. **Comparación entre los costes de adquisición reales de diversos trenes y los estimados con el modelo**

	LAV								LCM	Lce	LCd
Serie tren	s100	s103	s104	s112	s114	s120	s121	s130	490	449	598
Coste adquisición ($M€_{corrientes}$/tren)	12,772	27,890	13,220	22,470	13,220	13,000	13,930	16,720	7,450	5,770	5,350
Coste actualiz. 2010($M€_{2010}$/tren)	**27,20**	**30,12**	**14,28**	**24,27**	**14,28**	**14,04**	**15,04**	**18,06**	**8,05**	**6,23**	**5,78**
Características											
Número de cabinas	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Masa en vacío (toneladas)	392	425	222	322	229	252	322	312	159	172	157
Velocidad máxima (km/h)	300	350	250	330	250	250	250	250	220	160	160
Longitud (m)	200	200	107	200	108	107	107	180	81	99	76
Potencia continua (MW)	8,00	8,80	4,40	8,00	4,00	4,00	4,00	4,80	1,95	2,40	1,40
Numero de motores (NM)	8	16	8	8	8	8	8	8	4	6	4
Numero de plazas Club (p)	38	30	0	45	0	0	0	0	0	0	0
Numero de plazas Preferente (p)	78	103	31	83	0	82	0	63	0	0	0
Numero de plazas Turista (p)	213	271	206	237	179	156	281	236	161	261	190
Coeficiente series largas (CC)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,70	0,70
Recargo señalización ERTMS (k€)	540	540	540	540	540	540	540	540	0	0	0
Resultados											
Coste adquisición tren (M€/tren)	**25,62**	**28,29**	**14,78**	**24,00**	**13,96**	**15,20**	**16,92**	**18,21**	**8,31**	**6,90**	**5,30**
Coste estimado / coste real	**0,94**	**0,94**	**1,04**	**0,99**	**0,98**	**1,08**	**1,12**	**1,01**	**1,03**	**1,11**	**0,92**

Costes en euros de 2010
Elaboración propia

Como puede apreciarse, el valor más desfavorable corresponde al tren de la serie 103 en el que el cociente entre el coste calculado y el coste real es de 0,94; mientras que el más favorable corresponde al tren de la serie 121, cuyo cociente se sitúa en 1,12.

Valores del coste de adquisición de los trenes empleados en el modelo

Para que las comparaciones entre trenes de diferentes sistemas no presenten el sesgo derivado de un diferente tamaño (recuérdese que también en los costes de explotación se aprecian economías de tamaño: mayor tamaño del tren supone menores costes unitarios), se definen para el estudio unos trenes de capacidad y arquitectura homogénea. Los valores e hipótesis anteriores conducen a los valores indicados en la tabla 62, para trenes de 450 metros cuadrados de superficie útil, de 200 metros de longitud, no articulados y de tracción concentrada.

Tabla 62. **Coste de adquisición de trenes de la misma capacidad en sistemas ferroviarios de alta velocidad y convencional**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Características del tren representativo				
Velocidad máxima (km/h)	300	200	160	160
Número de cabinas	2	2	2	2
Masa (t)	365	427	451	454
Potencia (kW)	7.841	4.610	3.441	3.441
Numero de motores	4	6	8	8
Número de asientos	387	400	436	436
Coeficiente de confort	1,1	1,1	1,1	1,1
Recargo sistema de señalización ($€_{2010}$)	540.000	0	0	0
Costes de adquisición del tren obtenidos con la fórmula del modelo y con las características anteriores				
Valor más desfavorable	24,6	22,9	19,3	19,3
Valor más representativo	21,0	22,9	22,6	22,7
Valor más favorable	18,7	17,4	17,2	17,3

Costes en euros de 2010 para un tren de 200 metros de longitud y 450 metros cuadrados útiles
Elaboración propia

➢ Producción anual de un tren

Un tren (cuya tenencia o posesión supone un coste, como se expondrá seguidamente) produce una determinada cantidad de plazas.kilómetro en un periodo de tiempo (por ejemplo, en un año). Como el coste debe expresarse en unidades monetarias por plaza.kilómetro producida, es necesario conocer (o estimar) la producción anual de un tren para calcular el coste por unidad de oferta.

La producción anual de un tren (medida en plazas.kilómetro) se obtiene multiplicado el número de plazas del tren (p, que es un dato para cada tipo de tren) por la distancia recorrida en un año en servicios comerciales (RA), expresada en kilómetros.

La distancia anual recorrida por un tren depende (además de otras variables) del *número medio de horas diarias de servicio comercial* (H_t). Se incluyen este concepto: el tiempo de viaje y el de rotación en las cabeceras del recorrido, pero no

se incluye el tiempo empleado en desplazamientos a talleres, en movimientos en vacío, el de disponibilidad sin servicio, etc.

Seguidamente se irán calculando cada uno de los indicadores necesarios para estimar la producción anual de un tren.

Horas diarias de uso del tren (*Ht*)

El valor de las *horas diarias de uso del tren* (H_t) depende de la velocidad, de la estacionalidad de la demanda, de la frecuencia del servicio, de la política de oferta en las horas punta, así como de la política de reservas y mantenimiento.

Como puede comprenderse, la determinación del valor de Ht (que indirectamente condiciona el número de trenes necesarios para atender un determinado servicio) es un problema complejo y de la máxima importancia, pero que corresponde al ámbito de la explotación técnica. En esta tesis únicamente podremos ofrecer algunas ideas acera de cuáles son las variables de la que depende a modo de "pinceladas" sobre la cuestión y los valores que puede adoptar en diversas condiciones de explotación. En (García Álvarez et al., 1998) puede encontrase más información.

El número de horas de uso comercial de un vehículo en un día aumenta:

- Al crecer el intervalo o *amplitud del horario de servicio* (entendiendo por amplitud del horario la diferencia en tiempo desde la primera salida de un día hasta la última salida del mismo día, por ejemplo desde las 6:00 hasta las 21:00).
- Al disminuir la *estacionalidad de la demanda* (especialmente la estacionalidad diaria), o al decidir el operador aplicar una política de reducida atención a las puntas, optado por una oferta más uniforme a lo largo del día. Esta última estrategia es la adoptada por las aerolíneas "low cost", y probablemente sería la aplicada por operadores ferroviarios de este tipo.
- Al adoptarse una política de mantenimiento tendente a realizar las operaciones que requieren inmovilización fuera del intervalo del horario de servicio, y disponiendo de la posibilidad de corrección inmediata de las averías en ruta o en el andén.
- Al poder atender con el mismo tren diversas rutas, especialmente si éstas tienen estacionalidades complementarias (por ejemplo, rutas cuyo motivo de desplazamiento fundamental es asistir al trabajo o reuniones de negocios con rutas con desplazamiento fundamental por ocio,...)
- Al aumentar la frecuencia combinada de las diversas rutas atendidas (hasta un cierto valor, por encima del cual las horas de uso medio tienden a descender ligeramente).

En alta velocidad, normalmente los volúmenes de tráfico hacen posible una mayor frecuencia y una mayor amplitud del horario de servicio, por lo que las *horas de uso al día* del cada tren tienden a ser mayores que en servicios convencionales de menor frecuencia. Los trenes diésel tienen, en general, una menor disponibilidad, por lo que su número de horas de uso al día son algo más reducidas.

En la tabla 63 pueden encontrarse valores extremos y representativos tomados de la experiencia. Para más datos puede consultarse (García Álvarez et al., 1998).

Tabla 63. **Horas de uso diario del vehículo según el tipo de sistema ferroviario y la política de atención a las puntas de tráfico**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Operador con política comercial de atención a las puntas de trafico				
Valor más desfavorable	5,5	5,2	5,0	4,5
Valor más representativo	**7,0**	**6,7**	**6,4**	**5,9**
Valor más favorable	7,5	7,2	6,9	6,4
Operador con política comercial de no atención a las puntas de trafico (*low cost*)				
Valor más desfavorable	6,5	6,0	5,8	5,5
Valor más representativo	**8,0**	**7,5**	**7,2**	**7,0**
Valor más favorable	8,5	7,9	7,7	7,5

Elaboración propia

Una interesante reflexión sobre la importancia en los resultados económicos de la explotación de las horas diarias de uso de los vehículos destinados al transporte (en este caso, de los aviones) puede encontrarse en (Seristö & Vepsäläinen, 1997).

Tiempo empleado en el viaje y en la rotación

El tiempo empleado por un tren en el viaje comercial entre su origen y destino y en su rotación es:

$$Tiempo\ empleado\ en\ el\ viaje\ y\ rotación = \frac{D \times 60}{V_{com}} + R \quad [105]$$

donde); D es la distancia de viaje [km]; V_{com} es la velocidad comercial [km/h]; y R es el tiempo de rotación [min]

Por ejemplo, para un tren regional de alta velocidad (Avant) entre Madrid y Valladolid (D=179 kilómetros) con una velocidad comercial media ($Vcom$) de 175 kilómetros por hora y con un tiempo de rotación en las cabeceras de R=30 minutos, el tiempo empleado en el viaje y rotación es de [(179x60)/175]+30=91 minutos.

Para un tren regional convencional entre Madrid y Valladolid (D=249 kilómetros) con una velocidad media de 95 kilómetros por hora y un tiempo de rotación de R=30 minutos, el tiempo empleado en el viaje y la rotación es de [(249x60)/95]+30=187 minutos

Distancia anual recorrida por el tren

El número de viajes que un tren puede hacer en un día medio (en el cual opera en un total de H_t horas) es:

$$Viajespordía(T/D) = \frac{H_t \times 60}{R + \frac{D \times 60}{V_{com}}} \qquad [106]$$

Y, como consecuencia, la distancia anual recorrida (RA) [km] resulta:

$$Dist.anual\,(RA) = (365 \times 60) \times \frac{V_{com} \times H_t \times D}{(R \times V_{com}) + (D \times 60)} \qquad [107]$$

donde: T/D es el número de viajes (de un sentido) que el tren puede hacer en un día; y RA es la distancia anual recorrida por el tren en servicios comerciales [km]

En el ejemplo del Avant de Madrid a Valladolid, y con 7 horas de uso diario, un tren recorrería al año RA=300.320 kilómetros, mientras que en el caso del regional de Madrid a Valladolid, el recorrido anual de un tren sería de RA=196.472 kilómetros. Un aumento de la velocidad media del 84% y una reducción de la distancia del 28%, con el mismo tiempo de rotación supone un aumento del recorrido medio anual del 52% (y por ello, un aumento de la productividad del vehículo a igualdad de plazas).

Puede observarse que la distancia anual recorrida (RA) aumenta casi proporcionalmente con la velocidad media ($Vcom$), con las horas diarias de uso (Ht) y con la distancia (D); y que se reduce cuando aumenta el tiempo de rotación (R).

En la tabla 64 se muestra la distancia anual recorrida por los trenes representativos de cada uno de los sistemas. La *velocidad comercial* (para cada sistema y en su valor más favorable, representativo y más desfavorable) se ha calculado empleando los mismos valores de la *velocidad media sin tiempo de paradas* adoptados para el análisis de los consumos energéticos, que se ha convertido en velocidad comercial considerando los valores expuestos de la distancia entre paradas, y un tiempo medio de 2,5 minutos por cada parada comercial o técnica.

Debe observarse que aquí se ha considerado como valor más favorable de la velocidad el mayor de entre los posibles (que es el que conduce a un mayor recorrido anual), mientras que en el caso del consumo de energía se había tomado como valor más favorable el de menor velocidad, ya que en lo que se refiere a la energía la elasticidad es positiva.

Para las horas de uso de diario se toma como valor más desfavorable (para cada sistema) el valor de las horas del operador que tiene la política de atender las puntas de tráfico, y como más favorable el valor del operador que no atiende las puntas de tráfico (que es el valor que conduce al menor coste). Como valor más representativo se toma la media de los valores representativos de los dos tipos de operadores.

Se toma como valor de distancia del viaje más representativa la de 500 kilómetros, y las 350 y 650 kilómetros como más desfavorable y más favorable respectivamente (para distancias más cortas el coste por kilómetro es mayor). Para el tiempo de rotación se toman los valores de 75 minutos como más desfavorable, de 50 minutos como más representativo, y 25 de minutos como más favorable.

Tabla 64. **Distancia anual recorrida por diversos trenes de la misma capacidad y arquitectura**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Velocidad media sin tiempo de paradas (km/h)				
Valor más desfavorable	187	117	97	97
Valor representativo	**210**	**152**	**110**	**110**
Valor más favorable	236	169	119	119
Velocidad comercial Vcom [km/h]				
Valor más desfavorable	175	107	88	88
Valor representativo	**200**	**141**	**102**	**102**
Valor más favorable	225	157	109	109
Horas de uso diario Ht [h]				
Valor más desfavorable	5,5	5,2	5	4,5
Valor representativo	**7,5**	**7,1**	**6,8**	**6,45**
Valor más favorable	8,5	7,9	7,7	7,5
Longitud del viaje D [km]				
Valor más desfavorable	350	350	350	350
Valor representativo	**500**	**500**	**500**	**500**
Valor más favorable	650	650	650	650
Tiempo de rotación R [min]				
Valor más desfavorable	75	75	75	75
Valor representativo	**50**	**50**	**50**	**50**
Valor más favorable	25	25	25	25
Recorrido anual por tren RA [km]				
Valor más desfavorable	216.015	146.786	121.966	109.769
Valor representativo	**410.625**	**296.543**	**216.111**	**204.987**
Valor más favorable	609.507	411.813	285.541	278.125

Nota: Los resultados están expresados en kilómetros por tren y año.
Fuente: Elaboración propia

Producción anual de un tren

Una vez que se conoce la distancia anual recorrida por un tren (calculada en kilómetros), la producción [plazas por kilómetro] de ese tren en un año se obtiene multiplicando la distancia anual recorrida (RA) en kilómetros, por el número de plazas del tren (p), que su vez el es producto de la superficie útil (Su) por la densidad de plazas (Dp).

$$\text{Pr}\,oducción\,[\,p.km\,] = RA \times (Su \times Dp) = RA \times p \qquad [108]$$

Por tanto, la producción anual del tren aumenta al crecer el recorrido anual (RA) y al aumentar su capacidad (p)

En la tabla 65 pueden ver los valores de la producción anual de los trenes representativos de acuerdo con las hipótesis y con los resultados anteriores.

Tabla 65. **Producción anual de cada tren**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Recorrido anual por tren RA [km]				
Valor más desfavorable	216.015	146.786	121.966	109.769
Valor representativo	**410.625**	**296.543**	**216.111**	**204.987**
Valor más favorable	609.507	411.813	285.541	278.125
Densidad de plazas (Ds) [p/m2)				
Valor más desfavorable	0,77	0,85	0,87	0,80
Valor más representativo	**0,86**	**0,89**	**0,97**	**0,87**
Valor más favorable	1,58	0,93	1,09	0,93
Capacidad de un tren de Su=450 m^2 [p]				
Valor más desfavorable	347	383	392	360
Valor más representativo	**387**	**401**	**437**	**392**
Valor más favorable	711	419	491	419
Producción anual del tren [kplazas.km] por tren y año				
Valor más desfavorable	74.849	56.146	47.750	39.517
Valor representativo	**158.912**	**118.765**	**94.332**	**80.253**
Valor más favorable	433.360	172.344	140.058	116.395
Rango más desfavorable/más favorable	*0,173*	*0,326*	*0,341*	*0,340*
Comparación (valor representativo) con LAV	*1,000*	*0,747*	*0,594*	*0,505*

Nota: Los resultados están expresados en miles de plazas.kilómetro al año por cada tren de 450 metros cuadrados de superficie útil.

Fuente: Elaboración propia

Coste de adquisición del tren por unidad producida en el año

Podríamos definir un indicador que resulta muy útil en el análisis de costes como resultado de la división del coste de adquisición del tren por su producción (medida en plazas.kilometro) en un año.

Este indicador tiene un gran interés, ya que como se expondrá más adelante, el coste unitario de amortización, de capital y del seguro es proporcional a este cociente. Por otra parte, este indicador permite comprobar de una forma sintética el efecto de la velocidad en los costes relacionados con la tenencia del tren, ya que este efecto no es evidente: a mayor velocidad, mayor coste de adquisición del tren; pero mayor velocidad también implica mayor producción del tren a lo largo de su vida útil. Este indicador permite conocer cuál de los dos efectos contrapuestos tiene más peso.

Los valores de este indicador que aparecen en la tabla 66 muestran que siempre tiene mayor peso en el resultado el aumento en la producción que el aumento en el coste. Por ello, el tren resulta en todos los casos más eficiente (desde este punto de vista) en los sistemas de mayor velocidad. Es decir, a medida que aumenta la velocidad, cada tren tiene un coste de adquisición algo mayor, pero crece más la producción anual y por ello, el coste por cada unidad producida desciende claramente.

Tabla 66. **Coste de adquisición del tren por unidad producida en el año**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (c€/p.km)	32,80	40,70	47,26	57,34
Valor representativo (c€/p.km)	**13,19**	**16,43**	**20,43**	**24,11**
Valor más favorable (c€/p.km)	4,32	10,11	12,28	14,84
Rango más desfavorable/más favorable	*7,593*	*4,026*	*3,847*	*3,863*
Comparación (valor representativo) con LAV	*1,000*	*1,245*	*1,548*	*1,827*

Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro producida en un año.
Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis de la relación con la velocidad de cada uno de los costes de explotación

Como se ha indicado anteriormente, consideramos como *costes de explotación* aquellos *costes operativos* que son necesarios para el movimiento del tren y para el transporte de los viajeros en sus condiciones normales de funcionamiento.

Son *costes de explotación* diversos costes relacionados con la tenencia del tren (amortización, costes de capital y del seguro), así como los costes de mantenimiento y limpieza, energía, personal operativo y el coste marginal del uso de la infraestructura.

3.3.1. Costes relacionados con la posesión o tenencia del tren

Para realizar el servicio ferroviario es imprescindible poder disponer de los vehículos (locomotoras, coches o trenes autopropulsados) en los que se va a realizar el transporte. Genéricamente denominaremos "tren" al material rodante o vehículo.

Esta posibilidad de disponer del tren se puede concretar en virtud de diversos títulos jurídicos: propiedad, alquiler simple del vehículo, renting, alquiler con mantenimiento, etc. En cualquiera de los casos, la posesión o tenencia de los trenes comporta unos costes económicos.

La designación de estos costes (amortización, renta,…) y el lugar que ocupan en la cuenta de resultados del operador (incluido o no en el EBIDTA) es diferente según cuál sea el título que habilita al operador a disponer del vehículo; pero el coste incurrido (e incluso su magnitud) es relativamente independiente del negocio jurídico. En aras de la simplicidad vamos a exponer el caso (frecuente en el ferrocarril) en el que el operador es propietario del material, y por ello el coste de la tenencia del material rodante se concreta en cuotas de amortización y costes de capital. Si el tren fuera alquilado, el concepto sería semejante (aunque el coste aparecería en forma de rentas pagadas por el alquiler).

La propiedad de un tren comporta tres grupos de costes:

- Costes de amortización
- Coste financiero del capital invertido (propio y ajeno)
- Seguro del tren

Estos tres componentes del coste se presentan en el caso en que se adquiera el tren en propiedad. En el caso de alquiler, podría ser un coste único: la cuota de alquiler (incluido el beneficio de la empresa de alquiler, la cual incluye el riesgo derivado de la falta de uso).

Cada uno de estos elementos de coste se analiza a continuación:

➢ Coste amortización del tren

El coste anual de amortización del tren depende de cuatro factores, que son: su valor inicial (que coincide con el precio de adquisición), el período de amortización, su valor residual transcurrido ese periodo, y el criterio con el se imputa la amortización.

En el entorno ferroviario europeo se utiliza normalmente el método de amortización lineal sin valor residual por un período de, aproximadamente, 25 años; pero también podrían ser aceptables otros criterios de amortización, como cualquier período entre 20 y 30 años; o un periodo de 15 años pero con un valor residual significativo.

Consideremos, para presentar un ejemplo, un periodo de amortización de 25 años, sin valor residual y con amortización lineal.

El coste anual de la amortización del tren responde a la siguiente fórmula:

$$CuotaanualAmortización = \frac{TP - RV}{YR} \qquad [109]$$

donde: TP es el coste de adquisición del tren [€]; YR, es el número de años de amortización y RV es el valor residual [€]. En el ejemplo, RV=0 y TY=25, y considerando un sistema de amortización lineal:

$$CuotaanualAmortización = \frac{TP - 0}{25} = \frac{TP}{25} \qquad [110]$$

Y en este supuesto el coste anual de amortización por plaza.kilómetro producida responde a la expresión:

$$CosteAmortización = \frac{TP - RV}{YR} \times \frac{1}{RA \times p}$$

Como puede observarse, el coste anual absoluto de amortización es un porcentaje del coste de adquisición del tren. Este porcentaje no tiene relación alguna con el sistema de alta velocidad ni con la velocidad del tren (únicamente depende del periodo y del criterio de amortización y del valor residual). Sin embargo, sí tiene una fuerte relación con la velocidad el divisor utilizado para convertir el coste absoluto (€/año) en coste específico (€/plaza.km año). Como se ha mostrado, la producción anual del tren (RA) aumenta con la velocidad, y el coste amortización por plaza.kilómetro disminuye con la velocidad.

En la tabla 67 aparece cuantificado el coste de amortización del tren por plaza kilómetro en cada uno de los sistemas y para los valores más favorable, más desfavorable y representativo.

Tabla 67. **Coste de amortización del tren por plaza kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (c€/p.km)	1,312	1,628	1,890	2,293
Valor representativo (c€/p.km)	**0,528**	**0,657**	**0,817**	**0,964**
Valor más favorable (c€/p.km)	0,173	0,404	0,491	0,594
Rango más desfavorable/más favorable	*7,6*	*4,0*	*3,8*	*3,9*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*1,25*	*1,55*	*1,83*

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

➢ Costes de remuneración del capital propio y ajeno

El coste del capital es el coste necesario para remunerar fondos económicos propios (que son aportados por los accionistas) y los fondos ajenos (aportados por bancos y otras entidades financieras) que son necesarios para la adquisición del tren.

La remuneración del capital propio no aparece como un gasto en la cuenta de resultados de la empresa, sino que se paga con cargo al resultado positivo o beneficio. En condiciones normales de funcionamiento de la empresa, el capital propio también debe ser remunerado, y dicho capital tiene un coste de oportunidad que puede considerarse semejante a la tasa aplicada al capital ajeno invertido. Por ello, para calcular los costes de remuneración del capital, a estos efectos podemos suponer que todo el capital es ajeno.

Es preciso considerar que, como se va produciendo una amortización lineal, el saldo neto a financiar va siendo cada vez más reducido y por ello el coste del capital va disminuyendo.

Asumiendo un tipo "*r*" [tanto por uno] para el interés anual, el coste del capital (CC) [€] para el año "Y" será:

$$CC_Y = r \times \left[TP - Y \times \frac{TP - RV}{YR} \right] \qquad [111]$$

Si suponemos r=0,06; RV=0; e YR=25

$$CC_Y = 0{,}06 \times \left[TP - Y \times \frac{TP}{25} \right] \qquad [112]$$

En el año promedio del periodo de amortización (en este caso, Y=12,5), el coste anual de capital sería:

$$CC = 0{,}06 \times \left[TP - 12{,}5 \times \frac{TP}{25} \right] = 0{,}06 \times 0{,}5 \times TP = 0{,}03 \times TP \qquad [113]$$

Es decir, el coste de capital se puede suponer como un porcentaje del coste de adquisición del tren. Con las hipótesis formuladas, este porcentaje es la mitad del tipo de interés, es decir, un tres por ciento anual. Podemos suponer como valor más desfavorable un tipo medio de interés el 8 por ciento (que conduce a un porcentaje

medio del 4 por ciento) y como valor más favorable del tipo de interés 5 por ciento (que supone un porcentaje del 2,5 por ciento).

La repercusión de este valor por plaza.kilómetro en cada sistema ferroviario está recogida en la tabla 68.

Tabla 68. **Coste de capital por plaza.kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (c€/p.km)	1,312	1,628	1,890	2,293
Valor representativo (c€/p.km)	**0,396**	**0,493**	**0,613**	**0,723**
Valor más favorable (c€/p.km)	0,108	0,253	0,307	0,371
Rango más desfavorable/más favorable	*12,1*	*6,4*	*6,2*	*6,2*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*1,25*	*1,55*	*1,83*

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

➢ Coste de los daños propios y a terceros

Los daños a los viajeros en el ferrocarril en España están cubiertos por el "seguro obligatorio de viajeros" que supone el pago de una cantidad por cada viajero transportado, y que incluso cubre los daños producidos en la estación antes y después del viaje.

Sin embargo, los daños propios y a terceros no viajeros no están cubiertos por este seguro. Por ello, o bien deben ser objeto de un seguro específico (cuya prima anual es un coste); o puede adoptarse por una política de autoseguro (que es más frecuente en el ferrocarril, especialmente en explotaciones grandes) debiendo efectuarse provisiones anuales en función del riesgo.

En ambos casos el coste puede ser calculado como un porcentaje del valor de tren. Este porcentaje podría calcularse para un amplio periodo de tiempo (de 5 a 10 años, por ejemplo) dividiendo el importe realmente producido de los daños propios y a terceros por el número de años del periodo y por el coste de adquisición medio de los trenes operativos en ese periodo. Desgraciadamente, el dato no está disponible, ni en España existe un régimen de penalizaciones estable. Sí se dispone de una referencia aproximada tomada de valores históricos (antes de 1998) que sería del 2 por ciento del valor del tren (García Álvarez et al., 1998) en una explotación integrada convencional.

Es evidente que la siniestralidad de los trenes de alta velocidad es menor que la de los trenes convencionales (entre otras razones por la inexistencia de pasos a nivel en líneas de alta velocidad, ya que en ellos se produce la mayor parte de los accidentes y de los daños). Una mayor automatización y la existencia de sistemas de vigilancia explica que desde que entró en servicio la primera línea de alta velocidad (Japón, 1964) hasta la actualidad (septiembre de 2011) solo se haya producido un accidente con viajeros muertos (China, julio de 2011) en una línea nueva de alta velocidad[26].

[26] Este único accidente, se produjo en una línea nueva diseñada para 300 kilómetros por hora, pero explotada a 200 km/h y con un tren cuya velocidad máxima era de 200 kilometros por hora. El accidente (alcance de un tren parado por otro en marcha) se produjo a poco más de 100 kilómetros por hora.

Si "*i*" es el porcentaje de los seguros (o provisiones) con respecto al precio del tren [tanto por uno], el coste anual será:

$$IC[€] = i \times TP[€] \qquad [114]$$

Considerando un valor típico para el ferrocarril convencional de i=0,02, tendremos que:

$$IC_{LCONV}[€] = 0{,}02 \times TP \qquad [115]$$

Y considerando un valor de i=0,003 para el sistema de alta velocidad[27], el coste anual para éste sería:

$$IC_{LAV}[€] = 0{,}003 \times TP \qquad [116]$$

Con estos valores, el coste de los daños propios y a terceros por plaza.kilómetro sería el recogido en la tabla 69.

Tabla 69. **Coste de daños propios y a terceros por plaza.kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,098	0,814	0,945	1,147
Valor representativo (c€/p.km)	**0,040**	**0,329**	**0,409**	**0,482**
Valor más favorable (c€/p.km)	0,013	0,202	0,246	0,297
Rango más desfavorable/más favorable	*7,6*	*4,0*	*3,8*	*3,9*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*8,30*	*10,32*	*12,18*

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

➢ Costes totales derivados de la posesión del tren

Sumando los tres costes derivados de la posesión de tren (ecuaciones [*109*], [*111*]y [*114*]), el coste total derivado de la posesión en un año medio sería:

$$TC = \frac{TP - RV}{YR} + [r \times 0{,}5 \cdot \times TP] + i \times TP = TP \times \left[\left(\frac{1 - \frac{RV}{TP}}{YR} \right) + (0{,}5 \times r) + i \right] \qquad [117]$$

Y con los datos utilizados para el ejemplo (YR= 25; RV= 0; r = 0,06; e $iconv$=0,02), tendremos:

$$TC = TP \times \left[\left(\frac{1-0}{25} \right) + (0{,}5 \times 0{,}06) + 0{,}02 \right] = TP \times [0{,}04 + 0{,}03 + 0{,}02] = 0{,}09 \times TP \qquad [118]$$

[27] Unos 650 vehículos-año han integrado el parque de trenes de alta velocidad desde su arranque en España en 1992. En este periodo solo se ha producido un suceso que, sin tener daños personales, produjo daños en el tren de valor aproximado del 25% de su su valor; y unos 10 o 12 incidentes menores (arrollamiento de animales o descarrilamiento en taller) con daños del orden de 5 por ciento del valor del tren.

Puede suponerse por lo tanto que, con los datos utilizados, un valor orientativo del coste medio anual derivado de la posesión del tren en el sistema convencional es de un 9 por ciento del coste de adquisición del tren.

En la tabla 70 aparecen los costes totales de posesión del tren por plaza.kilómetro para cada uno de los sistemas considerados.

Tabla 70. **Costes totales de la posesión o tenencia de un tren por plaza.kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Valor más desfavorable (c€/p.km)	2,723	4,070	4,726	5,734
Valor representativo (c€/p.km)	**0,963**	**1,479**	**1,839**	**2,170**
Valor más favorable (c€/p.km)	0,294	0,859	1,044	1,262
Rango más desfavorable/más favorable	*9,268*	*4,736*	*4,526*	*4,545*
Comparación (valor representativo) con LAV	*1,000*	*1,535*	*1,909*	*2,253*

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

Puede observarse cómo el coste es menor en el sistema de alta velocidad y va creciendo a medida que se reduce la velocidad característica del sistema. En el convencional mejorado es superior en un 53,5 por ciento y en convencional diésel hasta en un 125 por ciento.

Los rangos de variación son grandes en todos los casos y es mucho mayor en el sistema de alta velocidad en donde llega hasta 1:9,2 debido a la eficiencia de la arquitectura del tren Shinkansen japonés Max E4 de caja ancha y dos pisos, que ha sido tomado como valor más favorable.

➢ Elasticidad del coste derivado de la tenencia del tren con respecto a la velocidad

Un incremento de la velocidad produce, como se ha indicado, un incremento de la potencia necesaria y por lo tanto un aumento del coste de adquisición del tren. A la vez, el incremento de la velocidad trae consigo una mayor producción anual (más kilómetros recorridos) lo que compensa con creces el mayor coste de adquisición y ello se traduce en una reducción de los costes derivados de la tenencia del tren.

Aplicando en el modelo analítico un incremento de la velocidad (tanto de la máxima del tren como de la media del servicio) del 10 por ciento, se observan elasticidades negativas (los costes se reducen) en todos los sistemas (tabla 71), y con valores de la elasticidad entre -0,680 y -0,779 (es decir, un aumento del 10 por ciento de la velocidad supone una reducción del coste de posesión del tren entre el 6,8 y el 7,8 por ciento).

Tabla 71. **Elasticidad de los costes de tenencia del tren con respecto a la velocidad**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Elasticidad del valor representativo	-0,680	-0,737	-0,779	-0,777

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Costes de mantenimiento y limpieza

Los costes de mantenimiento de los vehículos incluyen, en el caso más general tanto el mantenimiento preventivo y correctivo, como la limpieza interior y exterior, suministro de material fungible y reparación de accidentes y de actos de vandalismo hasta una cierta cantidad.

Se trata de operaciones de diversa naturaleza que a veces son realizadas por diferentes trabajadores simultáneamente en el mismo tren, lo que requiere tanto el uso de las instalaciones fijas dedicadas a este trabajo (talleres, almacenes, fosos, instalaciones de examen y lavado de trenes), como de personal, piezas de repuesto y materiales (aceite, agua, arena, papel, etc.)

La paralización del tren como coste de mantenimiento.- Uno de los componentes del coste imputables al mantenimiento más relevantes es el coste de la tenencia del tren durante el tiempo en que está paralizado para realizar estas operaciones o en los movimientos hacia los talleres o hacia puntos donde éstas se realizan (o el "lucro cesante" que se genera en este tiempo). Estos costes de tenencia del tren paralizado no los consideramos en el análisis de los costes de mantenimiento que realizamos aquí, porque produciría una doble contabilización, ya que ya este tiempo de paralización, en la práctica, reduce el valor de las horas diarias de uso comercial (Ht) que, como se expuso, dependen de la "política de mantenimiento".

Variabilidad de los costes de mantenimiento.- De los costes monetarios que implica el mantenimiento, una parte (relativamente pequeña) son fijos e independientes de los recorridos del tren. Otros costes son variables y están ligados en su mayor parte a los recorridos del tren, aunque también algunos se producen por tiempo y otros se devengan por cada viaje (es el caso de los costes de limpieza).

Formas de realizar el mantenimiento.- En cuanto a la forma de realizar el mantenimiento, hay una gran diversidad de políticas según los operadores. Unos lo realizan con medios propios (talleres y personal), mientras que otros lo externalizan totalmente. Cabe, lógicamente, cualquier solución intermedia. La limpieza puede estar incluida en el mantenimiento o puede contratarse aparte (normalmente está externalizada y por ello aparece como un servicio del exterior).

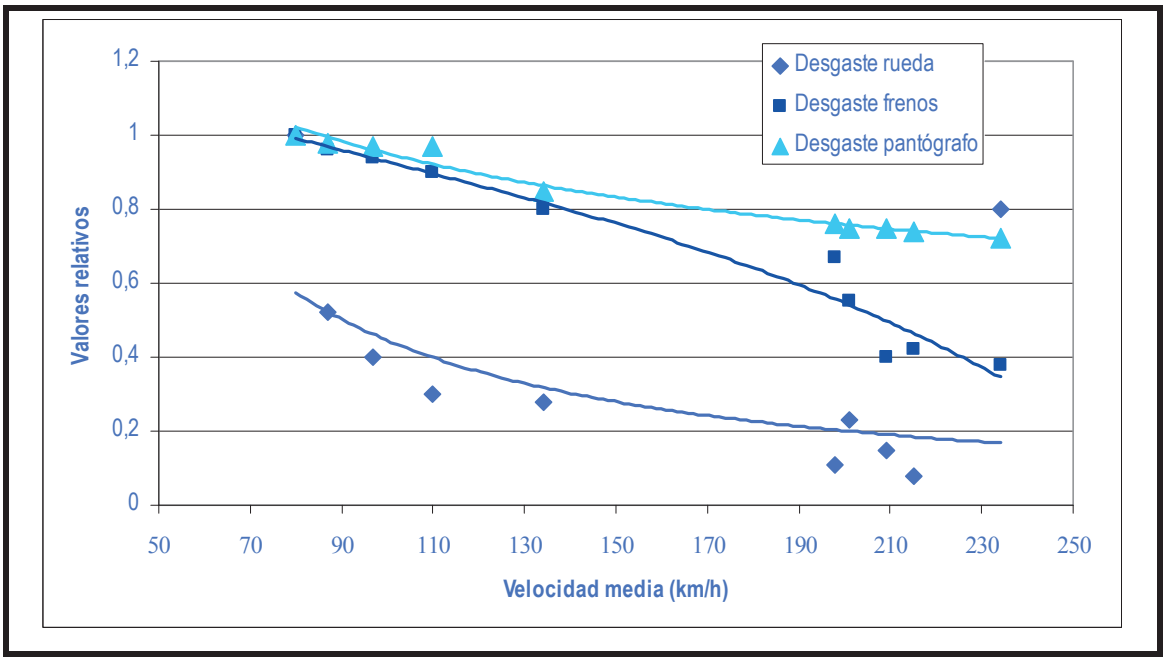
Perímetro de los costes de mantenimiento.- Debe advertirse que las cifras que se indican en diversos estudios sobre el coste de mantenimiento deben siempre ser analizadas con precaución, porque según los casos pueden incluir o no incluir conceptos tales como: grandes reparaciones, reparación de accidentes, limpieza de *grafitis* y reparación de actos vandálicos, coste de talleres, de los consumibles, etc. También puede ser difenete el número de talleres, las inversiones realizadas en talleres y en repuestos, y la vigilancia de las instalciones.

Coste de mantenimiento preventivo y correctivo del tren

Una parte de los costes de mantenimiento corresponde a la sustitución de los elementos que se desgastan por el uso. Este consumo de materiales y la mano de obra necesaria corresponden (en orden de importancia) a las ruedas desgastadas, zapatas, pantógrafos, frenos de disco y ejes.

Estos costes son más reducidos en las líneas de alta velocidad (debido a sus mayores radios de curvatura, al menor uso de los frenos de fricción y a un menor número de cables conductores en la catenaria, y por ello menor desgaste del pantógrafo)[28]. Por ello, la correlación entre los costes económicos y velocidad media de los trenes muestra una reducción en los costes cuando aumenta la velocidad media del tren (figura 66). Se ha observado una reducción más significativa, especialmente en el caso de los pantógrafos, al pasar de las líneas convencionales a las de alta velocidad.

Figura 66. **Relación entre el desgaste de diferentes materiales del tren y la velocidad media del servicio**



Fuente: (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2008)

El mantenimiento del tren tiene una parte fija (e independiente del recorrido) y una parte variable. La parte fija corresponde a la dirección del mantenimiento, documentación, almacenes, gastos generales de la oficina técnica, talleres, inversiones, etc.

El coste unitario de mantenimiento puede expresarse de la siguiente forma:

$$cv = 100 \times \frac{CF}{p \times RA} + \frac{CV(f(recorrido)) \times L}{p} \qquad [119]$$

Donde: cv es el coste unitario de mantenimiento por unidad de oferta [c€/plaza.km]; CF es el coste fijo de mantenimiento de un tren ([€/año]; CV es el coste variable de mantenimiento del tren por metro lineal y por kilómetro recorrido [c€/ml.km], que

[28] Análisis detallados de la relación entre la velocidad y los costes de mantenimiento pueden verse en (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2008) y en (García Álvarez, 2010f)

es función del recorrido medio anual de los trenes; L es la longitud del tren [ml]; y p es el número de plazas [plazas/tren]

En ocasiones, una parte del coste de mantenimiento se produce en "grandes reparaciones" que se realizan cada cierto recorrido (típicamente entre 2 y 4 millones kilómetros con tendencia a aumentar esta distancia). La repercusión del coste de la gran reparación suele ser de entre 0,25 y 0,42 euros por kilómetro.tren, con pesos de entre el 8 y el 14 por ciento del coste de mantenimiento.

Para tener una idea orientativa de los costes de mantenimiento de diversos tipos de trenes puede recurrirse a los valores expuestos en (García Álvarez, 2011a). (Tabla 72).

Tabla 72. **Valores orientativos del coste de mantenimiento (incluida la gran reparación, pero no la limpieza)**

Tipo y tamaño de tren	Coste unitario mantenimiento	Coste por km.tren	Coste por plaza.km
Larga distancia (200 m)	0,7 a 1,0 c€/ml.km	1,40 a 2,00 €	0,40 a 0,57 c€/p.km
Regional eléctrico (75m)	1,7 a 2,2 c€/ml.km	1,30 a 1,70 €	0,56 a 0,73 c€/p.km
Regional diésel (75 m)	2,0 a 2,6 c€/ml.km	1,55 a 2,00 €	0,70 a 0,9 c€/p.km
Cercanías elect. (75 m)	1,3 a 1,6 c€/ml.km	0,97 a 1,20 €	0,30 a 0,40 €/peskm

Nota: En el caso del tren de cercanías, para mayor homogeneidad de la comparación, no se han contabilizado las plazas de pie, sino las plazas sentadas que tendría el tren con una densidad de plazas adecuada al tipo de servicio y con la superficie útil que corresponde al tamaño del tren.

Fuente: (García Álvarez, 2011a)

Coste de talleres

Los costes de talleres comprenden la repercusión de los costes incurridos para la construcción del taller y su mantenimiento, vigilancia y seguridad; así como los costes globales de la empresa que los gestiona (funcionamiento, documentación, etc.) Estos costes pueden ser considerados (en general) fijos e independientes de la velocidad del tren, ya que las revisiones que se realizan en ellos se hacen normalmente por los kilómetros recorridos y no por tiempo.

El coste del taller incluye la amortización, el coste de capital y coste de operación. Para cada tipo de tren, el uso que hacen del taller (y por ello su coste) depende del tamaño del tren (en concreto, de su longitud) y del número de kilómetros que se pueden recorrer entre intervenciones de mantenimiento (si se admiten menores recorridos entre intervenciones, tiene que entrar con más frecuencia al taller, y por ello la repercusión del coste de taller por kilómetro recorrido es mayor).

Los costes del taller son costes de pequeña magnitud relativa (5 al 6% del total del mantenimiento y limpieza). Hoy por hoy, están muchas veces incluidos en el mantenimiento, pero el futuro, en escenario de competencia cada vez serán más explícitos, especialmente cuando el operador no sea el propietario del taller.

Costes de limpieza exterior e interior

Los "costes de limpieza" comprenden los costes de los trabajos de retirada de objetos y residuos del tren, y de limpieza y de la preparación interior y exterior del

tren para cada viaje a realizar. Dependen de la superficie total del tren (que a su vez se relaciona directamente con su longitud) y de su número de plazas.

La limpieza interior del tren se realiza antes de cada viaje, al menos en los trenes de medio y largo recorrido. Podemos suponer una repercusión del coste de limpieza por plaza-kilómetro de:

$$NC = 100 \times \frac{(L \times cc)}{D \times p} \qquad [120]$$

donde: NC es el coste de limpieza por plaza.km [c€/plaza.km]; L, es la longitud del tren [metros lineales]); cc es el coste de limpieza por metro lineal del tren, que depende del tipo de servicio [€/ml]; D es la longitud de la ruta [km]; p es el numero de plazas del tren [plazas/tren].

Los valores habituales de cc pueden ser de 1 a 1,5 €/ml. Para un valor de cc=1,33 €/ml, y para una longitud del tren (L) de 200 metros lineales; una longitud de la ruta (D) de 475 km; y 350 plazas; obtendremos el siguiente resultado:

$$nc = 100 \times \frac{200 \times 1{,}33}{475 \times 350} = 100 \times \frac{266}{166.250} = 0{,}16 c€ / plaza.km$$

Los valores de cc = 1 a 1,5 €/metro lineal de tren son comunes en los servicios de media y larga distancia. Como se puede observar, el coste por kilómetro no depende de la velocidad, sino (en gran medida) de la longitud de la ruta del tren: a mayor longitud de la ruta, el coste de limpieza de cada viaje se diluye entre un mayor número de kilómetros y por ello el coste unitario disminuye.

Coste total de mantenimiento y limpieza

Para tener un valor de referencia del coste total de mantenimiento, talleres y limpieza y de la comparación relativa entre ellos, en (García Álvarez, 2011a) puede encontrarse una tabla con los valores aproximados correspondientes a un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud (tabla 73). Son valores actuales, válidos en el entorno español en el que ha habido una cierta competencia entre proveedores en los procesos de licitación de compra de trenes de alta velocidad y su posterior mantenimiento.

Tabla 73. **Valores aproximados de coste de mantenimiento de un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud**

	c€/km.tren	c€/plaza.km	%
Costes fijos de mantenimiento	0,77	0,1906	*22%*
Costes variables de mantenimiento	1,96	0,4851	*56%*
Costes de limpieza	0,56	0,1386	*16%*
Costes de mantenimiento de taller	0,14	0,0347	*4%*
Costes del operador del taller: agua, luz, gas, etc.	0,07	0,0173	*2%*
Coste total	**3,5**	**0,866**	***100%***

Fuente: (García Álvarez, 2011a)

Para hacer el análisis de la relación del coste de mantenimiento y limpieza con la velocidad y con el tipo de sistema ferroviario, se han separado los diversos componentes del coste de mantenimiento del tren (fijos, variables y de mantenimiento de los sistemas ATP de alta velocidad); los costes de limpieza del tren; y los costes del taller. Como referencia de los costes para un tren de 450 metros cuadrados útiles y 200 metros lineales de longitud, se toman los valores indicados en la tabla para el tren de alta velocidad (que es aquél del que se dispone de más información desagregada). Se realizan las adaptaciones y se aplican las hipótesis que se indicarán seguidamente para otros tipos de trenes. Finalmente se comprobará que los valores resultantes para otros tipos de trenes encajan con los valores globales de que se dispone.

Las adaptaciones realizadas y las hipótesis adoptadas se explican seguidamente:

- Para los valores más desfavorable y más favorable en cada sistema se aplican una variaciones de +5 y –5 por ciento respectivamente en los costes unitarios sobre el valor representativo, y además se hacen las correcciones correspondientes a las diferencias de la densidad y número de plazas con respecto al tren con el que se calculan los valores de referencia.
- Al objeto de poder considerar el coste diferencial de los sistemas de vigilancia y señalización (ATP) de los trenes de alta velocidad, se tiene en cuenta que este coste representa el 2,4% del coste total de adquisición del tren (0,54/22 M€). Suponemos que el coste de mantenimiento de estos equipos guarda con el coste de mantenimiento fijo más variable del conjunto del tren (0,77+1,96=2,73 c€/km.tren) la misma proporción que la que guarda su coste de adquisición con el coste del conjunto del tren. Con una producción de 480.000 kilómetros al año (es la que subyace como "producción de referencia" en los contratos de mantenimiento de los trenes de alta velocidad en España), representa un coste de anual de mantenimiento de estos equipos de 31.449 euros por tren y año. Dada la naturaleza de este coste, su valor absoluto anual debe considerarse independiente del recorrido, pero para obtener el coste unitario se reparte entre los kilómetros recorridos por el tren en el año.

- El coste fijo de mantenimiento del tren se considera independiente de la velocidad, y por ello se adopta el valor más representativo de 0,186 céntimos de euro por plaza.kilómetro[29]. Para otros sistemas, únicamente varía con la densidad de plazas del tren considerado como representativo en cada sistema.
- El 50 por ciento del coste variable de mantenimiento del tren se considera independiente de la velocidad. El 40 por ciento del coste variable (que se imputa a la reposición de materiales que desgastan por la irregularidad de velocidad en la marcha) se considera inversamente proporcional a la distancia entre paradas. El 10 por ciento restante (que se imputa al mantenimiento de los servicios auxiliares como aire acondicionado, iluminación, audio/video, etc.), se considera proporcional tiempo de uso, y por ello su repercusión por plaza kilómetro es inversamente proporcional a la velocidad comercial. Tomamos el valor de referencia de 0,4851x0,976=0,473 céntimos de euros por plaza.kilómetro para un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud (sin contar el sobrecoste del sistema de señalización), y consideramos para este sistema el valor representativo de 0,0084 paradas por kilómetro y una velocidad media de 220 kilómetros por hora. Este valor se adecua con las reglas citadas a cada tipo de servicio, al variar la distancia entre paradas, la densidad de plazas y la velocidad comercial.
- Para los costes de mantenimiento de los trenes diésel se ha aplicado al coste de los trenes eléctricos equivalentes un coeficiente que se deduce de la diferencia de precio establecido para el mantenimiento de los trenes diésel en comparación con los eléctricos. Este coeficiente se aplica solo a la mitad del precio (suponiendo que la mitad del mantenimiento corresponde a las motrices y la mitad a los coches, freno y equipos independientes de la tracción). Siendo el coeficiente de 1,4 para locomotoras, puede aplicarse un coeficiente de 1,2 para el conjunto del tren (0,5x1,4+0,5x1,0).
- La mitad del coste de limpieza se considera proporcional a la superficie útil del tren y la otra mitad a las plazas. La referencia es de 0,56 euros por plaza.kilómetro para un tren de alta velocidad de 450 metros cuadrados útiles y 0,86 plazas por metro cuadrado. Para otros trenes se adapta en función de la superficie y de la densidad de plazas.
- El coste de los talleres se supone dependiente del recorrido entre revisiones y de la longitud del tren. Por ello, el coste unitario por plaza kilómetro no guarda relación con la velocidad del tren, y las únicas variaciones de coste unitario por plaza kilómetro entre sistemas se derivan de la diferente densidad de plazas de los trenes considerados.

En la tabla 74 y en la figura 67 se ha expresado el coste de mantenimiento en cada uno de los sistemas ferroviarios analizados (LAV, LCM, LCe y LCd).

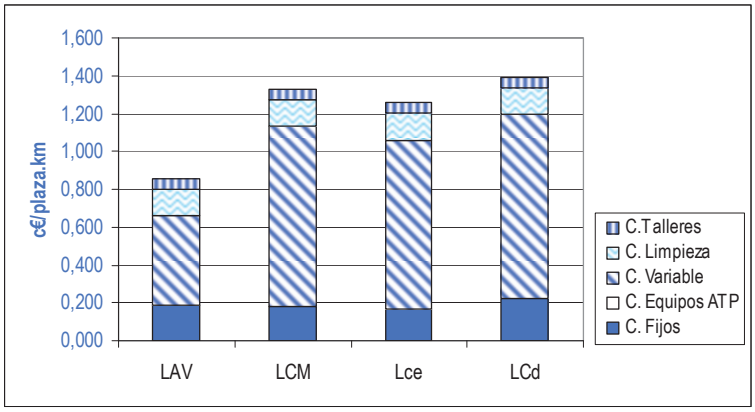
Puede comprobarse cómo en el sistema de alta velocidad el coste unitario (por plaza kilómetro) de mantenimiento y limpieza es más bajo que en otros sistemas, (debido sobre todo a la diferencia en el coste variable de mantenimiento) y cómo en tracción diésel el coste es más alto que en tracción eléctrica.

[29] El coste de 0,1906 c€/plaza.km figurado en la tabla citada de (García Álvarez, 2011a) se ha reducido en un 2,4% para eliminar la repercusión del coste de los equipos de señalización que sí está incluido en el precio señalado. Igual se hará con el coste variable.

Tabla 74. **Costes totales de mantenimiento y limpieza según sistemas ferroviarios**

	Sistema de alta velocidad (LAV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Costes fijos de mantenimiento del tren (excluidos equipos adicionales ATP de AV)				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,218	0,198	0,193	0,302
Valor representativo (c€/p.km)	0,186	0,180	0,165	0,221
Valor más favorable (€/p.km)	0,106	0,181	0,154	0,260
Costes de mantenimiento de los equipos ATV de alta velocidad				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,005	0,000	0,000	0,000
Valor representativo (c€/p.km)	0,005	0,000	0,000	0,000
Valor más favorable (€/p.km)	0,005	0,000	0,000	0,000
Coste variable de mantenimiento del tren				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,555	1,049	1,044	1,337
Valor representativo (c€/p.km)	0,473	0,954	0,892	0,976
Valor más favorable (€/p.km)	0,245	0,867	0,754	1,041
Coste de limpieza				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,138	0,145	0,147	0,140
Valor representativo (c€/p.km)	0,139	0,141	0,147	0,139
Valor más favorable (€/p.km)	0,187	0,137	0,149	0,137
Coste de talleres				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,061	0,057	0,061	0,059
Valor representativo (c€/p.km)	0,052	0,054	0,059	0,053
Valor más favorable (€/p.km)	0,028	0,050	0,046	0,049
Coste total de mantenimiento y limpieza				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,978	1,448	1,444	1,839
Valor representativo (c€/p.km)	**0,855**	**1,329**	**1,263**	**1,388**
Valor más favorable (c€/p.km)	0,571	1,235	1,103	1,486
Rango más desfavorable/más favorable	*1,7*	*1,2*	*1,3*	*1,2*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*1,55*	*1,48*	*1,62*

Figura 67. **Desglose de los costes totales de mantenimiento y limpieza según sistemas ferroviarios**



Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

➢ Elasticidad de los costes de mantenimiento y limpieza con respecto a la velocidad

La variación de la velocidad por si misma tiene muy poca influencia en el coste de mantenimiento y de limpieza, ya que solo incide en el menor coste de mantenimiento por plaza.kilómetro de los equipos auxiliares, que representan alrededor del un 10 por ciento de los costes variables, que a su vez son la mitad del coste total.

3.3.3. Costes de la energía de tracción

Denominamos "energía de tracción" a la que necesitan para los trenes para su movimiento y para alimentar sus servicios auxiliares.

El coste económico de la energía de tracción se compone de:

- El coste de la energía consumida (que se mide generalmente en la entrada de la subestación)[30].
- Los pagos percibidos (costes negativos) procedentes del valor de la energía regenerada por el freno y devuelta a la subestación en el caso de la tracción eléctrica con freno regenerativo.
- Los costes derivados de la contratación de la potencia necesaria.

Se entiende que el coste de mantenimiento de las instalaciones eléctricas (subestaciones y catenaria) está incluido en el canon pagado por el coste marginal del uso de la infraestructura.

Tampoco se considera incluido como coste de explotación, el de la energía para usos distintos de tracción (UDT, talleres, oficinas, estaciones, etc.) que es considerado como parte de los "costes generales".

Costes de la energía de tracción importada

El coste de la energía importada por el tren para la tracción y para sus servicios auxiliares (climatización, compresores, iluminación,…) se puede obtener multiplicando la cantidad de energía consumida en la subestación (que es el punto contratado de suministro) por el precio unitario ligado a la energía importada.

La energía importada en la subestación puede calcularse a partir de la energía importada en el pantógrafo (que depende de las características del tren, de la línea y del servicio), mayorada por el coeficiente de pérdidas que se producen entre la entrada de la subestación y el pantógrafo, es decir, en la propia subestación y en la catenaria.

El coste de la energía, por lo tanto, se puede expresar de la siguiente manera:

$$EC_s = E_{s_M} \times EP_{s_M} = E_{PM} \times \pi \times EP_{S_M} \qquad [121]$$

donde: ECs es el coste unitario de la energía a la entrada en subestación por kilómetro.tren (c€/km.tren); E_{SM} es la cantidad de energía importada a la entrada de subestación por kilómetro tren (kWh/km.tren); EP_{SM} es el precio unitario de la

[30] Al referirmos al "coste de la energía consumida" (o al de "contratación de la potencia") no solo incluimos el pago por la compra de energia y por potencia, sino todos aquellos pagos que según la normativa reguladora del sector eléctrico de cada país están ligados a la energía consumida o la potencia contratada. Asi, por ejemplo, en la energía se incluye el coste de la comercialización, y en la energia y en la potencia el impuesto de la electricidad o las tarifas de acceso y de capacidad correspondientes.

energía y sus costes asociados (c€/kWh); E_{PM} es la energía importada en el pantógrafo (kWh/km.tren); π es el cociente entre la energía importada a la entrada en subestación y la energía importada en el pantógrafo(>1):

$$\pi = \frac{E_{s_M}}{E_{p_M}} \qquad [122]$$

El coste de la energía importada por plaza.km (ec) será:

$$ec = \frac{EC_S}{s} = \left(E_{P_M} \times \pi \times EP_{S_M}\right) \times \frac{1}{s} \qquad [123]$$

Puede considerarse un valor de $\pi = 1{,}03$ para corriente alterna (AC) y un valor de $\pi = 1{,}11$ para corriente continua (DC).

El consumo de energía (en pantógrafo) para un tren con una masa M de toneladas depende (como se ha expuesto) de muchos factores, pero por dar una orden de magnitud y expresándolo en función de su velocidad media $Vcom$ (km/h) se puede estimar ((García Álvarez, 2011c)) como:

$$E_{p_M} = 3{,}2 \times 10^{-4} \times V_{com}{}^{0{,}8805} \times M \qquad [124]$$

Para el caso en el que el precio de la energía importada fuera $E_{p_S} = 9$ c€/kWh, el coeficiente de pérdidas $\pi = 1{,}03$, la masa del tren M=412 toneladas y la capacidad del tren de p=350 plazas

$$ec = 3{,}32 \times 10^{-4} \times V_{com}{}^{0{,}8805} \times 412 \times 1{,}03 \times 9 \times \frac{1}{350} = 3{,}623 \times 10^{-4} \times V_{com}{}^{0{,}8805} \qquad [125]$$

Es decir, por ejemplo, con $Vcom$=175 kilómetros por hora el coste de la energía sería de 0,0342 c€/plaza.km.

Pues darse el orden de magnitud de 12 a 15 kilovatios hora importados en el pantógrafo para trenes de 200 metros de longitud, lo que significa costes de 1,1 a 1,4 euros por kilómetro.tren para un tren de esas dimensiones

Costes de energía regenerada exportada a la red

El coste (negativo) de la energía devuelta (exportada) a la red pública se obtiene multiplicando la cantidad de energía devuelta en la subestación por el precio unitario[31].

El precio unitario recibido por la energía devuelta se supone igual al precio de la energía consumida multiplicada por un facrtor β, que es generalmente igual o inferior a la unidad.

$$rec = -\left[E_{p_x} \times \frac{1}{\pi} \times \left(EP_{S_M} \times \beta\right)\right] \times \frac{1}{p} \qquad [126]$$

donde: rec es el coste de la energía devuelta [c€/plaza.km]; E_{px} es la cantidad de energía devuelta en el pantógrafo [kWh/km]; π es el factor de pérdidas entre la subestación y el pantógrafo (>1); EP_{SM} es el precio de la energía importada [c€/kWh];

[31] Debe observarse que cuando la energía regenerada por el freno de un tren es aprovechada por otro tren (y por ello no se devuelve a la red pública), a los efectos del tren considerado se reduce su consumo neto de energía, y por ello esta energía regenerada debe contabilizarse tanto si es aprovechada por otro tren como si es devuelta a la red pública.

β es el cociente entre el precio de la energía exportada y el precio de la energía importada ; y p es el número de plazas del tren.

La energía exportada por un tren con una masa de M toneladas funcionando a una velocidad media de V_{com} km/h se puede estimar ((García Álvarez, 2011c)) como:

$$0{,}837\times10^{-4}\times V_{com}^{\ 0.9652} \qquad [127]$$

Con lo que para el tren del anterior, y considerando que ß=1 (que es el caso en España)

$$rec=-\left[0{,}837\times10^{-4}\times V_{com}^{\ 0{,}9652}\times412\times\frac{1}{1{,}03}\times(9\times1)\right]\times\frac{1}{350}=-11{,}14\times10^{-4}\times V_{com}^{\ 0{,}9652} \quad \textit{[128]}$$

Para V_{com}=175 km/h el valor resultante sería 0,0122 c€/plaza.km

Coste de la potencia contratada

Para el funcionamiento de los trenes de tracción eléctrica es preciso contratar una potencia, lo que significa unos determinados costes económicos. La imputación de estos costes al tren resulta compleja, pero para estimarlos y para analizar su relación con la velocidad se parte de los siguientes supuestos:

Cada tren necesita, como máximo, una potencia continua, pero como media utiliza una fracción de ella, suele estar entre el 30 y el 70%, dependiendo del perfil de la línea, de la distancia entre paradas y de otros factores operativos. Como consecuencia, la demanda instantánea de potencia en cada subestación es menor que la suma de la potencia de todos los trenes que pueden estar funcionado simultáneamente en su ámbito. Por ello se multiplica la potencia del tren por un *factor de simultaneidad* ξ (<1).

La cuota de potencia se paga con independencia de su utilización efectiva, ya que se trata de un derecho de uso. Sin embargo, los trenes no circulan durante todo el día ocupando la máxima capacidad de la línea, por lo que la potencia que sería preciso contratar para cada tren debe multiplicarse por un *factor de densidad de tráfico* δ (>1) para poder disponer de la potencia necesaria para el conjunto de los trenes. Este factor (que se relaciona con la utilización real de la línea en comparación con su capacidad máxima) puede oscilar entre 1,4 y 1,7.

La potencia se contratada para cada tren[32] así pues es:

$$Pconttren = Pt\times\xi\times\delta \quad [129]$$

Y por ello, el coste unitario responde a la expresión:

$$cp=P_t\times\xi\times\delta\times100\times Pc\times\frac{1}{30{,}44\times18\times V_{com}}\times\frac{1}{p} \qquad [130]$$

Conde cp es el coste unitario de la potencia (incluyendo impuestos y todos los pagos ligados a la potencia) [c€/p.km]; Pt es la potencia del tren [kW]; ξ es el factor adimensional de simultaneidad (<1); Pc es el precio ligado a la potencia contratada [€/kW.mes]; $Vcom$ es la velocidad comercial [km/h]; δ es el factor de densidad de tráfico. Se considera que el mes medio tiene 30,44 días, y que el tráfico se desarrolla durante 18 horas diarias.

[32] Aquí no se debe entender "tren" como vehículo, sino como "expedición" o como unidad de oferta.

Costes totales de la energía

El coste total de la energía se obtiene sumando el coste de la energía importada para tracción y auxiliares, restando el coste de la energía exportada a la red y agregando el coste de la potencia (en todos los casos por plaza.kilometro); es decir:

$$tec = ec - rec + cp \qquad [131]$$

Y bajo los supuestos anteriores, con respecto al consumo en función de la masa y la velocidad, tendremos que:

$$tec = \left[\left(E_{p_M} \times \pi \times EP_{S_M} \right) \times \frac{1}{p} - \left[E_{P_S} \times \frac{1}{\pi} \times \left(EP_{S_M} \times \beta \right) \times \frac{1}{ps} \right] + P_t \times \xi \times \delta \times Pc \times \frac{0{,}18}{18 \times V_{com}} \times \frac{1}{p} \right] \qquad [132]$$

Los valores del coste de la energía en cada sistema y para los valores más desfavorable, más favorable y representativo son los que se recogen la tabla 75.

Tabla 75. **Coste de la energía por plaza.kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Energía importada en pantógrafo (kWh)				
Valor más desfavorable (kWh/km.tren)	18,52	28,20	16,54	44,09
Valor representativo (kWh/km.tren)	12,28	13,47	14,99	41,95
Valor más favorable (kWh/km.tren)	7,25	8,77	11,59	32,29
Energía exportada en pantógrafo (kWh)				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor representativo (c€/p.km)	0,99	1,65	1,55	0,00
Valor más favorable (c€/p.km)	0,35	1,32	1,32	0,00
Coefiente de pérdidas (energía central/energía pantógrafo)				
Valor más desfavorable	1,059	1,122	1,122	1
Valor representativo	1,04	1,105	1,12	1
Valor más favorable	1,035	1,059	1,118	1
Precio de la energía importada				
Valor más desfavorable (c€/kWh)	9,9	9,9	9,9	5,4
Valor representativo (c€/kWh)	9,0	9,0	9,0	4,9
Valor más favorable (c€/kWh)	8,1	8,1	8,1	4,4
Relación entre el precio de la energia importada y la energía exportada (β)				
Valor más desfavorable	0,9	0,9	0,9	1
Valor representativo	1	1	1	1
Valor más favorable	1,1	1,1	1,1	1
Precio de la potencia contrada				
Valor más desfavorable (c€/kW.mes)	195,80	195,80	195,80	195,80
Valor representativo (c€/kW.mes)	178,00	178,00	178,00	178,00
Valor más favorable (c€/kW.mes)	176,22	176,22	176,22	176,22
Producto de los factores de simultaneidad y de densidad de tráfico ($P_{contratada}/P_{tren}$)				
Valor más desfavorable	5,83	5,83	5,83	5,83
Valor representativo	3,03	3,03	3,03	3,03
Valor más favorable	2,04	2,04	2,04	2,04
Coste de la energía				
Valor más desfavorable (c€/plaza.km)	0,703	0,940	0,571	0,774
Valor representativo (c€/plaza.km)	**0,370**	**0,376**	**0,388**	**0,604**
Valor más favorable (c€/plaza.km)	0,213	0,210	0,264	0,416
Rango más desfavorable/más favorable	*3,305*	*4,482*	*2,165*	*1,859*
Comparación (valor representativo) con LAV	*1,000*	*1,015*	*1,050*	*1,632*

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse en la tabla 75, no hay grandes diferencias en el coste de la energía entre los diversos sistemas eléctricos, aunque resulta algo menor en el sistema de alta velocidad, y significativamente mayor en el de tracción diésel.

➢ Elasticidad del coste de la energía de tracción con respecto a la velocidad

Aplicando un incremento de la velocidad (tanto de la máxima del tren como de la media del servicio) del 10 por ciento, se observan elasticidades positivas del coste (al aumentar la velocidad, a igualdad de los demás factores, el coste energético aumenta). Ello se produce en todos los sistemas, y con valores de la elasticidad semejantes entre si y por debajo de la unidad (entre 0,657 y 0,801), lo que significa que el coste energético aumenta de forma algo menos que proporcional a la velocidad media del servicio. Esta elasticidad es mayor en alta velocidad, aunque no llega a la unidad (tabla 76).

Tabla 76. **Elasticidad del coste de la energía con respecto a la velocidad**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Elasticidad del valor representativo	0,801	0,744	0,657	0,764

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Costes del personal operativo

El personal que presta servicios en la operación del tren (ya sea perteneciendo a la plantilla de la empresa del operador o a través de empresas de servicios externos) se puede clasificar en dos grupos principales:

- El personal que presta servicios de tierra: en este caso, puede ser personal de operación (por ejemplo, el personal de recepción y bienvenida en las estaciones, los puntos de información y venta de billetes, servicio post-venta), o el personal auxiliar (dedicado a actividades de administración o comerciales).
- El personal que presta servicios a bordo: este es el caso del personal de conducción del tren, control de billetes y aquellos que prestan servicios a los viajeros a bordo.

Los costes que genera el personal de tierra no pueden considerarse costes de explotación de acuerdo con la definición expuesta.

Con respecto al personal que trabaja a bordo, existe una relación clara entre los costes que generan y la velocidad media de los trenes en los que trabajan. Este personal tiene, de hecho, un horario de trabajo fijo (normalmente 40 horas a la semana o de 1.880 horas al año), y si los trenes se mueven más rápidamente, los empleados que viajan en los trenes cubrirán más kilómetros en el mismo tiempo, reduciendo así el número de personas necesarias para ofrecer el mismo servicio y, por tanto, el coste laboral por unidad de oferta (por plaza.kilómetro).

Debe tenerse en cuenta que este personal produce, además, un coste derivado de sus desplazamientos (comidas o dietas, hoteles, taxis, etc.) que puede computarse como un valor por día trabajado. También suelen incluirse en el coste del personal operativo el coste laboral de los mandos intermedios que en número de efectivos representan del orden de 10 al 15%, pero con unos costes medios algo inferiores al de los propios trabajadores, lo que sugiere un coeficiente de mayoración del orden del 7 al 12%.

Si LC [euros/persona] es el coste anual de un trabajador para la empresa (con subíndice "dr"; si es un maquinista, y el subíndice "a" si es personal de acompañamiento); J es el número de días al año que se trabaja, y H el número de horas de trabajo al día (con los mismos subíndices), el coste unitarios de personal (SC) responde a la expresión:

$$SC[c€/p.km] = \left(\frac{LC_{dr} + C_{comp} \times J_{dr}}{J_d \times H_{dr} \times V_{com}} + \frac{LC_a + C_{comp} \times J_a}{J_a \times H_a \times V_{com}} \right) \times 100 \times IL \qquad [133]$$

Donde IL es el coeficiente para tener en cuenta el coste del personal indirecto.

El coste por minuto del personal de conducción y de acompañamiento está calculado, para cada sistema, en la tabla 77 en sus valores más desfavorable, más favorable y más representativo.

Tabla 77. **Coste por minuto del personal operativo a bordo de los trenes**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Coste anual del maquinista (LC_{dr})				
Valor más desfavorable (€/año)	51.750	51.750	51.750	51.750
Valor representativo (€/año)	45.000	45.000	45.000	45.000
Valor más favorable (€/año)	38.250	38.250	38.250	38.250
Coste anual del agente de acompañamiento (LC_a)				
Valor más desfavorable (€/año)	40.250	40.250	40.250	40.250
Valor representativo (€/año)	35.000	35.000	35.000	35.000
Valor más favorable (€/año)	29.750	29.750	29.750	29.750
Número de jornadas anuales de trabajo efectivo (J_{dr} y J_a)				
Valor más desfavorable (días/año)	200	200	200	200
Valor representativo (días/año)	210	210	210	210
Valor más favorable (días/año)	222	222	222	222
Horas efectivas de conducción por jornada (H_{dr})				
Valor más desfavorable (horas/jornada)	3,75	3,5	3,5	3,5
Valor representativo (horas/jornada)	4	4	4	4
Valor más favorable (horas/jornada)	5,5	5	5	5
Horas efectivas de acompañamiento por jornada (H_{dr})				
Valor más desfavorable (horas/jornada)	4,25	4	4	4
Valor representativo (horas/jornada)	4,5	4,5	4,5	4,5
Valor más favorable (horas/jornada)	6	5,5	5,5	5,5
Coste completario por dia (Ccom)				
Valor más desfavorable (€/jornada)	20	20	20	20
Valor representativo (€/jornada)	15	15	15	15
Valor más favorable (€/jornada)	0	0	0	0
Coefiente para repercusión del personal indirecto (IL)				
Valor más desfavorable (€/jornada)	1,15	1,15	1,15	1,15
Valor representativo (€/jornada)	1,1	1,1	1,1	1,1
Valor más favorable (€/jornada)	1,05	1,05	1,05	1,05
Coste por minuto de personal de conducción				
Valor más desfavorable (€/minuto)	1,42	1,53	1,53	1,53
Valor representativo (€/minuto)	1,05	1,05	1,05	1,05
Valor más favorable (€/minuto)	0,55	0,60	0,60	0,60
Coste por minuto de personal de acompañamiento				
Valor más desfavorable (€/minuto)	1,00	1,06	1,06	1,06
Valor representativo (€/minuto)	0,74	0,74	0,74	0,74
Valor más favorable (€/minuto)	0,39	0,43	0,43	0,43
Rango más desfavorable/más favorable (c+a)	*2,580*	*2,513*	*2,513*	*2,513*
Comparación (valor repres. C+a) con LAV	*1,000*	*1,000*	*1,000*	*1,000*

Fuente: Elaboración propia

En empresas que tienen personal excedente, es práctica habitual repartir el coste del total del personal (incluido el excedente) entre las unidades producidas, y en tal caso los costes resultantes pueden subir mucho con respecto a los costes estándar presentados. De hecho, pueden encontrase costes de hasta 2,3 €/min para personal de conducción, y de 1,3 a 2,5€/min para el de intervención o supervisión.

Si se reparte el coste del personal por las plazas.kilómetro producidas, el coste unitario del personal de a bordo es el que aparece en la tabla 78.

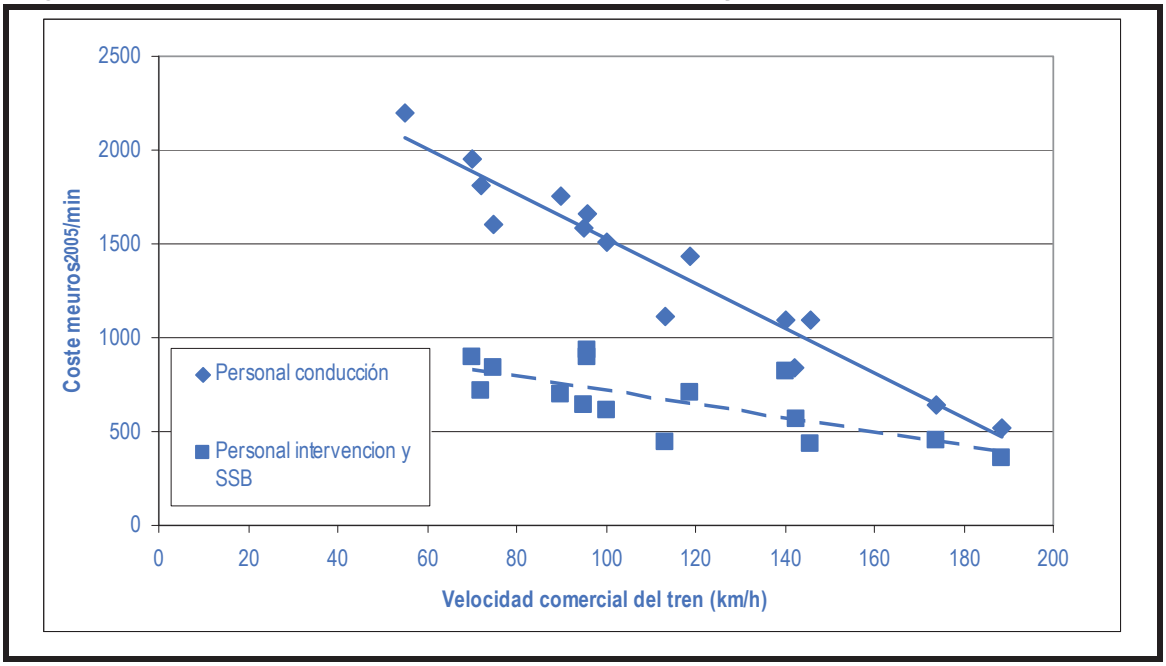
Tabla 78. **Coste por plaza kilómetro del personal operativo a bordo de los trenes**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Coste del maquinista				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,141	0,224	0,267	0,290
Valor representativo (c€/p.km)	0,081	0,111	0,142	0,158
Valor más favorable (€/p.km)	0,021	0,055	0,068	0,080
Coste del agente de acompañamiento				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,099	0,156	0,185	0,201
Valor representativo (c€/p.km)	0,057	0,078	0,100	0,111
Valor más favorable (€/p.km)	0,015	0,039	0,048	0,056
Coste total del personal a bordo				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,240	0,380	0,452	0,491
Valor representativo (c€/p.km)	0,139	0,190	0,242	0,269
Valor más favorable (€/p.km)	0,035	0,094	0,116	0,136

Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 68 puede apreciarse gráficamente la relación entre el coste por minuto de maquinista e interventor y la velocidad comercial del tren en varios servicos-tipo españoles.

Figura 68 . **Relación entre los costes de personal operativo y la velocidad media del servicio**



Fuente: (Minayo de la Cruz, F. & García Álvarez, 2008)

3.3.5. Coste marginal del uso de la infraestructura

Tipos de costes de la infraestructura e imputación.- Los costes de la infraestructura ferroviaria (línea, instalaciones y estaciones) pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Costes de capital, que corresponden a la amortización y financiación de la infraestructura ferroviaria.
- Costes corrientes, que corresponden a la gestión, mantenimiento, vigilancia y reposición (en suma, a la explotación de la infraestructura). A su vez, estos costes pueden ser fijos (entendiendo por tales los que son independientes de la circulación de los trenes), y variables (los que se producen por la circulación de los trenes sobre la infraestructura).

Desde otro punto de vista, la circulación de un tren por una infraestructura ferroviaria comporta:

- costes de oportunidad derivados del uso de capacidad disponible (imputación de los costes de capital y de los costes fijos de explotación de la infraestructura).
- costes derivados del uso directo que realiza este tren al circular por la infraestructura.

Desde el punto de vista de un operador de servicios de transporte, el uso de la infraestructura supone un gasto que aparece en su cuenta de resultados materializado en el canon que paga al gestor de la infraestructura según la normativa vigente.

Desde el punto de vista global del sistema, el canon que el operador paga al gestor de la infraestructura no constituye un coste, ya que es una transferencia interna entre agentes (como ya se ha señalado). Desde el punto de vista global, este coste corresponde al gestor de la infraestructura.

Por ello, caben dos enfoques para repercutir (a los efectos de esta tesis) el coste de la infraestructura en los costes de explotación y en los costes operativos del servicio:

- Aplicar el canon vigente en cada país. Tiene el inconveniente que el canon puede incluir (y de hecho incluye frecuentemente), conceptos no relacionados con el uso directo de la infraestructura, sino con la capacidad de pago del operador.
- Estimar el coste marginal que produce la circulación del tren sobre la infraestructura.

Para decidir la pertinencia del uso de uno de estos dos sistemas en esta tesis, hay que reflexionar brevemente sobre los sistemas de cánones. En el caso más general, y desde el punto de vista de los costes de infraestructura que se pretende recuperar, se pueden identificar cuatro posibles niveles de recuperación:

- El coste marginal de la utilización de las infraestructuras.
- El coste corriente (fijo más variable) de mantenimiento y de gestión.
- El coste total (incluyendo costes corrientes y los costes de capital).
- Otros cargos por encima del coste total de la infraestructura (cánones ambientales, canon marginal social, etc.)

La previsión de la Directiva 2001/14 sobre cánones.- La Directiva 2001/14/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2001 fija el coste marginal como canon de referencia o canon mínimo: "el canon por utilización de acceso mínimo y acceso por la vía a las instalaciones de servicio, será equivalente al coste directamente imputable a consecuencia de explotación del servicio ferroviario". Añade que "para proyectos de inversión específicos, en el futuro, o que hayan concluido no más de quince años antes de la entrada en vigor de la presente Directiva, el administrador de la infraestructura podrá establecer o mantener tarifas más elevadas basadas en los costes a largo plazo de dichos proyectos si aumentan la eficiencia o la relación coste/eficacia y que de otro modo no se hubieran podido acometer. Un acuerdo tarifario de este tipo puede también incorporar acuerdos sobre el reparto del riesgo asociado con nuevas inversiones". Es decir, el principio general es que el canon es el coste marginal ("coste directamente imputable a consecuencia de explotación del servicio ferroviario"), y solo como excepción se aceptan "tarifas más elevadas".

En principio, el coste marginal puede guardar relación con la velocidad, pero no los "mark up" establecidos sobre él. Cabe señalar, sin embargo, que los trenes de alta velocidad tienen más capacidad de pago y por lo tanto generalmente se les cobra una tarifa más alta por encima del coste marginal; pero esto no tiene necesariamente por qué ser así.

➢ Estimación del coste marginal del uso de la infraestructura

La determinación de los costes que la circulación de un tren produce sobre la infraestructura ferroviaria es objeto de una abundante literatura técnica y económica, centrada en su mayor parte a la fijación de cánones y en la financiación del gestor de la infraestructura. En esta tesis nos basaremos en el sistema de tarifas diseñado por el Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF) en el año 2002 y que, con algunos cambios, fue aplicado en la línea de alta velocidad de Madrid hasta Lleida desde su inauguración en 2003 hasta 2005. Los razonamientos que se realizaron para fijar este canon siguen aún vigentes en buena parte y pueden encontrarse en (GIF, 2002).

El criterio adoptado en esta tesis es que se consideran como costes de explotación del operador (entendidos como los necesarios para mover el tren), los costes marginales de mantenimiento y gestión de la infraestructura. Los "mark-up" (es decir, los cargos por encima de este coste marginal) están relacionados con la política macroeconómica, con la capacidad de pago del operador, con la estrategia de financiación de la infraestructura, etc. y por lo tanto se consideran costes operativos que no son de explotación.

En el diseño del sistema de tarifas aplicadas por el GIF en España hasta 2005 hay una alta relación de causalidad entre el coste de producción y ciertos componentes del canon. En su revisión y adaptación al cálculo de los costes de explotación los importes monetarios han sido actualizados, desde 2005 hasta 2010 para que sean comparables con el resto de las empleadas en la tesis.

Se parte de la estructura de costes de la línea, que se recoge, según su naturaleza y variabilidad, en la tabla 79.

Tabla 79. **Variabilidad de los costes de la infraestructura la línea de alta velocidad de Madrid a Lleida**

	Coste total anual (M€$_{2010}$)	Coste por km (M€$_{2010}$/km)	Porcentaje del total	Porcentaje de los costes corrientes
Costes fijos de capital	104,6	0,237	49,7%	
Costes corrientes fijos	92,2	0,208	43,8%	87,1%
Costes variables nivel uso esperado	13,7	0,031	6,5%	12,9%
Costes totales anuales	201,4	0,476	100%	

Notas: La distancia de Madrid a Lleida es de 442 kilómetros. Se ha aplicado el factor de corrección de 1,199 para pasar la moneda de 2003 (en que se expresaba el documento original) a moneda de 2010.

Fuente: (GIF, 2002).

Los costes corrientes son cubiertos en el esquema del GIF con dos tipos de cánones:

- Para cubrir los costes variables se establece un *canon por circulación* que cubre el desgaste de carril; el desgaste de hilo de contacto; el bateo y la reposición de la geometría de la vía; los seguros y los costes generales asociados a estas actividades.
- Para cubrir los costes fijos de explotación de mantenimiento de la línea, de gestión de la circulación y la seguridad, y los costes generales asociados, se fija un *canon de reserva*. Este canon se imputa por la capacidad reservada o utilizada en relación con la capacidad práctica. La capacidad de mide en surcos por sentido y día, y depende de espaciamiento mínimo entre trenes; de la capacidad de deceleración de éstos, de las bandas de mantenimiento y de las diferencias de velocidad entre trenes sucesivos.

Otros costes fijos no ligados a la circulación de trenes se cubren con tarifas específicas y aedemás se fija un *canon de tráfico* (proporcional a los ingresos del operador) para recuperar una parte de los costes de capital.

Como puede apreciase, de todos estos cánones, el *canon por circulación* es el único que se inscribe en el concepto de coste de explotación a los efectos de esta tesis. En efecto, los costes que se cargan a los operadores con el *canon variable de circulación* incluyen los costes marginales causados por cada circulación a la infraestructura. Se

analizan estos costes a continuación siguiendo la descripción y cuantificación de (GIF, 2002), pero incluyendo la actualización de los importes económicos.

Reposición del carril, cambios y aparatos de vía.- La estimación del coste del carril (ya instalado) por kilómetro de vía sencilla se sitúa en 373 miles de $euros_{2010}$.

La vida del carril se estimó proporcional a las toneladas ficticias que recorren la línea, definidas éstas con criterio de la ficha UIC 714 R (UIC, 1989) para la clasificación de las líneas de acuerdo a su nivel de tráfico.

Se comprobó que los ferrocarriles japoneses renuevan el carril (en promedio) cada ocho años en la línea de Tokio a Osaka en donde el tráfico es de unos 150 de trenes por sentido y día, lo que en ocho años supone un tráfico acumulado de 665 millones de toneladas ficticias (calculadas aplicando la citada ficha UIC con los adecuados factores correctores en función del reparto del esfuerzo de tracción/freno en composiciones de tracción distribuida). Ello implica un coste por depreciación del carril de 0,623 $€_{2010}$ por cada mil toneladas ficticias por kilómetro.

En el canon del GIF se tuvo en cuenta un coeficiente multiplicador de este factor de 0,9 para los ejes que sean guiados o radiales, ya que su agresividad sobre la vía es menor. Sobre el efecto diferencial de los ejes orientados o radiales puede verse (Lukaszewicz, 2006).

Reposición del hilo de contacto.- La estimación del coste de la línea aérea de contacto, por kilómetro de vía electrificada, se sitúa en 106 miles de $euros_{2010}$. Este activo tiene una vida útil de diseño para las presiones habituales de 2 millones de pasadas de pantógrafo. Por lo tanto, el coste por unidad de pantógrafo en captación es de 0,0530 euros por mil pantógrafos.kilómero.

Mantenimiento variable de la geometría de la vía.- Para el cálculo de los costes corrientes variables de mantenimiento para la conservación de la geometría de la vía, se partió del dato de que en la línea Madrid- Sevilla estos costes suponen el 5 % de los costes totales del capítulo de mantenimiento de la vía. Conforme con este dato, 3,850 millones de toneladas dinámicas.kilómetro habrían ocasionado unos costes marginales de mantenimiento de 766 mil $euros_{2010}$, calculando la carga dinámica multiplicando por un factor de 1,2 las toneladas brutas.km circuladas.

Ello significa un coste unitario de 0,199 $€_{2010}$ por cada mil toneladas dinámicas.km.

El canon fue corregido por la relación entre el esfuerzo dinámico real de cada eje y el límite del esfuerzo dinámico establecido. Los límites de esfuerzo dinámico definidos por el GIF eran los siguientes: velocidad menor de 220 km/h, 190 kN por rueda; velocidad entre 220 y 300 kilómetros por hora, 170 kN por rueda; y de 300 a 350 kilómetros por hora, 160 kN por rueda. Los factores de corrección son los siguientes: Cuando es esfuerzo real es de menos del 70 por ciento del admitido, el factor de corrección es de 0,8; cuando está entre 70 y el 80 por ciento, el factor es de 1,3; y cuando está entre el 80 y el 100 por ciento, el factor corrector es de 1,8.

Como gastos generales de gestión así como los seguros asociados a esta parte, se incrementan todos los capítulos anteriores en un 10%. Por tanto, el resumen de los costes resultantes es el indicado en la tabla 80:

Tabla 80. **Costes variables de infraestructura en el canon GIF de 2002**

	Importe €2010	Observaciones
Por 1.000 toneladas ficticias.km	0,6847	
Por pantógrafo.kilometro en captación	0,0583	Unidad de pantógrafo captando energía
Por 1.000 toneladas dinámicas.km	0,1753	Para ejes de hasta 17 toneladas
	0,2848	Para ejes de 17 a 20 toneladas
	0,3944	Para ejes con mas de 20 toneladas

Nota: Se ha aplica el factor de corrección de 1,199 para pasar la moneda de 2003 (en que se expresaba el documento original) a moneda de 2010.
Fuente: (GIF, 2002).

➢ Cálculo de los costes marginales de la infraestructura para los diversos sistemas

Para el cálculo de los costes marginales de la infraestructura más favorable, más desfavorable y representativo en cada uno de los sistemas considerados (LAV; LCM, LCe y LCd) se aplican las tarifas descritas a algunos trenes tipo y posteriormente se asignan estos trenes a los diversos sistemas.

Estimación del coste marginal de trenes concretos

La estructura de esta tarifa con tres componentes no resulta de compleja aplicación, ya que cada tren concreto, una vez definida su composición, se puede traducir en un precio por kilómetro resultante de sumar los tres componentes.

A efectos prácticos, y como ejemplo ilustrativo, se indican seguidamente (en la tabla 81) los costes de circulación por este concepto de diversos trenes que han sido adaptados para los valores del cálculo de los costes de explotación en esta tesis: Se ha supuesto un incremento del 20% en la masa para su extrapolación a toneladas dinámicas, y también se ha supuesto que las mediciones en vía del esfuerzo dinámico de los trenes estaría en el rango del 80 y 100 % del esfuerzo dinámico máximo admitido.

Tabla 81. **Estimación de costes variables para diversos tipos de trenes**

	Nº Pantó-grafos	Masa (t)	Total €2010 / tren.km	Plaza s	Veloc. máxima (km/h)	€2010 / 1000 plazas.km
AVE S/100	1	421	0,49	320	300	2,22
AVE S/103	1	435	0,67	404	350	1,68
AVE s/112	1	330	0,56	365	330	1,53
Avant S/104	1	250	0,42	237	250	1,77
Talgo Larga distancia	1	216	0,36	235	220	1,55
Tren conv. eléctrico (252+c 10.000)	1	352	0,62	375	200	1,66
Tren conv. diésel (334+c 10.000)	0	356	0,56	375	200	1,54
Shinkansen Max E4	1	380	0,58	817	240	0,71
Tren mercanc. ligeras (2 loc. + 15 vag.)	2	1.308	2,17		180	

Nota: Se ha aplicado el factor de corrección de 1,199 para pasar la moneda de 2003 (en la que se expresaba el documento original) a moneda de 2010. Se ha adecuado la nomenclatura de los trenes a las series finalmente adoptadas para designarlas. En todos los trenes eléctricos se ha supuesto un único hilo de contacto en la catenaria.

Fuente: Elaboración propia con datos de GIF (2003) y Naoto (2010)

Como consecuencia, los costes marginales considerados para diferentes sistemas son los indicados en la tabla 82:

Tabla 82. **Coste marginal del uso de la infraestructura por plaza.kilómetro**

	Sistema de alta velocidad (LAV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Coste marginal de uso de la infraestructura				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,222	0,186	0,186	0,164
Valor representativo (c€/p.km)	0,153	0,182	0,182	0,154
Valor más favorable (c€/p.km)	0,071	0,155	0,138	0,111
Rango más desfavorable/más favorable	*3,127*	*1,200*	*1,348*	*1,477*
Comparación (valor representativo) con LAV	*1,000*	*1,190*	*1,190*	*1,007*

Nota: Los resultados están expresados euro por minuto.tren.

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse cómo el coste más bajo corresponde al sistema de alta velocidad (como consecuencia de la mayor ligereza de los trenes, y que por ello se consiguen incluso usos esfuerzos dinámicos y cargas ficticias menores que las los sistemas convencionales).

En los casos en los que la electrificación es corriente continua (valor representativo y valor más desfavorable del sistema convencional mejorado, y todos los valores del sistema convencional eléctrico) el hecho de que existan dos hilos de contacto en la catenaria incrementa el coste correspondiente al desgaste de la catenaria, mientras que este término desaparece en el sistema convencional con tracción diésel que, a pesar de una masa ligeramente mayor, resulta con un coste más reducido por

eliminarse el desgaste de la catenaria y obtiene unos valores muy próximos a los del sistema de alta velocidad.

También puede apreciarse cómo los rangos de variación no son llamativamente amplios, con la excepción del efecto amplificador derivado de considerar como caso más favorable en el sistema de alta velocidad el tren japonés Max E4, que gracias a su arquitectura de dos niveles y de caja ancha consigue una capacidad de 817 plazas en un tren de 200 metros de longitud y con una tara de 380 toneladas.

3.3.6. Costes totales de explotación

Los costes totales de explotación se calcularán por agregación de los diferentes componentes definidos como tales (coste de tenencia del tren, de mantenimiento del material rodante, del personal operativo, costes de la energía de tracción y marginales de mantenimiento de infraestructura). Se calcularán primero por unidad de oferta, y posteriormente por unidad de tráfico o de transporte.

➢ Costes de explotación por unidad de oferta

Valores representativos de los costes de explotación y su rango de variación por unidad de oferta

Sumando los costes unitarios por unidad de oferta (es decir, por plaza.kilómetro) de los conceptos que hemos incluido en los costes de explotación se obtienen los valores de costes más desfavorables, más favorable y representativo para cada sistema, que se indican en la tabla 83 y que se representan en las figuras 69 y 70 .

Como puede observarse, el menor coste corresponde al sistema de alta velocidad. El coste del sistema convencional mejorado es superior en un 43 por ciento; el de convencional eléctrico es superior en un 58 por ciento; y el del convencional diésel es un 85 por ciento más alto que el de alta velocidad.

Los mayores costes (figura 70) son los del posesión o tenencia del material (entre el 37 y el 41 por ciento); y son muy similares los mantenimiento y limpieza del material rodante (31 al 38 por ciento); seguidos de lejos por el de la energía (11 al 16 por ciento) y el del personal que se mantiene en un entorno relativamente reducido (5 al 6 por ciento). En todos los sistemas los costes marginales de la infraestructura son muy reducidos (y tienen un peso entre el 3 y el 6 por ciento en los costes totales de explotación).

De una forma muy aproximada podría afirmarse que alrededor de un tercio de los costes de explotación corresponden a la posesión o tenencia del material, otro tercio al mantenimiento del material; y del tercio restante, la mitad aproximadamente corresponde al coste de la energía de tracción y la otra mitad se distribuye entre partes aproximadamente iguales entre los costes de personal y los marginales de la infraestructura.

Todos los sistemas presentan un cierta variabilidad entre el valor más favorable y el más desfavorable, pero el rango es mucho más reducido que en el caso de la energía, y se mueve entre 1:2 y 1:3,2, correspondiendo el rango más reducido al convencional diésel, y el más amplio a la alta velocidad.

Tabla 83. **Costes totales de explotación por unidad de oferta**

	Sistema de alta velocidad (LAV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Costes de tenencia del tren				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	2,723	4,070	4,726	5,734
Valor representativo (c€/p.km)	0,963	1,479	1,839	2,170
Valor más favorable (c€/p.km)	0,294	0,859	1,044	1,262
Costes de mantenimiento y limpieza				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,978	1,448	1,444	1,839
Valor representativo (c€/p.km)	0,855	1,329	1,263	1,388
Valor más favorable (c€/p.km)	0,571	1,235	1,103	1,486
Costes de energía				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,703	0,940	0,571	0,774
Valor representativo (c€/p.km)	0,370	0,376	0,388	0,604
Valor más favorable (c€/p.km)	0,213	0,210	0,264	0,416
Costes personal operativo				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,240	0,380	0,452	0,491
Valor representativo (c€/p.km)	0,139	0,190	0,242	0,269
Valor más favorable (c€/p.km)	0,035	0,094	0,116	0,136
Coste marginal de mantenimiento de la infraestructura				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	0,222	0,186	0,186	0,164
Valor representativo (c€/p.km)	0,153	0,182	0,182	0,154
Valor más favorable (c€/p.km)	0,071	0,155	0,138	0,111
Total costes de explotación				
Valor más desfavorable (c€/p.km)	4,865	7,025	7,378	9,002
Valor representativo (c€/p.km)	**2,480**	**3,555**	**3,913**	**4,586**
Valor más favorable (c€/p.km)	1,184	2,553	2,664	3,411
Rango más desfavorable/más favorable	*4,1*	*2,8*	*2,8*	*2,6*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*1,43*	*1,58*	*1,85*

Figura 69 . **Variabilidad de los costes totales de explotación por unidad de oferta**

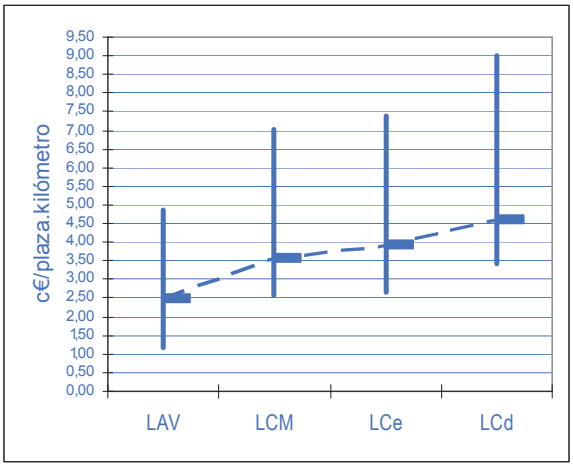
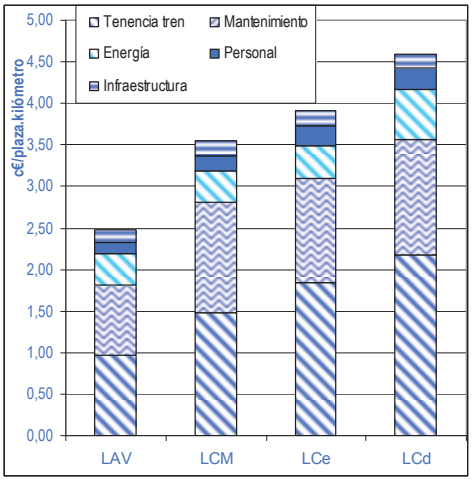


Figura 70 . **Estructura de costes de explotación por unidad de oferta**



Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por plaza.kilómetro.
Fuente: Elaboración propia

Elasticidad de los costes totales de explotación por unidad de oferta con respecto a la velocidad

La elasticidad de los costes con respecto a la velocidad es negativa en todos los casos; es decir, que un aumento de la velocidad supone una reducción de los costes totales de explotación dentro del mismo sistema ferroviario.

En la tabla 84 se puede apreciar la elasticidad de los costes de explotación obtenida de acuerdo con los valores más representativos de cada sistema frente a un aumento del 10 por ciento de la velocidad.

Las elasticidades van desde -0,357 del sistema convencional mejorado hasta -0,197 de sistema de alta velocidad. Quiere ello significar que, aún siendo el sistema de alta velocidad el que tiene menores costes de explotación por unidad de oferta, un aumento del 10 por ciento de la velocidad a igualdad de todos los demás factores produce una reducción de los costes de explotación del 1,97 por ciento.

Tabla 84. **Elasticidad de los costes totales de explotación con respecto a la velocidad**

	Sistema de alta velocidad (AV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Elasticidad del valor representativo	-0,197	-0,275	-0,357	-0,321

Fuente: Elaboración propia

➢ Costes de explotación por unidad de tráfico

Los valores obtenidos anteriormente referidos a la unida de oferta permiten conocer los valores de los costes de explotación y de cada uno de sus componentes por unidad de tráfico (es decir, el coste de explotación en céntimos de euro por viajero.kilómetro ortodrómico).

Para obtener los costes por unidad de tráfico (tal y como se expuso anteriormente), se debe dividir el coste por unidad de oferta por el *aprovechamiento* (viajeros.kilómetro/plazas.kilómetro) y multiplicar por el *coeficiente de trayectoria* (distancia recorrida /distancia ortodrómica).

$$C_{ud.demanda}\left[c€/v.km_{ort}\right]=C_{ud.oferta}\left[c€/p.km\right]\times\frac{1}{Aprov.\left[v.km/p.km\right]}\times CT\left[km/km_{ort}\right] \quad [134]$$

Este indicador (coste por unidad de tráfico) permite la comparación homogénea con otros modos de transporte y entre sistemas ferroviarios con *aprovechamiento* y *coeficientes de trayectoria* estructuralmente diferentes.

Los resultados de los costes totales de explotación por unidad de tráfico para cada uno de los sistemas, y para los valores más desfavorable, más favorable y representativo son los recogidos en la tabla 73 y en la figuras 71 y 72.

Como puede observarse, los costes más bajos siguen siendo los del sistema de alta velocidad y la diferencia es ahora mayor por el menor coeficiente de trayectoria de las líneas de alta velocidad: el coste de explotación por unidad de tráfico en el sistema convencional mejorado es superior en un 48 por ciento, en el convencional eléctrico en un 112 por ciento y en el diésel en un 141 por ciento. La amplitud de los rangos aumenta y toma valores entre 1:38 (convencional mejorado) y 1:6,3 (convencional con tracción eléctrica).

Tabla 85. **Costes totales de explotación por unidad de tráfico (viajero.kilómetro ortodrómico)**

	Sistema de alta velocidad (LAV)	Sistema convencional mejorado (LCM)	Sistema convencional tracción eléctrica (LCe)	Sistema convencional tracción diésel (LCd)
Costes de tenencia del tren				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	6,635	10,192	22,091	23,921
Valor representativo (c€/v.km-ort)	2,009	3,189	5,158	5,907
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	0,515	1,560	2,136	2,400
Costes de mantenimiento y limpieza				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	2,383	3,627	6,753	7,674
Valor representativo (c€/v.km-ort)	1,783	2,865	3,542	3,780
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	1,001	2,241	2,256	2,828
Costes de energía				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	1,713	2,355	2,667	3,228
Valor representativo (c€/v.km-ort)	0,772	0,810	1,090	1,644
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	0,373	0,381	0,539	0,792
Costes personal operativo				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	0,585	0,951	2,111	2,049
Valor representativo (c€/v.km-ort)	0,290	0,409	0,678	0,734
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	0,062	0,170	0,237	0,258
Coste marginal de mantenimiento de la infraestructura				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	0,541	0,466	0,869	0,684
Valor representativo (c€/v.km-ort)	0,319	0,392	0,511	0,419
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	0,124	0,281	0,282	0,211
Total costes de explotación				
Valor más desfavorable (c€/v.km-ort)	11,857	17,590	34,491	37,556
Valor representativo (c€/v.km-ort)	**5,173**	**7,666**	**10,978**	**12,484**
Valor más favorable (c€/v.km-ort)	2,076	4,634	5,450	6,489
Rango más desfavorable/más favorable	*5,7*	*3,8*	*6,3*	*5,8*
Comparación con LAV valor representativo	*1,00*	*1,48*	*2,12*	*2,41*

Figura 71 . **Variabilidad de los costes totales de explotación por unidad de tráfico**

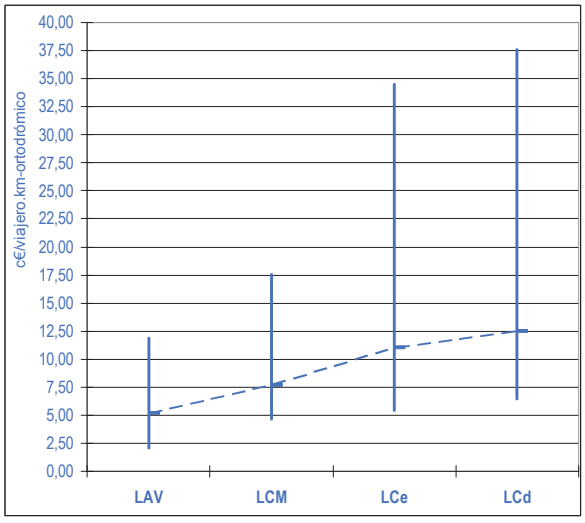
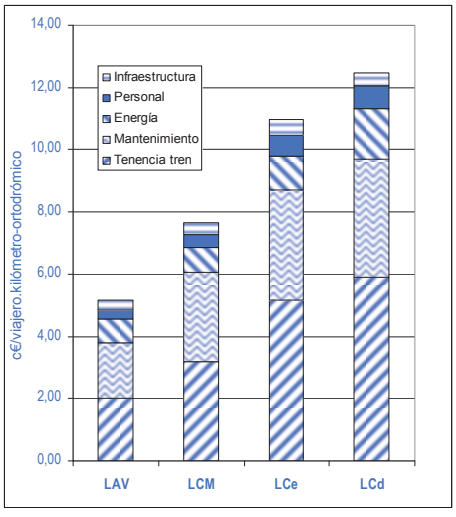


Figura 72 . **Estructura de costes de explotación por unidad de tráfico**



Nota: Los resultados están expresados céntimos de euro por viajero.kilómetro-ortodrómico.
Fuente: Elaboración propia

3.4. Costes operativos no incluidos en el coste de explotación

Hemos considerado *costes operativos no incluidos en los costes de explotación* aquellos que, siendo operativos, no son necesarios para mover el tren en las condiciones normales de funcionamiento para prestar el servicio de transporte, aunque pueden ser necesarios para captar viajeros o para que éstos puedan adquirir sus billetes o títulos de transporte.

El interés de su análisis en un estudio referido a la relación entre los costes y la velocidad, no radica en conocer su cuantía absoluta (ya que, por definición, estos costes no tienen relación con la velocidad), sino el orden de magnitud de su peso relativo en los costes totales, para poder estimar (si se estima necesario) el efecto de la velocidad en los costes operativos totales.

Se pueden identificar en el transporte de viajeros por ferrocarril tres grandes grupos en los costes operativos no incluidos en el coste de explotación:

- Los costes comerciales, entendiendo por tales los de venta, publicidad y los servicios a los viajeros a bordo del tren o en tierra. Incluyen la remuneración al canal de ventas y distribuidores, las comidas a bordo incluidas en la tarifa, el seguro obligatorio de viajeros, etc.
- Los costes generales de empresa operadora, tales como su personal indirecto, coste de oficinas, intereses del circulante, etc.
- Los gastos derivados de los pagos por el uso de la infraestructura por encima del coste marginal directo producido por el tren, así como otros impuestos. En realidad, éstos son costes del operador pero no son costes de la operación desde el punto de vista del sistema, puesto que se trata de transferencias internas entre agentes y sirven para compensar parcialmente otros costes del sistema o costes económico-sociales no cubiertos.

Estos costes, como se ha indicado, no dependen de la velocidad, pero en muchas ocasiones sí que crecen al aumentar el valor añadido por el servicio de transporte. Como en general los servicios de alta velocidad generan más valor y suelen soportar mayores costes de este tipo. Para evitar la confusión, en este apartado reemplazaremos la clasificación que hemos venido empleando de “sistema de alta velocidad”, “sistema convencional mejorado” y “sistema convencional”, por la de “servicios de alto valor añadido” (AVA), “servicios de valor añadido medio” (MVA) y “servicios de bajo valor añadido” (BVA). Aunque con frecuencia los servicios de alta velocidad son los que tienen más valor añadido, obviamente, no deben entenderse ambas clasificaciones como necesariamente equivalentes.

3.4.1. Costes comerciales

➢ Costes de venta y distribución

Los costes de ventas y de distribución corresponden a la remuneración de los recursos necesarios poder informar debidamente a los viajeros potenciales, venderles su billete o título de transporte, así como realizar el control de accesos y de la vigencia de los títulos de transporte.

La parte cuantitativamente más importante de estos costes corresponde a la venta de los billetes. A su vez, dentro del coste de venta pueden distinguirse dos componentes: el coste del sistema de ventas (billetes físicos, DGS, redes de comunicaciones, sistemas informáticos, periféricos e impresoras) y costes del personal de ventas y de los locales necesarios para hacer la venta.

Los billetes pueden venderse a través de diferentes canales, cada uno con un nivel y una estructura de coste diferente:

- Taquillas, normalmente en las estaciones.
- Agencias de viaje.
- Por teléfono.
- Por Internet.

En todos los casos existe una empresa externa o un departamento de la propia empresa operadora, que realiza esta tarea, para lo cual necesita personal, locales y equipos que deben ser remunerados.

El pago al canal de distribución normalmente se hacía mediante una comisión sobre las ventas, con un "rappel" adicional en función de su venta anual. Progresivamente se ha ido excluyendo del billete este coste de gestión, de forma normalmente que se remunera a las agencias de viajes con una cantidad mínima (alrededor del 0,5 por ciento en España en 2011) y éstas cargan al viajero el importe correspondiente a su gestión.

En el caso de las taquillas de las estaciones, sigue vigente el sistema tradicional de remuneración consiste en el una parte proporcional del importe del billete (en España, es alrededor del 10%).

Típicamente el coste global del sistema de venta solía estar entre el 10 y el 15 por ciento del importe de los billetes, y este valor podría considerarse válido tanto para servicios de largo recorrido (con billetes más complejos de vender y de un importe mayor), como para cercanías (con un coste de venta más reducido pero que debe compararse con un importe también muy bajo del billete).

Puede considerarse en la actualidad para los costes totales de venta de los servicios de largo recorrido un valor medio del 4 al 6% sobre los ingresos (considerando un tercio de venta en taquilla, otro tercio por agencia y el resto por Internet y por teléfono); y se mantienen en el entorno del 8-10% en cercanías.

➢ Publicidad y red de ventas

Los costes de publicidad y los de la red de ventas (agentes comerciales, promotores para viajes de grupos, etcétera) dependen lógicamente de numerosos factores, por lo que resulta muy difícil dar valores aproximados, si bien puede señalarse, dada su baja cuantía en general, que un valor hoy representativo puede ser entre el 0,5 y el 2,5% del importe de las ventas.

En entornos más competitivos, los costes de publicidad serán mayores, y también lo serán en entornos de servicios con más opciones para el cliente. Por tanto en cercanías serán comparativamente reducidos. También sean más importantes los costes de publicidad en los momentos iniciales de lanzamiento del servicio que en momentos posteriores. Serán proporcionalmente mayores en empresas pequeñas que empresas grandes, en las cuales el coste se puede dividir entre un mayor número de viajeros.

En el entorno ferroviario puede pensarse en valores del orden del 0,5% en servicios de cercanías, del 1,5% en servicios de largo recorrido y hasta del 2,5% en empresas

de pequeña dimensión y entrantes en entornos competitivos. Como puede observarse, no hay relación intrínseca entre estos costes y la velocidad del servicio.

➢ Costes de servicios a los viajeros a bordo y en tierra

Las empresas operadoras de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril, especialmente en el ámbito de larga distancia, con frecuencia ofrecen a sus viajeros servicios adicionales al propio transporte en las estaciones y a bordo de los trenes. Ejemplos de estos servicios pueden ser los siguientes:

- En las estaciones: derecho a usar salas de espera preferentes, franquicias en el aparcamiento, etc.
- En los trenes: entrega de prensa y revistas, restauración, servicio de bebidas, pase de películas, música, etc.

Las razones por las que se ofrecen estos servicios son muy diversas: en unas ocasiones, para aumentar la competitividad o el atractivo de la oferta; en otras, para reducir la percepción del tiempo de viaje, aumentando la posibilidad de utilización del tiempo. En cualquier caso, cuando estas atenciones al viajero no están incluidas en el precio del billete (ya sea para todos los viajeros, ya sea para una parte, por un ejemplo los que viajan en clases preferentes) suponen unos costes del operador.

Si diversos son los servicios según las compañías, trenes y clases; los costes para compensar los servicios son igualmente variables, tanto en su estructura como en su cuantía.

Por dar un orden de magnitud, los servicios de viajeros largo recorrido en España (que está en la banda alta en cuanto a servicios a bordo) pueden suponer un coste de hasta 5 euros por viajero. Comoquiera que solamente afecta a los viajeros de clases Preferente y Club que se estiman en un 20% de los viajeros totales, el coste medio de estos servicios puede llegar hasta 25 euros por cada viajero que los percibe. Estos costes en servicios de larga distancia más convencionales pueden estimarse en unos 3 a 5 euros por viajero medio, y son muy bajos (prácticamente nulos) en servicios de cercanías.

Debe observarse que en servicios nocturnos, con un alto porcentaje de plazas de camas y literas, y con el servicio de restauración incluido en el billete (es el caso de los TrenesHotel en España) estos costes pueden pasar de los 15 euros por viajero medio.

3.4.2. Costes generales

Los costes generales en la operación de los servicios de viajeros por ferrocarril incluyen el coste del personal de estructura y directivos, las oficinas, locales y equipos generales, la energía para usos distintos de tracción, los costes del capital circulante, así como todos aquellos que son necesarios para el funcionamiento ordinario de la empresa en lo que se refiere a las actividades típicas, pero que no están incluidos en los conceptos anteriores. Estos costes no difieren esencialmente en su cuantía de los que se observan en otro tipo de empresas del sector.

Los porcentajes observados para diferentes compañías españolas del sector del transporte (incluyendo el coste de la publicidad) son:

- Empresa ferroviaria integrada: 8%.
- Aerolínea de bandera: 11%.
- Aerolínea “joven”: 8%.
- Compañías de autobuses: 7 a 7,3 %.

Con estos resultados es posible asumir un valor típico del porcentaje de costes generales de la compañía sobre ingresos en el entorno del 8%, que deduciendo un 1,5% correspondiente a la publicidad, quedaría en el 6,5%. En alta velocidad, pueden ser más bajos, del orden de 3% dada la alta percepción media y la densidad de la explotación, con muchos servicios de alta ocupación en pocas rutas y relativamente pocas estaciones, así como con reducido personal a bordo.

3.4.3. Relación entre los costes comerciales y generales y los costes de explotación

Como se ha indicado, la razón de exponer en esta tesis algunos aspectos relativos a los costes operativos que no son de explotación (y que, por ello, no tienen relación con la velocidad ni con el sistema de alta velocidad) estriba en la conveniencia de conocer su orden de magnitud en comparación con los costes de explotación.

De acuerdo con las consideraciones y datos expuestos en los apartados anteriores, y con todas las precauciones, en la tabla 86 se expresan valores verosímiles del peso de estos costes en los ingresos y (con una estimación de los posibles relaciones entre los ingresos y los costes de explotación) de la relación de los estos costes con los costes de explotación.

Se observa que el peso puede llegar a ser muy grande: oscila entre el 6,5 por ciento y el 82,5 por ciento de los costes de explotación. Los valores representativos más reducidos se encuentran en el “sistema de bajo valor añadido” (24,7 por ciento) y van creciendo hasta el “sistema de alto valor añadido” (51,0 por ciento). La razón hay que buscarla tanto en el crecimiento del valor absoluto de los costes comerciales y generales al crecer el valor añadido, como en la reducción de los costes de explotación.

Tabla 86. **Relación entre los costes comerciales y generales y los costes de explotación**

	Sistemas de alto valor añadido (AVA)	Sistemas de valor añadido medio (MVA)	Sistemas de bajo valor añadido (BVA)
Porcentaje de costes comerciales sobre ingresos			
Valor más desfavorable	0,175	0,175	0,175
Valor más representativo	0,105	0,105	0,125
Valor más favorable	0,035	0,035	0,035
Porcentaje de costes generales sobre ingresos			
Valor más desfavorable	0,1	0,1	0,1
Valor más representativo	0,065	0,065	0,065
Valor más favorable	0,05	0,05	0,05
Relación estimada ingresos/costes de explotación			
Valor más representativo	3	1,5	1,3
Porcentaje de costes comerciales y generales sobre los costes de explotación			
Valor más desfavorable	82,5%	41,3%	35,8%
Valor más representativo	51,0%	25,5%	24,7%
Valor más favorable	15,0%	7,5%	6,5%

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Coste del uso de infraestructura por encima del coste marginal

Los cánones por el uso de la infraestructura ferroviaria generalmente se refieren al coste marginal, pero en muchos casos adoptan valores más elevados para recuperar con ellos una parte de los costes fijos, e incluso una parte o la totalidad de los costes de capital derivados de la construcción y equipamiento de la línea.

En el panorama mundial se presentan toda clase de casos en lo referido a la cuantía y a la estructura de los cánones; al nivel de recuperación de costes que persiguen; y a los indicadores que se emplean para calcular cada uno de los componentes. Puede verse al respecto (López Pita et al., 2006).

Dada la variedad de los casos existentes, en este apartado vamos a emplear el caso de España, donde para los servicios de viajeros rige el criterio de cubrir el coste marginal y una pequeña parte del coste fijo en las líneas convencionales; mientras que en las líneas de alta velocidad se aplican cánones mayores que pretenden recuperar la totalidad del coste (incluso del capital), aunque el criterio de cálculo que se emplea es discutible y discutido ((García Álvarez & Fernández Arévalo, 2011). En estas líneas de alta velocidad, y para trenes con velocidad máxima por encima de 260 kilómetros por hora, se aplica para recuperar los costes fijos y de capital un *canon por tráfico* que es proporcional a las plazas kilómetro.ofertadas.

En todo caso, los costes de las estaciones son cubiertos por un *canon de uso de las estaciones por los viajeros* que consiste en una cantidad por cada viajero subido o bajado en la estación. La cuantía por viajero es diferente según el tipo de estación y según la distancia del viaje.

Otros cánones (como el de acceso, la tasa de seguridad, el canon por uso de las vías de estacionamiento, el de paso por los cambiadores de ancho, etc.) tienen en general cuantías más reducidas y menor interés para su estudio por su carácter local y en muchos casos coyuntural; además de que no presentan diferencias relevantes según el sistema sea o no de alta velocidad, ni según la velocidad de los trenes.

A los efectos relevantes en esta tesis (que se limitan, para el canon por encima del marginal a conocer el orden de magnitud del porcentaje que representan sobre los costes operativos totales o sobre el coste de explotación) se calculará la repercusión de este canon en el formato y cuantía vigente en España en 2011.

Cánones por el uso de las líneas

En el sistema español vigente en 2011 los cánones que se repercuten por la circulación de los trenes o uso de la capacidad son dos: el *canon por reserva de capacidad* (modalidad B) y el *canon por circulación* (modalidad C). Además, en ciertas líneas, y para los trenes de más de 260 km/h se aplica el *canon por tráfico* (modalidad D).

En la tabla 87 se recogen los valores vigentes para 2011, excluyendo los servicios de pruebas. Para una mayor simplicidad expositiva (compatible con el objetivo perseguido en el análisis), se ha supuesto que el 20 por ciento de las horas son punta, el 70 por ciento son horas-valle, y el 10 por ciento son horas-llano. El canon por tráfico (que se calcula por plaza-kilómetro) se ha repercutido por kilómetro.tren, para lo cual se ha supuesto el tren-tipo anterior de 450 metros cuadrados útiles y se considera el mismo coeficiente de densidad aplicado anteriormente a los servicios de alta velocidad (0,86) y por ello se supone una capacidad (y oferta) de 387 plazas.

Tabla 87. **Cánones aplicados en España por circulación, reserva de la capacidad y tráfico**

Tipo de línea	V1 (viajeros V_{max}>260 km/h)	V2 (Viajeros V_{max}<260 km/h)	M (Mercancías)
Canon por reserva de capacidad (€$_{2011}$/km.tren)			
A1 (Alta velocidad excepto líneas A2)	2,480	1,318	
A2 (AV Mad. a Sevilla, Sagra a Toledo y Zgz. Huesca)	2,375	1,255	
B (Corredor Mediterráneo)	0,758	0,260	0,106
C (Resto red)		0,119	0,106
Canon por circulación (€$_{2011}$/km.tren)			
A1 (Alta velocidad excepto líneas A2)	2,160	0,830	
A2 (AV Mad. a Sevilla, Sagra a Toledo y Zgz. Huesca)	2,060	0,750	
B (Corredor Mediterráneo)	0,650	0,060	0,060
C (Resto red)		0,060	0,060
Canon por tráfico (€$_{2011}$/plaza.km)			
A1 (Alta velocidad excepto líneas A2)	0,872		
A2 (AV Mad. a Sevilla, Sagra a Toledo y Zgz. Huesca)	0,816		
B (Corredor Mediterráneo)			
C (Resto red)			
Canon por reserva, circulación y tráfico repercutido por kilómetro.tren (€$_{2011}$/km.tren$_{450m^2=87plazas}$)			
A1 (Alta velocidad excepto líneas A2)	8,015	2,148	
A2 (AV Mad. a Sevilla, Sagra a Toledo y Zgz. Huesca)	7,593	2,008	
B (Corredor Mediterráneo)	1,398	0,320	0,166
C (Resto red)		0,250	0,166

Fuente: Declaración sobre la red Adif, 2011. Elaboración propia

Canon de uso de estaciones por los viajeros

El coste transferido al operador por el uso de la estaciones por los viajeros es normalmente una cantidad por cada viajero que sube al tren o que baja de él (tabla 89). La cantidad depende del recorrido del viajero (mayores recorridos suponen mayores tasas) y de los servicios de la estación (estaciones con más servicios suponen costes mayores).

El coste unitario es siguiente:

$$st = \frac{ST_s + ST_b}{Rm} \times 100$$

Donde: st es el coste unitario derivado del uso de las estaciones [c€/viajero.km]; ST_a y STb son, respectivamente, las tasa de las estaciones en las que el viajero sube y baja del tren para el tipo de tren de que se trate; Rm es el recorrido medio del viajero [km].

Tabla 88. **Canon por el uso de la estaciones Red Adif en 2010**

Categoría de la estación	Tipo de trayecto			
	A (>250 km)	B (126 a 250 km)	C (80 a 125 km)	D (menos de 80 km)
1ª (€/viajero subido o bajado)	0,84	0,46	0,2	0,08
2ª (€/viajero subido o bajado)	0,52	0,33	0,15	0,06
3ª (€/viajero subido o bajado)	0,04	0,04	0,04	0,02

Importe en euros por viajero.
Fuente: Declaración sobre la Red Adif 2010

En la práctica, en España, para los servicios de largo recorrido, resulta un coste medio (2011) entre 0,7 y 1,68 euros por viajero, que se traduce en valores del orden de 0,2 y 0, 5 céntimos de euro por viajero.kilómetro.

Para servicios de cercanías los valores más habituales son de 12 a 16 céntimos de euro por viajero (con recorridos medios del orden de 25 kilómetros) y para servicios regionales suelen ser del orden de 40 a 60 céntimos por viajero con recorridos medios de 80 kilómetros.

Repercusión de los cánones por uso de la infraestructura y estaciones por kilómetro tren según tipo de servicio

Los datos anteriores permiten estimar de forma aproximada (realizando las suposiciones oportunas) los cánones cargados por el uso de la infraestructura y la estaciones por kilómetro.tren. Para ello se ha supuesto que el "sistema de alto valor añadido" se corresponde con las líneas tipo A1 y servicio V1; que el "sistema de valor añadido medio" se corresponde con las de tipo B y servicio V2; y que el sistema de "bajo valor añadido" aplica en las de tipo C y servicio V2.

Para el reparto del canon por el uso de estaciones se supone que los trenes (de 450 metros cuadrados útiles) del "sistema de valor añadido medio" tienen 401 plazas y aprovechamiento del 62,6% (lo que implica una media de 250 viajeros); y los del "sistema de bajo valor añadido" tienen 436 plazas y aprovechamiento del 52,4% (por tanto, 228 viajeros). Todos los valores de densidad de plazas y aprovechamiento son los que se han empleado en el cálculo de los consumos de energía.

Por lo que se refiere al tipo de estación y de trayecto, se entiende en todos los casos que los trayectos son tipo A (de más de 250 kilómetros). Se supone que los viajeros de los servicios de alto valor añadido emplean una estación tipo 1 y otra tipo 2 (canon total de 1,36 €/viajero); y que los viajeros de los otros dos tipos de servicio emplean una estación tipo 2 y otra estación tipo 3 (total 0,56 €/viajero). En todos los casos se calcula con un recorrido medio del viajero (Rm) de 475 kilómetros.

Con todas las suposiciones indicadas se ha calculado, para cada sistema, el canon de reserva, tráfico circulación al que se le ha añadido el reparto del canon de estaciones entre los kilómetros-tren. Posteriormente se ha restado el coste marginal de mantenimiento de la infraestructura. El resultado es el canon cargado por encima del marginal y se expresa en tres niveles (tabla 89): por kilómetro.tren; por unidad de oferta (plaza.kilómetro) y por unidad de tráfico (viajero kilómetro-ortodrómico). Para el cálculo de estos dos últimos indicadores se han empleado los coeficientes de trayectoria, de aprovechamiento y densidades de plazas utilizados en la sección relativa a los consumos de energía.

Tabla 89. **Repercusión de los costes de infraestructura por encima del coste marginal**

	Sistema de alto valor añadido (AVA)	Sistema de valor añadido medio (MVA)	Sistema de bajo valor añadido (BVA)
C. reserva, tráfico y circulación (€2011/km.tren)	8,015	0,320	0,166
Canon de estaciones (€2011/viajero)	1,360	0,560	0,560
C. total incluyendo estaciones (€2011/km.tren)	8,682	0,615	0,435
Coste marginal infraestructura (€2011/km.tren)	0,592	0,729	0,794
Canon por encima del marginal (€2011/km.tren)	8,090	-0,114	-0,360
Canon por encima del marginal (c€2011/p.km)	2,090	-0,029	-0,082
Canon por encima del marginal (c€2011/v.km-ort)	4,361	-0,061	-0,231

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que, con la excepción del sistema de alto valor añadido (en el que el canon de tráfico tiene un peso importante), en el resto de los sistema los cánones son prácticamente iguales al coste marginal por el uso de la infraestructura, lo que confirma la hipótesis de que en las líneas convencionales españolas rige la tarifación al coste marginal, e incluso quizá en la práctica se pudiera estar tarifando ligeramente por debajo del coste marginal (cuyo cálculo, como se ha indicado, es complejo y polémico).

3.4.5. Comparación del orden de magnitud de los costes de explotación con el total de los costes operativos

Hasta ahora se han estimado: a) los costes de explotación en cada uno de los sistemas ferroviarios estudiados (alta velocidad, convencional mejorado y convencional); b) los costes comerciales y generales en cada uno de los sistemas según su valor añadido; y c) los cánones cargados por encima del coste marginal de la infraestructura. Como se ha indicado repetidamente, solo los costes del primer grupo (los de explotación) presentan relación con la velocidad, pero resulta de interés compararlos con los otros costes operativos a fin de conocer el peso total de los costes de explotación (y por ello los que están relacionados con la velocidad) sobre los costes totales.

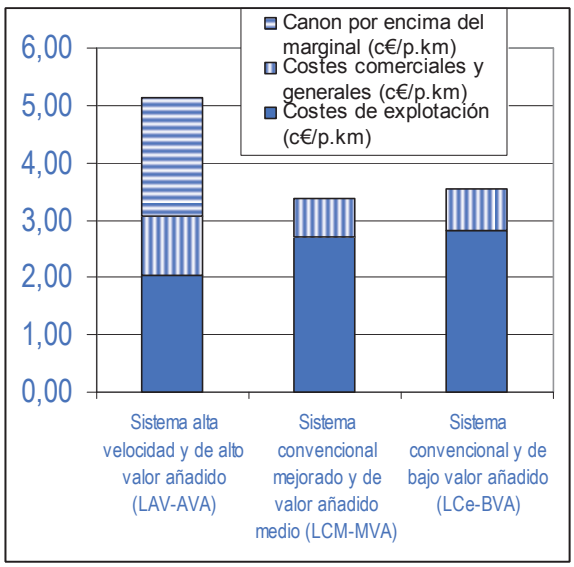
Para esta estimación del peso relativo, se asocia (no tiene por qué ser necesariamente así, pero será lo más frecuente) el sistema de alta velocidad con los costes correspondientes al sistema de alto valor añadido; el convencional mejorado con los costes del sistema de valor añadido medio; y el sistema convencional con los costes del sistema de valor añadido bajo.

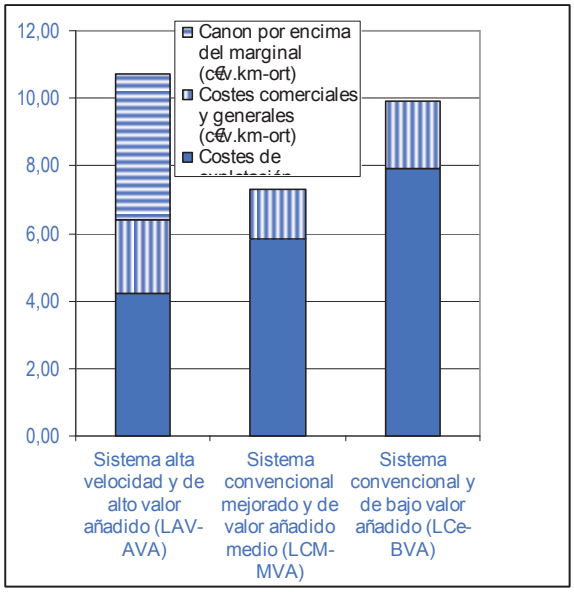
Los resultados son los que se muestran en la tabla 90 y en la figura 73. En ellas puede comprobarse que los costes de explotación no solo son más bajos en el valor absoluto en el sistema de alta velocidad, sino que su peso relativo de alrededor del 40 por ciento del total es la mitad del peso relativo de los costes de explotación en los otros sistemas analizados.

Tabla 90. **Peso de los costes de explotación en los costes operativos totales**

	Sistema alta velocidad y de alto valor añadido (LAV-AVA)	Sistema convencional mejorado y de valor añadido medio (LCM-MVA)	Sistema convencional y de bajo valor añadido (LCe-BVA)
Costos operativos por unidad de oferta			
Costes de explotación (c€/p.km)	2,025	2,696	2,831
Costes comerciales y generales (c€/p.km)	1,033	0,687	0,699
Canon por encima del marginal (c€/p.km)	2,090	-0,029	-0,082
Coste total (c€/p.km)	5,149	3,355	3,448
Costes operativos por unidad de tráfico			
Costes de explotación (c€/v.km-ort)	4,22	5,81	7,94
Costes comerciales y generales (c€/v.km-ort)	2,15	1,48	1,96
Canon por encima del marginal (c€/v.km-ort)	4,36	-0,06	-0,23
Coste total (c€/v.km-ort)	10,741	7,235	9,674
Peso de cada uno de los costes operativos			
Costes de explotación (c€/p.km)	39,34%	80,36%	82,11%
Costes comerciales y generales	20,06%	20,49%	20,28%
Canon por encima del marginal (c€/p.km)	40,60%	-0,85%	-2,39%

Figura 73 . **Representación gráfica de cada uno de los componentes de los costes operativos**





Fuente: Elaboración propia

4. APLICACIÓN A LOS CASOS-EJEMPLO

Los modelos analíticos desarrollados y utilizados en la presente tesis han sido concretados con valores que se estiman como representativos de cada sistema (AV, LCM, LCe, LDe). También se han concretado con los valores extremos (más favorables y más desfavorables) que se estiman posibles. El objeto de estas aplicaciones del modelo ha sido establecer relaciones numéricas concretas para comparar casos teóricos representativos y analizar el rango de la variación de los resultados y sus elasticidades.

Sin embargo, las decisiones concretas que requieren datos de consumo de energía y de emisiones deben adoptarse aplicando los valores del caso real, que en muchas ocasiones suponen interactuaciones entre diversos parámetros. Así, por ejemplo, las líneas de alta velocidad permiten más velocidad y normalmente tienen menos recorrido entre los mismos puntos, pero suelen tener rampas más pronunciadas, lo que limita la carga de los trenes de mercancías, contribuyendo así a aumentar el consumo y el coste por cada unidad transportada. En este caso no es evidente si en la realidad, la reducción del consumo unitario propiciado por la mayor homogeneidad del perfil de velocidades llega a ser compensada por la menor carga del tren.

Parece conveniente, por ello, aplicar los modelos a diversos casos-ejemplo tomados de la realidad, cada uno con diversos escenarios, para poder contrastar los resultados obtenidos con los valores genéricos con los que se obtendrían en la realidad, y para ver cómo puede orientarse la aplicación de estos modelos a la toma de decisiones prácticas.

Es importante destacar que los resultados de los casos ejemplos no corresponden a medidas reales, sino son resultados de simulaciones para las que no se han empleado los valores genéricos representativos (como en el estudio anterior), sino los valores de escenarios concretos reales.

4.1. Definición de los escenarios y metodología de la aplicación

Antes de entrar en la presentación y el análisis de los resultados, se definirán de forma concreta los escenarios de estudio y se explicará la metodología aplicada para el análisis de los casos. Seguidamente se expondrán los datos de los tramos de infraestructura y de los vehículos empleados en los casos-ejemplo.

4.1.1. Definición de escenarios

El efecto de la alta velocidad sobre el consumo de energía (y emisiones) y sobre los costes de explotación se aplica a dos grupos de casos-ejemplo que comprenden respectivamente tres y dos escenarios diferentes (figura 74):

- 1. El primer grupo de casos incluye tres líneas representativas de cada uno de los sistemas analizados:
- 1.1. Sistema de alta velocidad, para el cual se emplea el tramo de Madrid a Lleida de la nueva línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, en servicio desde 2003.
- 1.2. Sistema convencional mejorado, que se representa en el tramo entre Alicante y Castelldefels de la línea de Alicante a Barcelona llamada "Corredor Mediterráneo", que fue puesta en servicio entre 1861 y 1882, y

que fue mejorada para su adaptación a la alta velocidad (200 kilómetros por hora) entre los años 1994 y 2006.

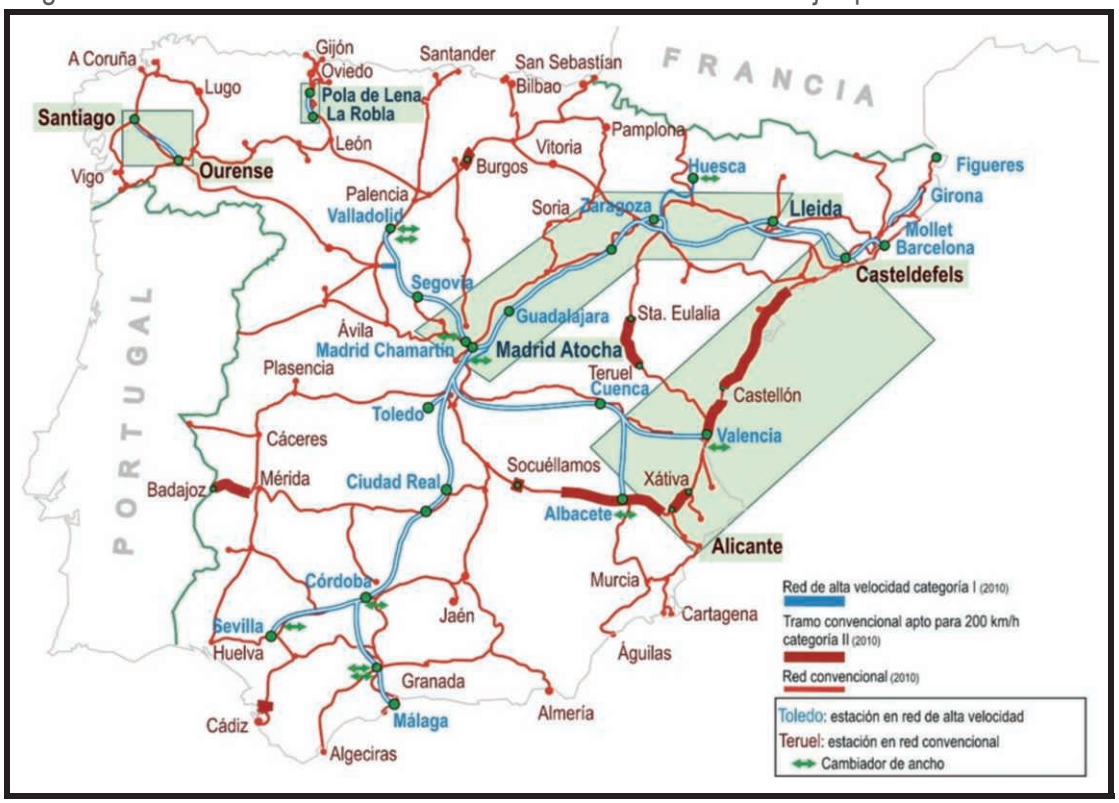
- 1.3. Sistema convencional con tracción eléctrica, para el que se emplea el recorrido de Madrid a Lleida de las líneas convencionales de Madrid a Barcelona (hasta Zaragoza) y de Zaragoza a Barcelona, que fueron puestas en servicio entre 1859 y 1861.

- 2. El segundo grupo de casos corresponde a la comparación de dos tramos singulares en los que existe una nueva línea de alta velocidad diseñada para velocidades máximas de hasta 350 km/h en paralelo con una línea convencional entre los mismos puntos, pero con unas características de trazado y longitud muy diferentes:

- 2.1- Tramos de los túneles de Pajares (entre La Robla a Pola de Lena) en las líneas de León a Gijón (de alta velocidad y convencional).

- 2.2. Tramos de Ourense a Santiago (en la línea de alta velocidad de Olmedo a Santiago y en la convencional de Medina del Campo a La Coruña).

Figura 74 .- Situación en la red de los tramos estudiados en los casos-ejemplo



Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis Eduardo Mesa)

4.1.2. Metodología

Los consumos de energía y las emisiones se calcularán en cada uno de los casos que se comparan (como se ha realizado con anterioridad) con dos divisores: por unidad de oferta; y por unidad de tráfico.

La unidad de oferta empleada será diferente según los casos: En la comparación de las líneas representativas de cada uno de los sistemas se empleará el consumo por kilómetro.tren, ya que todos los trenes empleados en la comparación tienen el mismo tamaño (450 metros cuadrados de superficie bruta útil). En el caso del análisis

de las líneas singulares, como los trenes empleados para la comparación tienen tamaños muy diferentes, los resultados se convertirán en unitarios por plaza.kilómetro.

Los resultados por unidad de tráfico en todos los escenarios serán expresados por viajero transportado en el conjunto del recorrido (en el caso de los servicios de viajeros), o por unidad de carga neta es decir, por tonelada neta (en el caso de los servicios de mercancías).

Al analizar los costes de explotación únicamente tendremos en cuenta los que son diferenciales entre los distintos casos que se comparan, pues resulta inútil (y fuente de posibles errores) formular hipótesis innecesarias sobre ciertos costes que no son intrínsecamente diferentes en los casos analizados. Se analizan, por tanto, los costes que hemos denominado *de explotación*, pero no el resto de los costes operativos.

Con el análisis del primer grupo de casos se pretende comparar los consumos y los costes de los tres sistemas analizados (alta velocidad, convencional mejorado y convencional). En consecuencia, y para recoger el efecto del diferente *coeficiente de trayectoria*, se han escogido tramos que unen localidades separadas por la misma distancia ortodrómica (387,8 kilómetros, que es la existente entre Madrid y Lleida, que se convierte en 442,2 kilómetros por la línea de alta velocidad y en 530,1 kilómetros por la línea convencional). El círculo de 387,8 kilómetros de radio desde Alicante corta al Corredor Mediterráneo en Castelldefels, a 508,6 kilómetros de Alicante, cerca de ya de Barcelona. Así pues, los respectivos *coeficientes de trayectoria* para los recorridos seleccionados son: 1,14 para la línea de alta velocidad; 1,31 para la línea convencional mejorada; y 1,37 para la línea convencional. El cociente entre la distancia de Madrid a Lleida por la línea convencional y por la de alta velocidad es de 1,19.

4.1.3. Datos de la infraestructura empleados en las comparaciones

Seguidamente se describen brevemente las principales características de las líneas ferroviarias utilizadas en la comparación.

➢ Líneas representativas de cada sistema

Líneas de Madrid a Lleida (convencional y de alta velocidad)

La sección de Madrid-Puerta de Atocha a Lleida-Pirineus es una parte importante de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona y Francia (MBF); mientras que el trazado convencional entre los mismos puntos utiliza hasta Zaragoza la línea de Madrid-Atocha a Barcelona (construida por MZA), y entre Zaragoza y Lleida discurre por la línea de Zaragoza Arrabal a Barcelona-Vilanova (construida por la Compañía del Norte).

Ambas líneas nacen en Madrid Atocha, rodeando la ciudad por el Este para después adentrarse en el valle del Henares en altitudes que oscilan entre los 600 y 700 metros. Las líneas continúan ascendiendo hasta el municipio de Torralba, en donde la convencional alcanza su cota máxima de 1.090 metros, y la de alta velocidad llega hasta los 1.217 metros cerca de Medinaceli, donde se sitúa el punto más elevado de la red ferroviaria mundial de alta velocidad.

A partir de ese punto de cota máxima, las líneas descienden hacia el valle del Ebro con pendientes máximas de 14 mm/m en el trazado convencional (cerca del río Jiloca) y de 25 mm/m en el de alta velocidad (por el altiplano), hasta Calatayud.

Salvan las zonas montañosas subsiguientes en el entorno de Paracuellos con diferentes estrategias hasta llegar a Zaragoza entrando en la capital aragonesa por el Oeste

El trazado convencional cruza el Ebro en la misma capital y remonta hacia el Norte hasta Zuera, buscando la proximidad de Huesca, para después cambiar de dirección hacia el Este hasta alcanzar Lleida. La línea de alta velocidad sale de Zaragoza más al Sur, cerca de Fuentes de Ebro, para cruzar el Ebro y la AP2 a unos 20 kilómetros de Zaragoza y sigue un trazado más directo, relativamente paralelo a la autopista AP2.

En la figura 75 aparece representada la planta de la dos lineas, y en la figura 76, los dos perfiles comparados.

Figura 75 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional de Madrid a Lleida

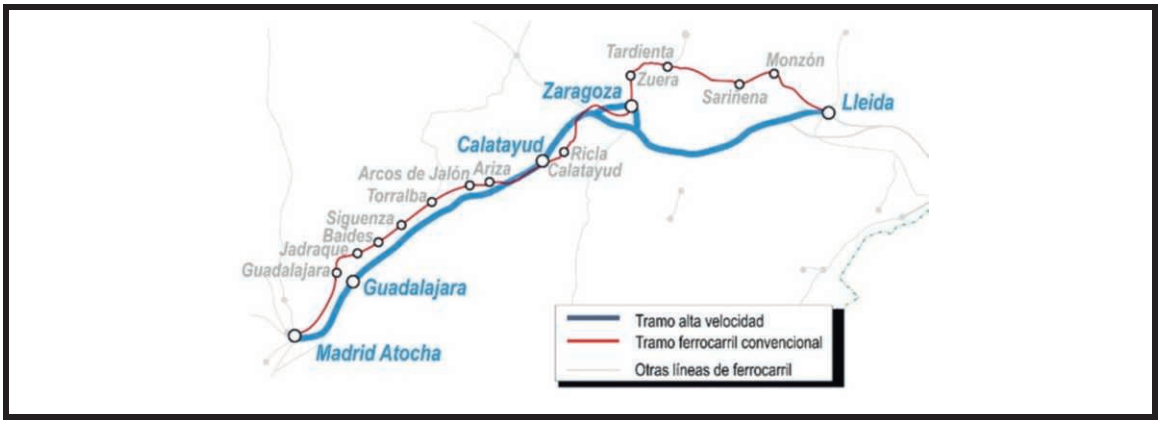
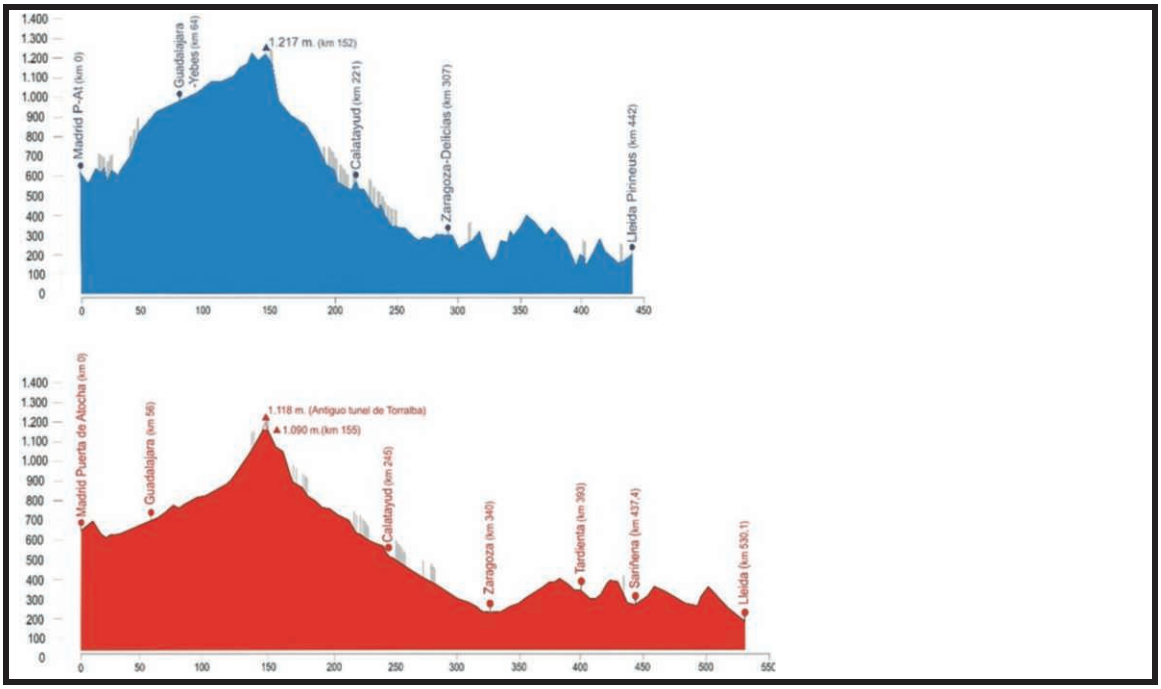


Figura 76 .- **Perfiles de las líneas de alta velocidad y convencional de Madrid a Lleida**



Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis Eduardo Mesa)

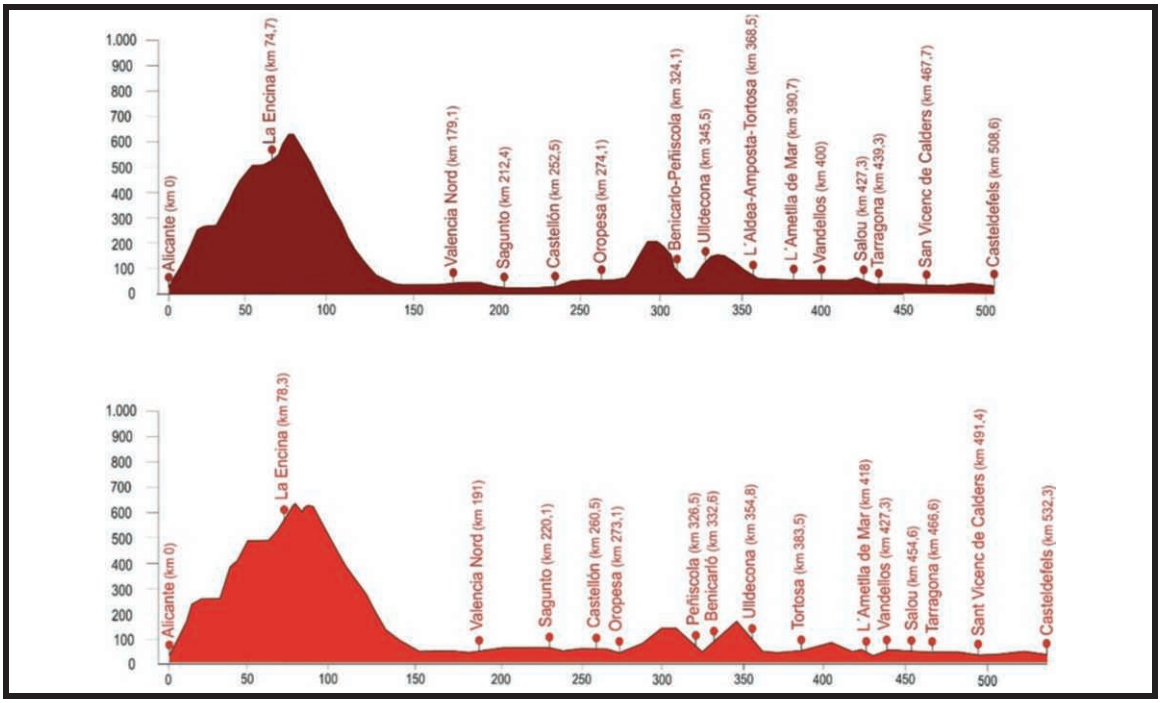
Línea convencional mejorada de Alicante a Castelldefels

En la sección de Alicante a Castelldefels se pueden distinguir dos tramos bien diferenciados. En primer lugar, el tramo Alicante-La Encina, el cual asciende rápida y regularmente siguiendo el curso primero del río Vinalopó y después el río Molino

atravesando la serranía del Cid hacia el interior de la península con pendientes entorno a 12 milímetros por metro, hasta el nudo de la Encina; para a partir de este punto descender a través del piedemonte alicantino hasta el área urbana de Valencia. (Planta en figura 77 y perfiles en figura 78).

Figura 77. **Planta de la sección de Alicante a Castelledefels**

Figura 78 .- Perfil de las secciones de Alicante a Castelldefels antes y después de la adaptación a 200 kilómetros por hora



Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis Eduardo Mesa)

En segundo lugar, el tramo que une Valencia y Castelldefels se caracteriza por ser una línea costera, con pendientes y desniveles suaves y altitudes máximas en el entorno de los 200 metros. La línea no se aleja en ningún momento del litoral, si bien

en algunos casos la vía pasa por detrás de las sierras aisladas y elevadas que descienden directamente hacia el mar.

Resumen de características de las líneas empleadas en la comparación y de los servicios considerados

Las principales características de las líneas estudiadas y de los servicios que se han considerado en las comparaciones son que se indican en la tabla. Como referencia, se han figurado adicionalmente los datos del trazado de Alicante a Castelledefels en su configuración clásica (es decir, antes de la realización de las variantes y de las mejoras para su adaptación a 200 kilómetros por hora).

Tabla 91. **Características de las líneas empleadas en la comparación y de los servicios considerados**

	Madrid Lleida (AV)	Madrid Lleida (convenc.)	Alicante-Castelldefels (mejorada)	Alicante Castelldefels (conven. clásica)
Características físicas de la línea				
Longitud (km)	442,2	530,1	508,6	532,3
Coeficiente de trayectoria	1,140	1,367	1,312	1,373
Altitud máxima (m)	1.217	1.090	640	624
Suma de desniveles (m)	1.048	943	631	615
Total recorrido en ascenso (m)	299,9	160,4	222,3	205,6
Total recorrido en descenso (m)	307,7	225,7	242,3	264,5
Exceso espec. pendiente (mm/m)	1.201	912	1.041	1.003
Longitud de túneles (km)	30,1	5,88	10,1	3,1
Coeficiente de curvas (daN/t)	0,081	0,582	0,168	0,295
Tensión de alimentación	25 kV AC	3 kV DC	3 kV DC	3 kV DC
Características del servicio considerado				
Veloc. media sin paradas (km/h)	168,7	107,8	133,10	112,5
Paradas comerciales	0	0	0	
Paradas técnicas	0,1	0,1	0,1	
Paradas equiv.reduc.veloc.	0,1	3,54	2,16	3,01
Tiempo de rotación (min)	40	40	40	

Fuente: Elaboración propia

➢ Tramos de líneas singulares

Tramo La Robla-Pola de Lena (Puerto de Pajares)

La línea convencional de León a Gijón en su paso por el Puerto de Pajares, está considerada como una de las más accidentadas de la red ferroviaria española.

El trayecto ferroviario comienza de forma ascendente desde el origen de la línea en León, pero es a partir de la estación de La Robla, en donde comienza una ascensión más pronunciada, con rampas medias de 20 milímetros por metro combinadas con

curvas de 300 metros de radio. A escasos metros de su punto culminante (km 55,1, altitud 1.279 m), entra en el túnel de "La Perruca" (km 55,3 al km 58,4 con altitud de 1.270 m) de una longitud de 3.071 metros, perforado bajo el Puerto de Pajares situado, 1.364 metros de la línea divisoria de cumbres. La línea desciende hasta Puente de los Fierros (km 95,92, altitud 502 metros) por la conocida "rampa de Pajares", la cual cuenta con 60 túneles en sus 40 kilómetros de longitud (tramo B-C del perfil). La fuerte rampa de descenso a través de un zigzagueo permite que desde Puente de los Fierros se pueda apreciar la línea sobre un mismo punto en tres niveles altitudinales diferentes.

Por otra parte, en la línea de alta velocidad de León a Gijón, el tramo llamado de los túneles de Pajares permite salvar el recorrido entre La Robla y Pola de Lena en 46,7 kilómetros, reduciendo la distancia respecto a la línea convencional en 36,4 kilómetros (-43,8%). Esta reducción en la distancia es posible gracias a los avances en la ingeniería civil con el desarrollo de grandes túneles ferroviarios. La línea de alta velocidad sube desde La Robla a lo largo de 4,4 kilómetros hasta llegar a la cota más alta, a la entrada a los túneles de Pajares, a 1.028 metros, esto es, 242 metros más baja que la entrada del túnel de "La Perruca" (cota máxima de la línea convencional). Desde allí baja en un largo túnel de 24 kilómetros con un trazado rectilíneo y con pendiente de 20 milésimas y después por un trazado a cielo abierto interrumpido por varios túneles cortos hasta llegar a Pola de Lena.

En la planta de ambas líneas en la figura 79 puede apreciarse la enorme diferencia de longitudes entre La Robla y Pola de Lena; mientras que en los perfiles de la figura 80 se aprecia cómo la linea de alta velocidad apenas gana cota desde La Robla e incia rápidamente su prologado descenso.

Figura 79 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional en Pajares

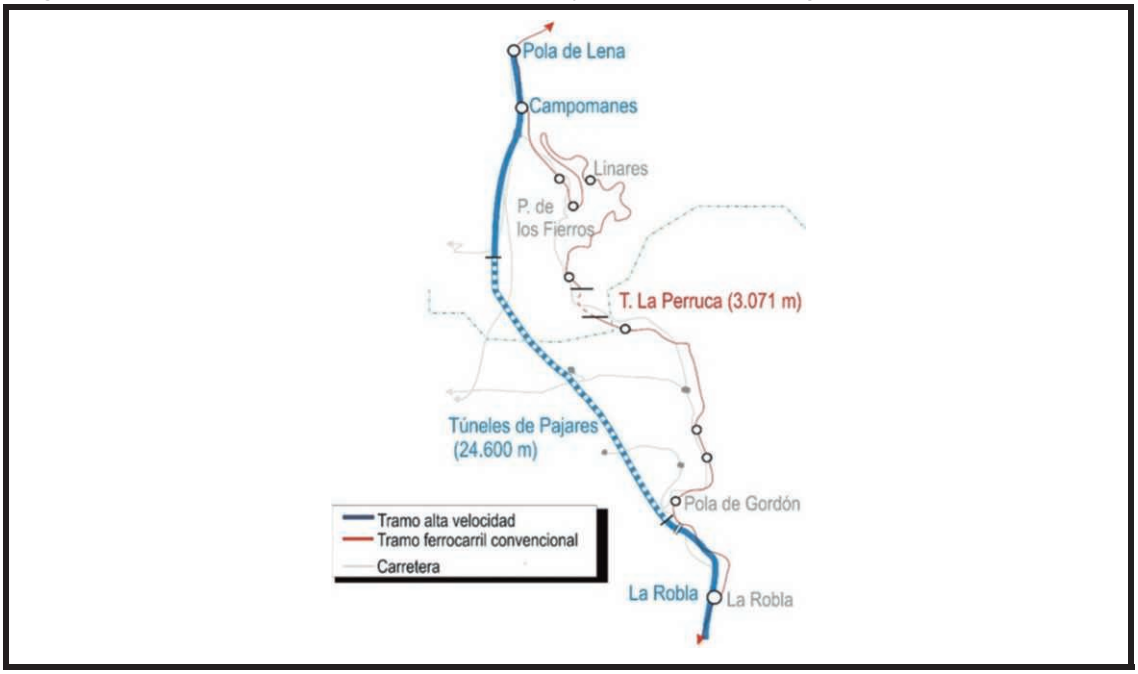
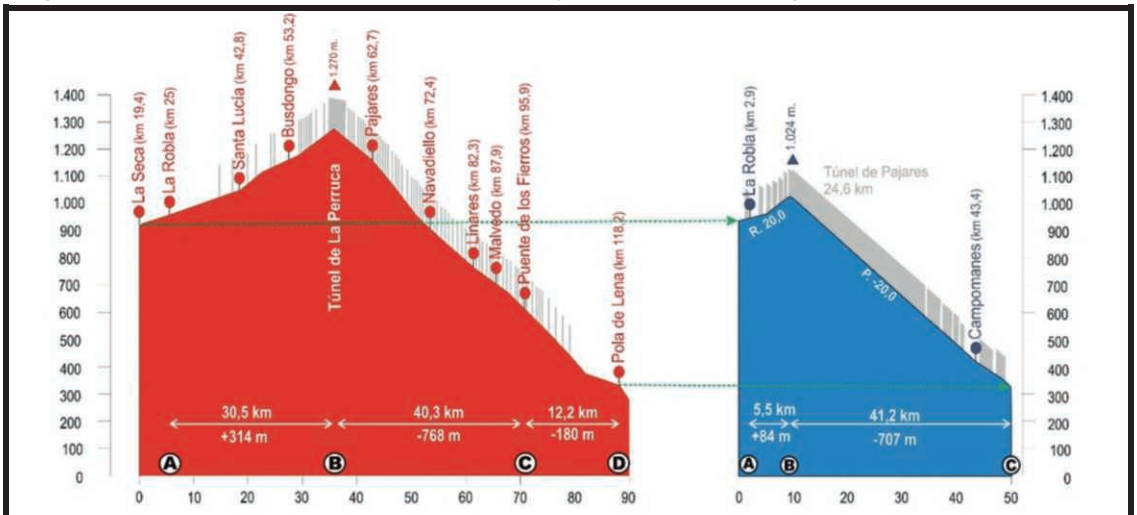


Figura 80 .- Perfil de las líneas de alta velocidad y convencional en Pajares



Rampa de Pajares

Tramo La Robla-Pola de Lena (km 25,03-118,2) línea León-Gijón

Concepto	A		B		C		D
Distancia en línea recta (km)		21,7		10,07		10,9	
Distancia real (km)		30,3		40,6		12,2	
Coeficiente (d.recta/d.real)		0,72		0,25		0,89	
Altitud (m)	956		1.270		502		322
Desnivel (m)		614		-768		-180	
Pendiente media (mm/m)		9,7		-17,04		-14,3	
Radio de curva mínimo/medio (m)		287 / 620		300 / 331		300 / 343	
Número de túneles por kilómetro		0,30		1,5		0,66	
Porcentaje de longitud en túnel		3,2		62,2		7,8	

Perfil LAV León-Asturias

Tramo La Robla-túneles de Pajares-Pola de Lena (km 2,9-49,7)

Concepto	A		B		C
Distancia en línea recta (km)		4,4		39,2	
Distancia real (km)		5,5		41,2	
Coeficiente (d.recta/d.real)		1,25	1,00	1,05	
Altitud (m)	944		1.028		321
Desnivel (m)		84		-707	
Pendiente media (mm/m)		17,2		11,8	
Radio de curva mínimo/medio (m)		2.710 / 2.986		2.200 / 4.048	
Número de túneles por kilómetro		0,7		0,2	
Porcentaje de longitud en túnel		50,5		89,7	

Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis Eduardo Mesa)

Tramo de Orense a Santiago de Compostela

La línea convencional de Ourense Santiago, discurre en dirección sureste-noroeste en un espacio geográfico dominado por pequeñas colinas escarpadas que no superan los 1.000 metros de altitud.

Al salir de Orense, la línea transcurre durante los primeros kilómetros junto a la margen derecha del río Miño, para a continuación cambiar de dirección hacia el Norte con tendencia ascendente, atravesando 27 túneles (longitud total de 9.440 metros de longitud) hasta su punto culminante en el kilómetro 301,8, con una cota aproximada de 632 metros de altitud. La rampa media de estos primeros 52 kilómetros es de 13,6 milímetros por metro y el radio de curva medio es de 440 metros. A continuación la línea desciende de forma sinuosa con radios de curvas de entorno a 400 metros, hasta la confluencia del río Ulla (km 349,6) con pendientes de entorno a -15 milímetros por metro, superando un desnivel de 527 metros de altitud. El último tramo (C-D), se caracteriza por tener rampas más suaves, aunque se mantiene un trazado sinuoso por la entrada al área urbana de Santiago de Compostela.

Por su parte el nuevo trayecto ferroviario que conecta Orense-Santiago reduce la distancia en 46,59 kilómetros empleando de un trazado más directo y rectilíneo con radios de curva en torno a los 6.000 metros, rampas máximas de 27 milésimas y aumentado considerablemente la longitud en túnel (en el tramo A-B es del 44,3 por ciento).

En la figura 82 pueden verse las plantas de los dos líneas, y en la figura 82 los perfiles longitudinales comparados.

Figura 81 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional entre Ourense y Santiago

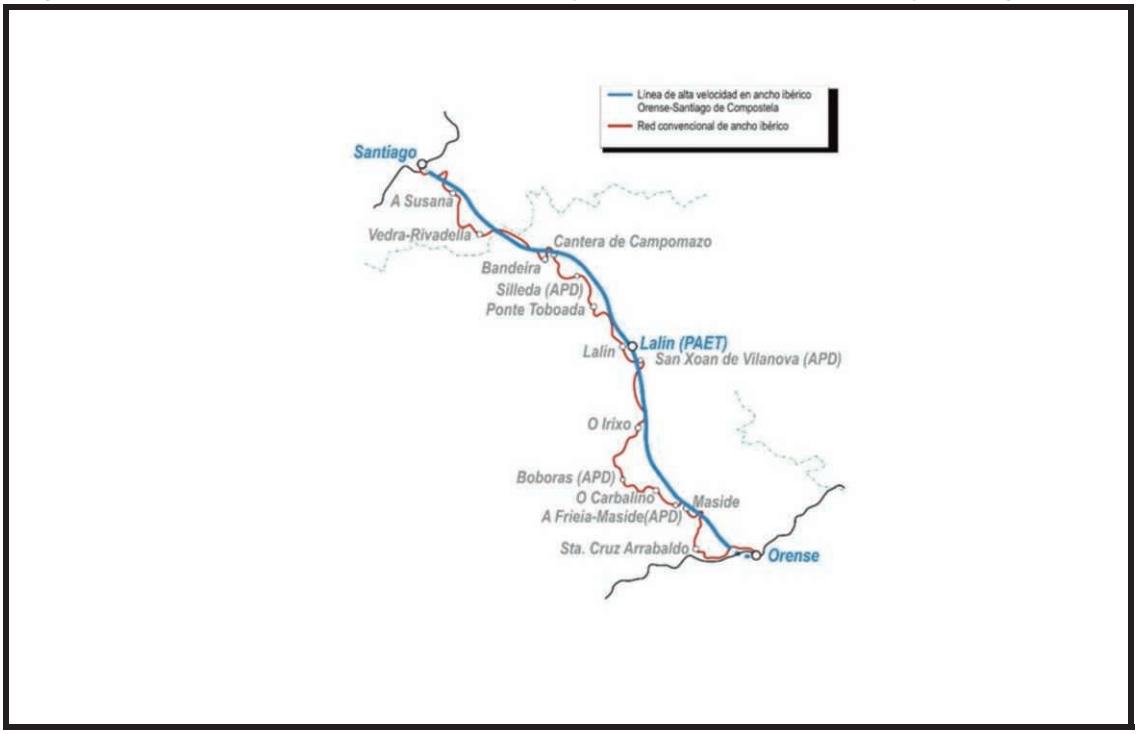
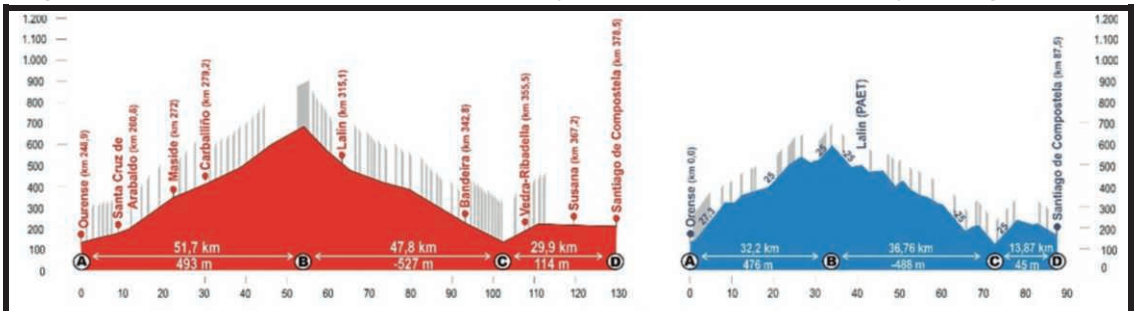


Figura 82 .- Perfil de las líneas de alta velocidad y convencional entre Ourense y Santiago



Línea convencional Zamora-Coruña
Tramo Orense-Santiago

Concepto	A	B	C	D
Distancia en línea recta (km)		29,8	34,4	15,6
Distancia real (km)		51,7	47,8	29,9
Coeficiente (d.recta/d.real)		0,58	0,72	0,52
Altitud (m)	139	632	105	219
Desnivel (m)		493	-527	114
Pendiente media (mm/m)		13,6	-12,10	1,7
Radio de curva mínimo/medio (m)		400 / 440	400 / 518	400 / 493,9
Número de túneles por kilómetro		0,52	0,59	0,30
Porcentaje de longitud en túnel		18,3	12,4	8,4

Corredor Norte-Noroeste de alta velocidad
Tramo Orense-Santiago

Concepto	A	B	C	D
Distancia en línea recta (km)		30,1	31,89	11,61
Distancia real (km)		32,18	36,76	13,87
Coeficiente (d.recta/d.real)		0,93	0,87	0,84
Altitud (m)	135	641	123	168
Desnivel (m)		506	-518	45
Pendiente media (mm/m)		14,8	-15,26	3,47
Radio de curva mínimo/medio (m)		365 / 5.100	1.420 / 6.595	1.651 / 7.267
Número de túneles por kilómetro		0,34	0,4	0,36
Porcentaje de longitud en túnel		44,3	27,3	27,4

Fuente: Elaboración propia (cartografía de Luis Eduardo Mesa)

4.1.4. Datos de los trenes empleados en los análisis

➢ Trenes de viajeros

Los trenes de viajeros empleados para el análisis de los consumos y de los costes de explotación (tabla 92) son:

- En la línea convencional, un tren remolcado por la locomotora eléctrica de la serie 252 (tipo BB de 5.600 kW y 200 km/h) y 6 coches tipo "Arco" de la serie 10.000; y una unidad eléctrica de la serie 470, así como el tren de ancho

variable de la serie 130 que atiende el servicio de Madrid a Gijón. Para los servicios con tracción diésel, en larga distancia se emplea el mismo tren de coches de la serie 10.000, pero remolcado por máquina 334 (tipo BB, 2.052 kW); y para los servicios regionales se utiliza el tren autopropulsado diésel de la serie 591 (3 coches, 140 km/h, 1.352 kW)

- En las líneas de alta velocidad se utiliza un tren AVE de la serie 112 fabricado por Talgo que corresponde a la serie más numerosa de trenes de alta velocidad existente en España. Para la comparación de los efectos del sistema con independencia de las características del tren se utiliza la rama de ancho variable se la serie 130 (250 km/h).

Tabla 92. **Características de los t**renes de viajeros empleados en los casos-ejemplo

Sistema	Alta Velocidad				Convencional mejorado		Conven-cional eléct.	Convencional diésel		
Denominación del tren	s112 (AVE-Talgo)	s130 (ancho variable)	s121 (regional ancho variable)	s104 (regional)	loc 252 + 6 coches 10000	loc 252 + 11 coches Talgo VI	Unidad 470	loc 334 + 6 coches 9000	loc 334 + 11 coches Talgo VI	Tren diésel 592
Velocidad máxima *(km/h)*	330	250	250	250	220	220	140	200	200	160
Potencia total del tren *(kW)*	8.000	4.800	4.000	4.400	5.600	5.600	1.160	2.052	2.052	1.352
Masa en vacío *(t)*	322	312	252	221,5	355,2	244	156	355,8	244	151,8
Masas rotativas equiv. *(t)*	15,90	15,41	21,20	20,87	*17,76*	*12,20*	*14,04*	*17,79*	*12,20*	13,66
Ancho de vía *(mm)*	1.435	1.435	1.435	1.668	1.668	1.668	1.668	1.668	1.668	1.668
Nº pantógrafos captación	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0
Plazas reales	365	298	280	237	408	342	234	408	342	189
Anchura exterior (media) *(m)*	2,96	2,96	2,96	2,96	2,86	2,96	2,9	2,96	2,96	2,94
Altura exterior (máxima) *(m)*	4,00	4,03	4,23	4,12	4,05	4,31	4,26	4,34	4,30	4,17
Altura exterior (media) *(m)*	3,37	3,37	4,23	4,12	4,05	3,37	3,68	4,30	3,37	4,17
Longitud (total) *(m)*	200	180	107	107	179	166	80	180	166	76
Número de ejes	21	20	16	16	28	16	12	28	16	12

Fuente: Elaboración propia.

➢ Trenes de mercancías

En lo que se refiere a trenes de mercancías se utilizan (por sus enormes diferencias) dos trenes-tipo: un tren denso (de productos siderúrgicos) y un tren ligero (de transporte de automóviles). En ambos casos, se calculan los resultados remolcados por locomotora eléctrica serie 252 (tipo BB de 5.600 kW), y por la diésel de la serie 333.300 (tipo CC de 2.052 kW) en los tramos no electrificados.

La carga es la correspondiente a la que admiten las respectivas locomotoras en cada una de las líneas de acuerdo con la rampa característica, y suponiendo que cada tren lo remolca una única máquina, es decir, que no se emplean dobles tracciones.

4.2. Casos de comparación de diferentes sistemas

Se analizan en primer lugar los tres casos que comparan diferentes sistemas: alta velocidad, convencional mejorado, y convencional (éste con tracción diesel y eléctrica). Se obtienen, de acuerdo con la metodología descrita, primero los consumos de energía y las emisiones de los trenes de viajeros; los de los trenes mercancías, y finalmente los costes de explotación de unos y de otros.

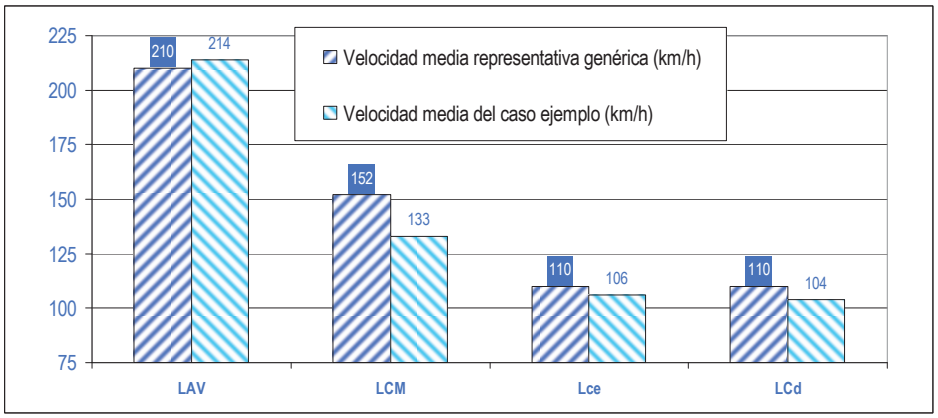
4.2.1. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros

En lo que se refiere al consumo de los trenes de viajeros puede observarse cómo se confirma la teoría de que existe una diferencia muy pequeña en el consumo por unidad de oferta entre el sistema de alta velocidad, el convencional mejorado y el convencional con tracción eléctrica.

Los cocientes del consumo en cada sistema dividido por el consumo en alta velocidad en los análisis con los valores genéricos más representativos eran, respectivamente, de 1; 1,05; y 1,19; y en los casos-ejemplo resultan ser de 1; 0,92; y 1,13.

Como puede apreciarse en la tabla 94 y en la figura 83, en los casos-ejemplo analizados el orden de los resultados es diferente del obtenido en el análisis teórico, ya que el sistema convencional mejorado produce un consumo de energía por unidad de oferta ligeramente inferior al del sistema alta velocidad. El sistema convencional eléctrico tiene aquí un consumo por unidad de oferta mayor que el del sistema convencional mejorado, aunque mucho menor que con tracción diésel. Las pequeñas divergencias con los casos teóricos parecen obedecer a las diferencias entre las velocidades medias consideradas genéricamente y las de los trenes analizados en los casos-ejemplo, que son más altas en la línea de alta velocidad y más bajas en las convencionales como se puede apreciar en la tabla 93.

Tabla 93. **Comparación de velocidades entre los valores representativos genéricos y los casos-**ejemplo



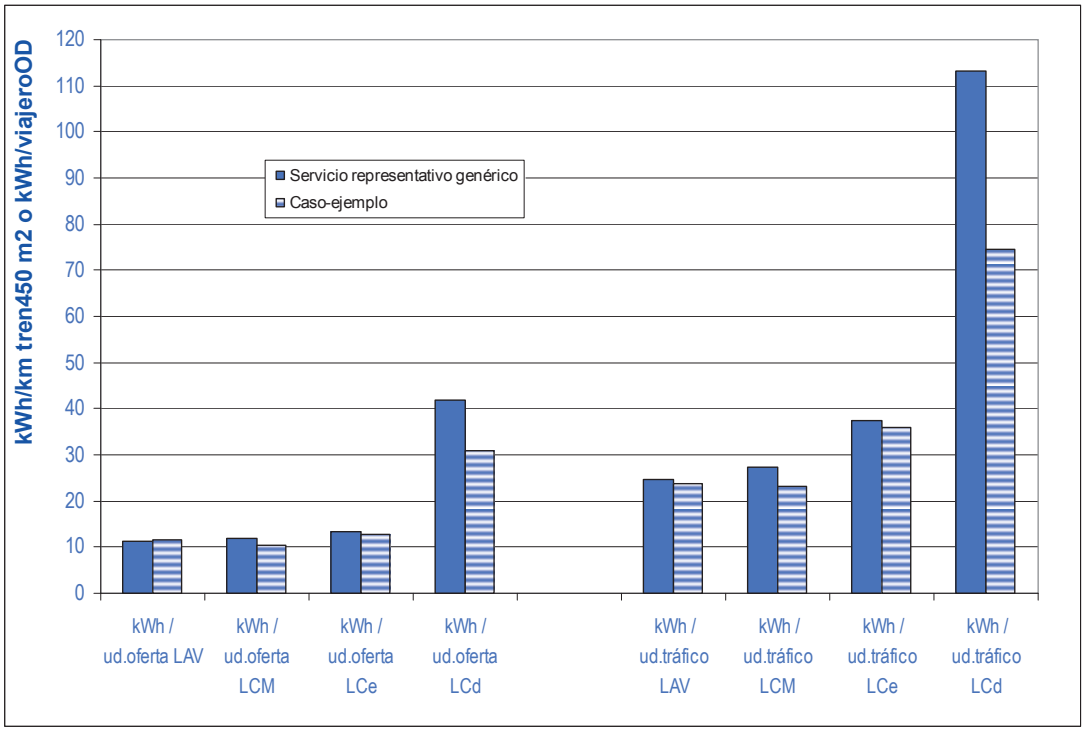
Fuente: Elaboración propia.

En lo que se refiere a los consumos y emisiones por unidad de tráfico, también se observan resultados muy similares a los previstos (1; 0,97; y 1,50 frente a 1; 1,11; y 1,53). Las emisiones son mucho menores que las resultantes del planteamiento genérico, ya que se ha empleado el valor del factor de emisiones del sistema peninsular de generación de electricidad de 2010 que es muy inferior al valor de la media ponderada del periodo 2005-2010 que se había considerado como caso más representativo.

Tabla 94. **Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en los casos analizados en comparación con los valores genéricos**

Sistema tipo	Alta velocidad (LAV)		Conven. Mejorada (LCM)		Conv. tracc. electr. (Lce)		Conv. tracc. Diésel (LCd)	
Escenario	Servicio represent. genérico	AVE 112 Madrid Lleida	Servicio represent. genérico	252+9 S10000 Alicante Castelld.	Servicio represent. genérico	252+9S9000 Madrid lleida	Servicio represent. genérico	334+9 S10000 Madrid lledia
Velocidad media (km/h)	210	214	152	133	110	106	110	104
Energía por unidad oferta (kWh/km tren 450m^2)								
Total energia importada para el movimiento	10,96	11,03	11,80	10,18	12,82	12,01	36,07	24,79
Total energía import. pantógrafo (o boca comb.)	12,28	12,57	13,47	11,85	14,99	14,19	41,95	30,97
Energía regenerada aprovechada	-0,99	-1,12	-1,65	-1,32	-1,55	-1,30	0,00	0,00
Energía neta en pantógrafo	**11,29**	**11,45**	**11,82**	**10,53**	**13,45**	**12,89**	**41,95**	**30,97**
Energía por unidad de tráfico (kWh/viajero OD)								
Plazas por tren	*387*	*365*	*400,5*	*408*	*436,5*	*408*	*391,5*	*408*
Aprovechamiento (v.km/p.km)	*0,604*	*0,604*	*0,626*	*0,626*	*0,524*	*0,524*	*0,540*	*0,540*
Coefiente de pérdidas de energía (central/pantógrafo)	*1,04*	*1,04*	*1,105*	*1,105*	*1,12*	*1,12*		
Coeficiente trayectoria (kmreales/km ortodromicos)	1,26	1,14	1,35	1,31	1,47	1,37	1,47	1,37
Total final por viajero OD	**24,54**	**23,88**	**27,27**	**23,14**	**37,54**	**35,86**	**113,12**	**74,68**
Emisiones por unid. tráfico (kg$CO_{2de2010}$/v. OD)								
Factor emisiones (kgCO2/kWh final o litro gasoleo)	0,288	0,166	0,288	0,166	0,288	0,166	0,258	0,258
Emisiones de gases de efecto invernandero	**7,07**	**3,96**	**7,85**	**3,84**	**10,81**	**5,95**	**29,20**	**19,28**
Consumo / unidad oferta AV/sistema considerado	*1,00*	*1,00*	*1,05*	*0,92*	*1,19*	*1,13*	*3,72*	*2,70*
Emisiones AV/sistema considerado	*1,00*	*1,00*	*1,11*	*0,97*	*1,53*	*1,50*	*4,13*	*4,86*

Figura 83 . **Representación gráfica del consumo de energía de los trenes de viajeros en cada uno de los casos analizados**



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías

Las líneas de alta velocidad (tal y como aquí se conciben) son diseñadas fundamentalmente para el tráfico de viajeros (con fuertes rampas) y por ello, en general, no se admiten tráficos de mercancías, aunque (como se comprobará más adelante) sí pueden encaminarse trenes de mercancías favorablemente en ciertos tramos de las líneas de alta velocidad, especialmente las que cumplen una función periférica (no trocal) en la red.

Por ello, la comparación de los consumos en energía y de las emisiones de los trenes de mercancías en el recorrido completo de las líneas de alta velocidad solamente tiene un interés teórico, ya que en la práctica no es razonable esperar que circulen este tipo de trenes por la totalidad de la línea. De la observación de los resultados de la tabla 95 puede deducirse que, a diferencia de lo que ocurre con los trenes de viajeros, en los trenes de mercancías el mayor consumo corresponde a la línea de alta velocidad; un consumo intermedio se produce en la convencional mejorada; y el menor consumo en la línea convencional (considerando que todos los trenes circulan con una única locomotora).

Se observa que existen grandes diferencias entre los consumos en tracción eléctrica y los consumos en tracción diésel (son del orden de dos a tres veces mayores en diésel), y entre los trenes densos y los trenes ligeros (en estos últimos, los consumos por tonelada neta son del orden de cuatro veces superiores a los de los trenes ligeros). Estas diferencias (entre tracción eléctrica y diésel, y entre trenes ligeros y densos) aparecen en todos los casos por igual.

Las diferencias entre sistemas (considerando que que el material rodante es el mismo en todos los sistemas, y por lo tanto no existen diferencias debidas al material rodante) se deben a la infraestructura y a la velocidad. En los sistemas de alta velocidad, la velocidad media es mayor, y ello produce un aumento del consumo aerodinámico, aunque no es muy significativo en estas velocidades. La razón más importante de las diferencias estriba en la menor carga que admiten los trenes en las líneas de alta velocidad: en ellas, las rampas son mayores, y por ello la carga remolcable es más pequeña. Debido a las apreciables *economías de tamaño*, el consumo de energía por tonelada transportada es mayor. Solamente el menor recorrido y la mayor tensión de la electrificación en alta velocidad compensan parcialmente estas diferencias; pero en general esos factores no son suficientes para igualar el consumo de la línea convencional, aunque en algunos casos las emisiones son casi idénticas, como ocurre en la tracción eléctrica (tanto en trenes densos como ligeros), que son muy similares en los casos analizados del sistema de alta velocidad y del convencional mejorado.

Los consumos de energía y las emisiones en los trenes de mercancías en cada uno de los casos posibles sobre los tramos considerados son los recogidos en la tabla 95.

Tabla 95. **Comparación de los consumos de trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas**

	Tracción eléctrica			Tracción diésel		
	LAV	LCM	LC	LAV	LCM	LC
Distancia (km)	442,3	508,6	530,1	442,3	508,6	530,1
Trenes densos (petroquímicos, siderúrgicos)						
Carga transportada(t)	393	421	668	328	393	590
Masa del tren (t)	626	582	986	570	660	930
Longitud del tren (m)	121	144	188	104	121	171
Consumo tren (kWh/km)	14,03	10,11	12,19	31,63	24,06	28,31
Cons./ ton. neta. (kWh/t)	28,28	23,25	18,02	76,91	55,94	46,11
Emis. / ton. (kgCO2 / tneta)	6,37	6,37	4,40	20,55	15,34	12,17
Trenes ligeros (automóviles, contenedores)						
Carga transportada(t)	164	176	270	141	164	258
Masa del tren (t)	552	678	993	593	672	988
Longitud del tren (m)	398	425	641	345	399	615
Consumo tren (kWh/km)	30,80	21,76	20,86	60,58	51,04	49,87
Cons./ ton. neta. (kWh/t)	120,25	117,3	73,7	311,1	285,0	184,3
Emis. / ton. (kgCO2 / tneta)	29,64	30,26	18,67	80,89	74,42	48,28

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Costes de explotación de los trenes de viajeros

Los costes de explotación de los trenes de viajeros de los casos-ejemplo correspondientes a las líneas consideradas, así como su comparación con los valores representativos genéricos están recogidos en la tabla 96 y representados en la figura 84.

Puede observarse cómo los costes de explotación aumentan al reducirse la velocidad media, y ello ocurre en todos los sistemas y en proporción similar a la prevista en el análisis realizado con los valores genéricos.

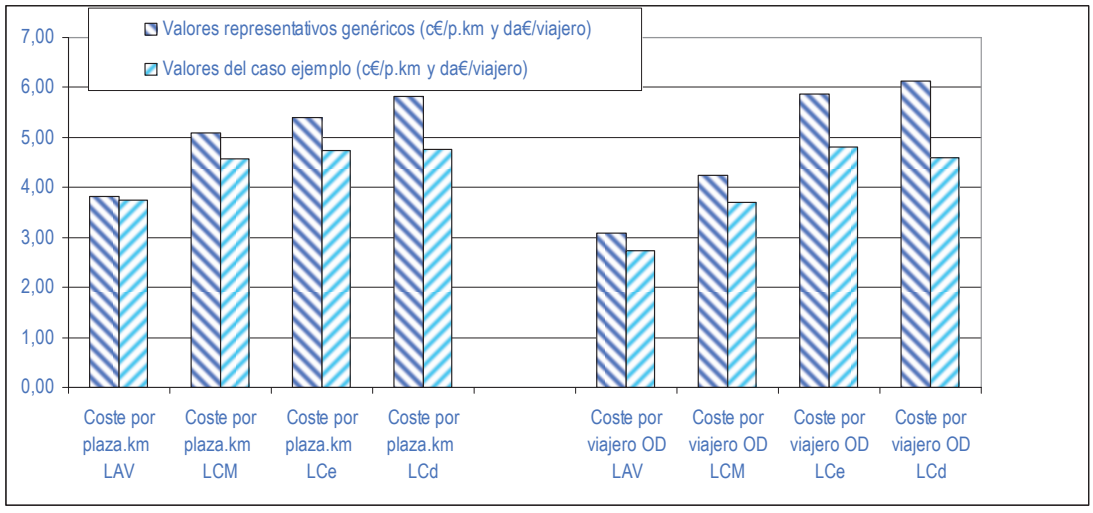
Los costes de explotación por unidas de oferta resultan ser en el sistema convencional mejorado superiores en un 22 por ciento a los observados en el sistema de alta velocidad; y en el sistema convencional eléctrico son superiores en un 27 por ciento a los del sistema de alta velocidad.

En el análisis por unidad de tráfico (es decir, por viajero entre el origen y el destino), las diferencias son mayores debido a las diferencias en el coeficiente de trayectoria, y pasan a ser el 35% en el sistema convencional y del 75 por ciento en el convencional eléctrico (en ambos casos por encima del coste en alta velocidad).

Tabla 96. **Costes de explotación de los trenes de viajeros en los casos analizados en comparación con los valores genéricos**

Sistema tipo	Alta velocidad (LAV)		Conven. Mejorada (LCM)		Conv. tracc. electr. (Lce)		Conv. tracc. Diésel (LCd)	
Escenario	Servicio represent. genérico	AVE 112 Madrid Lleida	Servicio represent. genérico	252+ 6S10000 Alicante Castell.	Servicio represent. genérico	252+ 6S10.000 Madrid Lleida	Servicio represent. genérico	334+9 S10.000 Madrid lledia
Velocidad media (km/h)	*210,00*	*214,00*	*152,00*	*133,00*	*110,00*	*106,00*	*110,00*	*104,00*
Coefiente de trayectoria	*1,26*	*1,14*	*1,35*	*1,31*	*1,47*	*1,37*	*1,47*	*1,37*
Plazas	*387,00*	*365,00*	*400,50*	*408,00*	*436,50*	*408,00*	*391,50*	*408,00*
Coste tren (M€)	*24,27*	*24,27*	*19,50*	*14,88*	*19,30*	*14,88*	*19,30*	*12,98*
Costes por plaza-kilometro (c€/plaza.km)								
Amortización	0,49	0,49	0,61	0,43	0,75	0,54	0,88	0,48
Costes financieros	0,37	0,36	0,45	0,32	0,57	0,40	0,67	0,36
Daños propios	0,04	0,04	0,30	0,21	0,37	0,27	0,44	0,24
Costes de la energía	0,40	0,36	0,40	0,32	0,41	0,37	0,65	0,46
Costes personal operativo	0,13	0,13	0,17	0,15	0,22	0,21	0,25	0,23
Coste de mantenimiento	0,85	0,84	1,33	1,46	1,26	1,29	1,39	1,44
Costes marginales infra.	1,53	1,53	1,82	1,66	1,82	1,66	1,54	1,54
Total costes de explotación	**3,81**	**3,75**	**5,09**	**4,56**	**5,41**	**4,75**	**5,81**	**4,75**
Costes explot sist.cons./av	*1,00*	*1,00*	*1,33*	*1,22*	*1,42*	*1,27*	*1,52*	*1,27*
Costes por viajero OD (€/viajero)								
Amortización	3,98	3,56	5,10	3,48	8,16	5,46	9,29	4,71
Costes financieros	2,99	2,67	3,76	2,61	6,20	4,09	7,07	3,53
Daños propios	0,32	0,27	2,51	1,74	4,02	2,73	4,64	2,36
Costes de la energía	3,24	2,63	3,38	2,60	4,49	3,75	6,86	4,52
Costes personal operativo	1,02	0,94	1,45	1,23	2,39	2,15	2,59	2,28
Coste de mantenimiento	6,91	6,18	11,11	11,89	13,73	13,12	14,65	14,21
Costes marginales infra.	12,37	11,20	15,22	13,47	19,79	16,83	16,25	15,15
Total costes de explotación	**30,84**	**27,45**	**42,52**	**37,01**	**58,79**	**48,13**	**61,36**	**46,76**
Costes explot av/sist.cons.	*1,00*	*1,00*	*1,38*	*1,35*	*1,91*	*1,75*	*1,99*	*1,70*

Figura 84 . **Representación gráfica del coste de explotación de los trenes de viajeros**



Fuente: Elaboración propia. Obsérvese que para favorecer la homogeneidad de la escala, los costes por viajero se han expresado en da€).

4.2.4. Costes de explotación de los trenes de mercancías

La estimación de los costes de explotación de los trenes de mercancías en cada uno de los tres sistemas se realiza considerando el perímetro de tales costes definido anteriormente, pero incluyendo la totalidad de los costes por el uso de la infraestructura vigentes en España, así como los servicios ACA cargados por el uso de las terminales. Los datos de costes unitarios están tomados de (Rallo 2007) y la metodología de cálculo ha sido mediante simulación con la herramienta PlanCargoRail descrita en (Martín Cañizares, M. del P., 2011). Los resultados son los que se muestran en la tabla 97.

Como puede observarse en ella, en lo referido a los costes de explotación no hay grandes diferencias en el coste por tonelada kilómetro entre los diferentes sistemas, si bien al considerar las diferencias de recorrido entre los mismo puntos en cada uno de los sistemas sí se aprecia una ligera diferencia en favor de los sistemas de alta velocidad, especialmente significativa en los trenes ligeros y remolcados con tracción eléctrica, siendo la diferencia de sentido contrario en los trenes densos con tracción diésel. Las razones de estas diferencias escriban, como ya se comprobó en el análisis anterior, en que el tiempo de recorrido tiene una incidencia especial en los costes, ya que el uso de muchos recursos (locomotoras, vagones, maquinistas) se produce por tiempo, y la mayor velocidad de los sistemas de alta velocidad reduce estos costes, y llega a compensar el ligero incremento de los costes energéticos.

Tabla 97. **Comparación de los costes de explotación de los trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas**

	Tracción eléctrica			Tracción diésel		
	LAV	LCM	LC	LAV	LCM	LC
Distancia (km)	442,3	508,6	530,1	442,3	508,6	530,1
Trenes densos (petroquímicos, siderúrgicos)						
Coste por km tren(€/km)	5,84	5,83	8,23	6,76	7,14	9,49
Coste por ton.km (c€/tkm)	2,67	2,67	2,26	3,71	3,27	2,89
Coste por tren OD (€)	2.581	2.965	4.363	2.989	3.631	5.030
Coste / tonelada OD (€)	11,80	13,57	11,98	16,40	17,33	15,32
Trenes ligeros (automóviles, contenedores)						
Coste por km tren(€/km)	7,77	7,30	10,56	8,85	8,56	12,19
Coste por ton.km (c€/tkm)	6,93	7,46	7,04	9,02	9,37	8,49
Coste por tren OD (€)	3.435	3.712	5.597	3.913	4.354	6.462
Coste / tonelada OD (c€)	30,63	37,94	37,32	39,88	47,66	45,01

Fuente: Elaboración propia

4.3. Casos de comparación de diferentes trazados

El análisis de los casos de la línea convencional y la de alta velocidad de la rampa de Pajares y entre Ourense y Santiago tiene como propósito concretar el efecto de la diferencia del trazado de alta velocidad en comparación con el convencional en estos entornos especialmente singulares y extremos.

En estos casos se comparan los consumos, emisiones y costes de explotación de trenes de viajeros de larga distancia y regionales en el sistema de alta velocidad y en el convencional eléctrico (en Pajares) o en el convencional diésel (en Ourense-Santiago). En estos casos no hay comparación posible con el sistema convencional mejorado, ya que la opción ha sido pasar de la línea convencional directamente a una nueva línea de alta velocidad.

En mercancías se analizan (en ambas líneas) el transporte de mercancías densas y de mercancías ligeras por cada uno de los trazados alternativos (también con tracción diésel en Ourense Santiago convencional y con eléctrica en Pajares convencional).

4.3.1. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en los trazados comparados

Los tramos de Pajares y de Ourense a Santiago muestran unas ciertas diferencias entre si y con las líneas completas estudiadas en lo que se refiere al consumo de energía y las emisiones de los trenes.

Debe observarse que en el caso de Pajares los consumos de trenes se han calculado sin parada en ninguno de los dos extremos del recorrido, mientras que el tramo de Ourense a Santiago se supone que tienen parada en ambos extremos. El efecto de esta parada repartida entre un centenar de kilómetros produce un significativo aumento del consumo debido a esta causa. Debe notarse también que en el caso de Pajares casi todo el trazado está en una inclinación de 20 milésimas.

Las diferencias de consumos y emisiones entre las líneas (mostrados en la tabla 98 y representados en la figura 85) pueden analizarse desde diferentes puntos de vista:

La energía para el movimiento del tren de larga distancia es algo mayor en Ourense a Santiago que en Pajares (+3,2 por ciento), ya que la menor velocidad (-11,5 por ciento) se ve más que compensada por el efecto de la repercusión de la parada final (cuyo peso es del 8,2 por ciento del total en Ourense-Santiago).

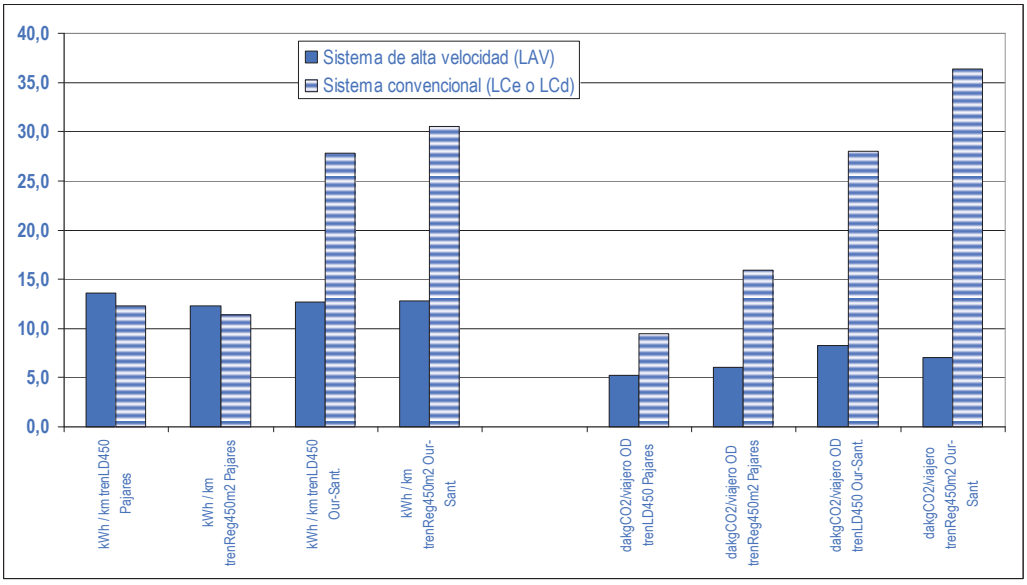
- Las diferencias se invierten al considerar la energía neta (-6,3 por ciento), debido a que parte importante de la energía importada se recupera al disponer estos trenes (en corriente alterna) de la posibilidad de devolución casi íntegra de la energía a la red. Siendo mayor la energía disipada en el freno en Ourense a Santiago (debido a la parada adicional), es mayor la cantidad de energía devuelta.
- Las diferencias entre energía para el movimiento y energía final aumentan, y más aún en el caso del Ourense Santiago debido la menor eficiencia de la tracción diésel frente a la eléctrica.
- En el caso de la diferencias por unidad de oferta, son mayores que las que se registran por kilómetro.tren debido al menor coeficiente de trayectoria de las

líneas de alta velocidad. La diferencia de coeficientes de trayectoria es menor en el Ourense-Santiago que en Pajares.

Tabla 98. **Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en las líneas singulares**

Línea / Sistema tipo	Pajares Alta velocidad (LAV)		Pajares Convencional eléctrico		Ourense-Santiago AV		Ourense Santiago convencional diésel	
Escenario	Larga distancia AVE 112	Regional AV s130	Larga distancia 252+6.10000	Regional 470	Larga distancia AVE 112	Regional AV s121	Larga distancia 334+ 6.10000	Regional 592
Velocidad media (km/h)	*201*	*185*	*83*	*83*	*178*	*165*	*82*	*82*
Energía por unidad oferta (kWh/km tren)								
Total energia importada para el movimiento	12,27	11,44	11,74	9,83	12,67	12,80	8,39	9,95
Total energía import. pantógrafo (o boca comb.)	15,39	14,11	13,14	11,40	15,68	14,81	27,84	30,50
Energía regenerada aprovechada	-1,80	-1,86	-0,88	0,00	-2,94	-2,01	0,00	0,00
Energía neta en pantógrafo	**13,59**	**12,25**	**12,26**	**11,40**	**12,74**	**12,80**	**27,84**	**30,50**
Energía por unidad de tráfico (kWh/viajero OD)								
Plazas por tren	*365*	*299*	*408*	*234*	*365*	*238*	*408*	*234*
Aprovechamiento (v.km/p.km)	*0,604*	*0,580*	*0,524*	*0,450*	*0,604*	*0,580*	*0,524*	*0,450*
Coefiente de pérdidas de energía (central/pantógrafo)	1,04	1,04	1,12	1,12	1,04	1,04		
Coeficiente trayectoria (kmreales/km ortodrómicos)	*1,07*	*1,07*	*1,91*	*1,91*	*1,03*	*1,03*	*1,62*	*1,62*
Total energía final por viajero OD (kWh/viajeroOD)	**3,19**	**3,65**	**5,70**	**9,59**	**4,97**	**4,27**	**16,89**	**14,09**
Emisiones por unid. tráfico ($kgCO_{2de2010}$/v. OD)								
Factor emisiones (kgCO2/kWh final o litro gasoleo)	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,258
Emisiones de gases de efecto invernandero	**0,53**	**0,61**	**0,95**	**1,59**	**0,83**	**0,71**	**2,80**	**3,64**
Consumo km tren LD-AV/sistema considerado	*1,00*	*0,90*	*0,90*	*0,84*	*1,00*	*1,00*	*2,19*	*2,39*
Emisiones LD-AV/sistema considerado	*1,00*	*1,15*	*1,79*	*3,01*	*1,00*	*0,86*	*3,40*	*4,41*

Figura 85 . **Representación gráfica del consumo de energía de los trenes de viajeros en las líneas singulares**



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías en los trazados singulares comparados

En lo que se refiere al consumo de energía y las emisiones de los trenes de mercancías, es preciso recordar: i) que el consumo por tonelada de los trenes ligeros es notablemente superior de los trenes ligeros (típicamente entre 3 y cuarteo veces superior); y ii) que el consumo y emisiones de los trenes diésel es entre dos y tres veces superior que el de los trenes eléctricos equivalentes.

Esta segunda observación de carácter general se hace especialmente relevante en unos de los casos singulares estudiados, y explica además diferencias de los resultados observados entre los dos casos. En efecto, la línea convencional de Ourense a Santiago no está electrificada, pero sí lo está la línea convencional en Pajares, motivo por el cual las diferencias entre la línea de alta velocidad y la convencional en Ourense a Santiago (a favor de la alta velocidad) son más acusadas que en Pajares.

En lo que se refiere a los casos concretos, los consumos de energía por kilómetro en Pajares son algo menores en la línea convencional eléctrica que en la alta velocidad (pese a que la carga del tren es mayor en la línea de alta velocidad debido a la menor rampa ficticia); pero al multiplicar por los recorridos respectivos, se invierte el sentido de la diferencia. Así, resulta que el consumo de energía y las emisiones están siempre por debajo en la línea de alta velocidad. En efecto, en Pajares las emisiones en el total del recorrido son menores en un 23,2 por ciento en los trenes densos y en un 13,5% en los trenes ligeros; mientras que en Ourense a Santiago (por la tracción diésel) las diferencias son mucho más importantes (35% menos en la línea de alta velocidad en trenes densos, y 42 por ciento menor también menor en la línea de alta velocidad en los trenes ligeros).

Tabla 99. **Comparación de los consumos de trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas**

	Pajares		Ourense-Santiago	
	LAV	LCe	LAV	LCd
Distancia (km)	*46,7*	*83,1*	*82,8*	*129,4*
Trenes densos (petroquímicos, siderúrgicos)				
Carga transportada(t)	590	524	393	590
Masa del tren (t)	896	806	626	930
Longitud del tren (m)	171	154	121	171
Consumo tren (kWh/km)	37,66	24,40	17,30	37,87
Cons./ tonelada neta. (kWh/t)	5,37	6,96	14,32	14,67
Emis. / tonelada neta (kg/tneta)	1,29	1,68	1,38	3,92
Trenes ligeros (automóviles, contenedores)				
Carga transportada(t)	235	221	176	258
Masa del tren (t)	875	796	678	988
Longitud del tren (m)	560	506	425	615
Consumo tren (kWh/km)	58,10	33,76	33,07	65,53
Cons./ tononelda neta. (kWh/t)	18,39	20,91	26,61	59,06
Emis. / tonelada neta (kg/tneta)	4,56	5,14	6,57	15,49

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Costes de explotación de los trenes de viajeros en los trazados comparados

El análisis de los costes de explotación (mostrados en la tabla 100) vuelve a señalar que el coste unitario por plaza.kilómetro en todos los casos analizados (larga distancia y regional; Pajares y Ourense-Santiago) es menor en la línea de alta velocidad que en la línea convencional.

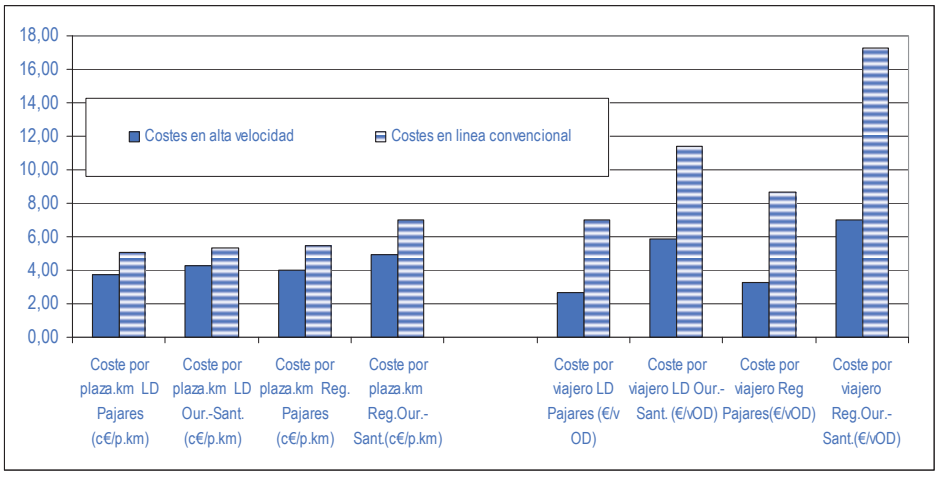
Las diferencias de costes a favor de la alta velocidad son mayores en los servicios regionales (donde son entre el 36 y el 46% superiores) que en los servicios de larga distancia (que resultan ser entre un 25 y un 37 por ciento superiores en línea convencional).

En el análisis del coste por viajero (entre el origen y el destino del tramo de línea simulado) se aprecia que las diferencias son aún mayores debido fundamentalmente al mayor *coeficiente de trayectoria* de la línea convencional. En este indicador, las diferencias están entre el 95 y el 165 por ciento en larga distancia y entre el 146 y el 169 por ciento en el servicio regional.

Tabla 100. **Costes de explotación de los trenes de viajeros en los casos analizados en trazados singulares**

Sistema tipo	LD Pajares		LD Ourense-Sant.		Regional Pajares		Regional OU Sant	
Escenario	AV. Tren 112	Conv.elecrrico 252+6 c 10000	AV. Tren 112	Conv. diesel, 334+6 c 10000	AV Tren 130	Conv.elecrico 470	AV tren 121	Conv.diésel tren 592
Velocidad media (km/h)	*225,00*	*85,00*	*152,00*	*86,00*	*202,00*	*80,00*	*140,00*	*82,00*
Coefiente de trayectoria	*1,11*	*1,98*	*1,05*	*1,63*	*1,11*	*1,98*	*1,05*	*1,63*
Plazas	*365*	*408*	*365*	*408*	*299*	*234*	*238*	*189*
Coste tren (M€)	*24,27*	*14,88*	*24,27*	*12,98*	*16,91*	*5,07*	*19,30*	*7,55*
Costes por plaza-kilometro (c€/plaza.km)								
Amortización	0,46	0,67	0,68	0,58	0,44	0,42	0,91	0,76
Costes financieros	0,35	0,50	0,51	0,43	0,33	0,32	0,68	0,57
Daños propios	0,03	0,34	0,05	0,29	0,03	0,21	0,07	0,38
Costes de la energía	0,37	0,30	0,35	0,68	0,41	0,49	0,54	1,66
Costes de personal operativo	0,14	0,05	0,09	0,05	0,13	0,05	0,09	0,05
Coste de mantenimiento	0,82	1,54	1,03	1,76	0,87	2,17	1,09	1,78
Costes marginales infra.	1,53	1,66	1,53	1,54	1,82	1,82	1,54	1,82
Total costes de explotación	**3,70**	**5,07**	**4,25**	**5,34**	**4,03**	**5,48**	**4,91**	**7,02**
Costes explot av/sist.cons.	*1,00*	*1,37*	*1,00*	*1,25*	*1,00*	*1,36*	*1,00*	*1,43*
Costes por viajero OD (€/viajero)								
Amortización	0,13	0,92	0,94	1,23	0,35	0,67	1,30	1,87
Costes financieros	0,27	0,69	0,71	0,93	0,26	0,50	0,97	1,41
Daños propios	0,03	0,46	0,07	0,62	0,03	0,34	0,10	0,94
Costes de la energía	0,29	0,41	0,48	1,45	0,33	0,78	0,77	4,08
Costes de personal operativo	0,11	0,07	0,13	0,11	0,10	0,08	0,12	0,12
Coste de mantenimiento	0,63	2,13	1,41	3,76	0,70	3,44	1,55	4,36
Costes marginales infra.	1,18	2,28	2,10	3,28	1,46	2,89	2,20	4,47
Total costes de explotación	**2,63**	**6,97**	**5,84**	**11,38**	**3,24**	**8,70**	**7,02**	**17,26**
Costes explot av/sist.cons.	*1,00*	*2,65*	*1,00*	*1,95*	*1,00*	*2,69*	*1,00*	*2,46*

Figura 86 . **Representación gráfica del coste de explotación de los trenes de viajeros en trazados singulares**



Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Costes de explotación de los trenes de mercancías en los trazados singulares comparados

En el caso de los costes de explotación nuevamente vuelven a observarse menores costes por tonelada (origen-destino) en las líneas de alta velocidad. En concreto, el Pajares, el coste es un 17 por ciento menor en trenes densos y un 49 por ciento menor en trenes ligeros; mientras que en Ourense-Santiago el coste es menor en un 40 por ciento en trenes densos y en un 42 por ciento en trenes ligeros.

Debe observarse que, a diferencia del caso de los consumos de energía y de emisiones, en el análisis de los costes la ventaja de alta velocidad no se apoya en el menor recorrido, ya que el coste por kilómetro es menor en las líneas de alta velocidad que en las convencionales y, lógicamente la diferencia aumenta al multiplicar los consumos unitarios por los recorridos respectivos que son mucho menores en alta velocidad.

Tabla 101. **Comparación de los costes de explotación de los trenes de mercancías densos y ligeros en los tramos singulares de Pajares y Ourense a Santiago**

	Pajares		Ourense a Santiago	
	LAV	LCe	LAV	LCd
Distancia (km)	*46,7*	*83,1*	*82,8*	*129,4*
Trenes densos (petroquímicos, siderúrgicos)				
Coste por km.tren(€/km)	7,47	8,08	6,28	9,77
Coste por tonelada.km (c€/tkm)	2,28	2,77	2,88	2,98
Coste por tren OD (€)	349	377	520	1.264
Costes / tonelada OD (€)	1,07	1,30	2,38	3,96
Trenes ligeros (automóviles, contenedores)				
Coste por km.tren(€/km)	9,73	10,48	7,76	12,49
Coste por tonelada.km (c€/tkm)	6,60	7,81	7,93	12,49
Coste por tren OD (€)	483,6	870,9	643	1.616
Coste / tonelada OD (c€)	3,28	6,49	6,57	11,26

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio serán agrupadas en cuatro bloques: a) Las de carácter general, incluyendo las que se concretan en recomendaciones metodológicas; b) las relativas al efecto de la velocidad en el consumo de energía y emisiones del ferrocarril; c) las referidas a la relación entre la alta velocidad y las emisiones en el conjunto de un corredor; y, finalmente, d) las relativas a la incidencia de la velocidad en los costes de explotación.

a) Conclusiones generales y metodológicas

a.1. **Variabilidad**.- El consumo de energía y las emisiones en el ferrocarril presentan una gran variabilidad (mucho mayor que en otros modos de transporte) debido a la diferencia de tamaños y arquitecturas de los trenes; de los sistemas de propulsión; de los coeficientes de trayectoria y de aprovechamiento; de factores de emisión, etc.

Como muestra de esta variabilidad puede señalarse que la relación observada entre las emisiones de gases de efecto invernadero en el caso más favorable y el caso más desfavorable de entre los verosímiles es de 1 a 45. Tan sólo en el sistema de alta velocidad, la relación entre el consumo de energía en el caso más favorable y el más desfavorable es de 1 a 7,8; y en emisiones de gases de efecto invernadero la relación es de 1 a 17,5.

Una parte de la variabilidad de los resultados se debe a las diferencias entre los vehículos (incluidos los sistemas de propulsión), las características del servicio y de la infraestructura. El consumo de energía por unidad de oferta varía de 1 a 6,4 en los casos analizados.

Otra parte de la variabilidad se debe a las diferencias en factores logísticos y externos, tales como la densidad de plazas, el aprovechamiento, el coeficiente de trayectoria, los coeficientes de pérdidas en las redes eléctricas, o el factor de emisiones. El producto de estos factores multiplicadores varía de 1 a 7,12.

En el caso de los costes de explotación, la variabilidad de los resultados es menor, aunque sigue siendo grande y es mayor que en otros modos de transporte. El coste de explotación por unidad de oferta más desfavorable (que es el del sistema convencional diésel) es 7,6 veces superior al coste en el caso más favorable (que es el sistema de alta velocidad). Si el cálculo se realiza por unidad de tráfico, la variabilidad aumenta hasta la relación de 1 a 18,1.

a.2. **El distinto efecto de la velocidad y de las características del sistema de alta velocidad.** Es necesario tener en cuenta, al analizar el efecto de la velocidad en el consumo y en los costes, que hay un efecto directo derivado de la variación de velocidad, manteniendo constantes todos los demás factores en presencia; pero la circulación a velocidades por encima de 250 km/h requiere un sistema ferroviario de características diferentes que favorecen un menor consumo de energía y menores costes de explotación. Por ello es necesario analizar separadamente los valores en cada uno de los sistemas ferroviarios caracterizados por un rango distinto de velocidades; y posteriormente analizar, en cada uno de ellos, el efecto de un cambio de velocidad a igualdad de todos los factores.

a.3. **Necesidad de emplear indicadores adecuados**. Se aprecia la necesidad de identificar indiciadores adecuados para cada uno de los propósitos. Cuando se trata de realizar comparaciones intramodales (coches con coches, o trenes con trenes) se han mostrado como más adecuados los indicadores (de energía, emisiones o costes) referidos a la unidad de oferta (por plaza.kilómetro o por metro cuadrado de superficie y kilómetro). Los indicadores por unidad de tráfico (por viajero.kilómetro ortodrómico) son más adecuados si se trata de comparaciones intermodales o incluso intramodales cuando entre los casos que se comparan hay diferencias estructurales

de aprovechamiento, de coeficiente de trayectoria o de factores de pérdidas o de emisiones.

a.4. **Obtención de indicadores útiles para la toma de decisiones**.- Los resultados finales de una comparación (aún empleando el indicador adecuado) no facilitan información útil para la toma de decisiones, porque el indicador final es el resultado del producto de otros indicadores por diversos factores. Parece preferible, cuando sea posible, desarrollar la cadena completa de indicadores y de factores para identificar dónde se producen las diferencias y cuál es su signo.

b) Conclusiones relativas a la relación entre la velocidad y el consumo de energía en el ferrocarril

b.1. **Las diferencias de consumo y de emisiones entre los trenes de tracción eléctrica no son grandes al cambiar la velocidad o al pasar del sistema convencional de alta velocidad**. Sí se observa que, como media, los consumos y emisiones resultan ser algo menores en el sistema de alta velocidad, aunque la enorme amplitud del rango de los valores posibles hace que se puedan encontrar toda clase de resultados. En tracción diésel los consumos, y sobre todo las emisiones, son muy superiores a los de tracción eléctrica a cualquier velocidad.

Tanto el consumo de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero, con los valores representativos en el sistema de alta velocidad parecen más reducidos que en el sistema convencional mejorado, y más aún que en el sistema convencional. En concreto, las emisiones en el sistema convencional mejorado (empleando en el cálculo los valores representativos) son superiores en un 11,5 por ciento a las del sistema de alta velocidad; las del sistema convencional con tracción eléctrica son superiores en un 53,3 por ciento al de alta velocidad; y las del convencional con tracción diésel son 4,2 veces superiores a las del sistema de alta velocidad.

La gran variabilidad observada entre los casos más favorables y los más desfavorables de entre los verosímiles en cada sistema hace que los rangos de variación presenten solapamientos. Por ello, es posible que puedan encontrase casos en los que las emisiones en el sistema convencional mejorado (e incluso en el sistema convencional) sean menores que en el sistema de alta velocidad. Una muestra de ello es que, frente a la citada diferencia del 11,5% entre las emisiones entre los valores más representativos del sistema de alta velocidad y del sistema convencional mejorado, el valor del caso más favorable en el sistema convencional mejorado es el 31,3 por ciento de alta velocidad, y el más desfavorable es del 323 por ciento.

Los resultados del sistema convencional con tracción diésel se muestran comparativamente muy pobres en lo que se refiere al consumo de energía, y más aún en las emisiones. Los valores de las emisiones son 4,18 veces las de alta velocidad y son 2,7 veces las del sistema convencional análogo con tracción eléctrica. La magnitud de estas diferencias hace que, pese a la amplitud del rango, resulte casi imposible encontrar casos verosímiles de trenes diésel con emisiones más reducidas que las de los trenes de alta velocidad.

b.2. **El efecto diferencial de la velocidad en cada uno de los componentes del consumo.-** El consumo de energía se explica en el modelo por agregación de diversos componentes (energía para vencer las resistencia al avance, energía disipada en el freno, consumo de auxiliares, pérdidas en el vehículo,…) En cada tipo de servicio, las diferencias de participación de cada uno de estos componentes en el consumo total son relevantes, y además tienen signos diversos (en muchas ocasiones se compensan entre sí, de forma que las diferencias entre los componentes son, en general, mayores que las diferencias en el resultado final).

Hay componentes que en el caso de mayor consumo (entre los tres sistemas eléctricos comparados) llega a ser del orden de 4 veces el consumo del caso de

menor consumo; y en todos los componentes se mantiene la diferencia por encima del doble (resistencia en curvas, 5,4 veces; energía disipada en reducción de velocidad, 3,57 veces; en resistencias mecánicas, 2,8 veces,…). En pocos componentes la diferencia es menor del doble, pero siempre está por encima del 20 por ciento; es decir, incluso el componente con menor diferencia muestra un rango que es el doble del rango del resultado final.

Lógicamente, estas grandes diferencias en los sumandos parciales se producen en cada uno de ellos a favor de cada uno de los sistemas. Así, la energía necesaria para vencer la resistencia aerodinámica tiene su mayor impacto en el consumo en el sistema de alta velocidad; pero el sistema de alta velocidad es el que tiene un menor consumo relativo en resistencias mecánicas y en curva, en servicios auxiliares y en la energía disipada por el freno (aunque esta diferencia se amortigua por regenerar menos energía).

El peso en el consumo total de cada uno de los componentes varía de un sistema a otro: mientras que en todos ellos predomina el consumo de energía para vencer la resistencia aerodinámica (entre el 26,6 y el 49,9 por ciento), la energía perdida en la reducciones de velocidad tiene mayor peso en el sistema convencional mejorado y en el convencional, pero es bajo en el de alta velocidad.

El consumo de energía final del tren diésel resulta desproporcionadamente alto porque las pérdidas más importantes se producen en el propio vehículo; mientras que en tracción eléctrica las pérdidas más importantes se producen antes de llegar la electricidad al vehículo.

b.3.- **Elasticidades y sensibilidad**.- Las elasticidades del consumo y las emisiones por unidad de oferta con respecto a las variables de las que depende son en general bajas, con la excepción de las elasticidades relativas al rendimiento de la cadena de tracción y a la velocidad media, que están en el entorno de la unidad en todos los sistemas.

Las elasticidades con respecto a una misma variable son, en general, similares para todos los tipos de servicio, con la excepción de la elasticidad a las variaciones de la masa (que es relativamente grande -0,441- en los servicios convencionales, y es reducida -0,133- en el de alta velocidad); y la sensibilidad al coeficiente aerodinámico (apreciable en alta velocidad -0,583- y sensiblemente menor -0,313- en servicios convencionales).

El freno regenerativo hace que (en los trenes que disponen de él) la elasticidad del consumo al rendimiento de la cadena de tracción sea diferente de la unidad. Ello es debido a que la energía importada se reduce en proporción al aumento del rendimiento; y a la vez la energía exportada aumenta proporcionalmente al incremento del rendimiento.

c) Conclusiones sobre la relación de la velocidad y las emisiones una la ruta o el corredor

c.1. Resulta muy relevante el efecto que tiene un incremento de velocidad del ferrocarril en el conjunto del corredor (considerando todos los modos de transporte). En efecto, el tren de alta velocidad consume menos energía y produce menos emisiones que el coche particular, que el tren diésel y que el avión; y generalmente menos que el tren convencional eléctrico y que el autobús. El tren de alta velocidad, gracias precisamente a la velocidad, es capaz de captar una parte importante de viajeros del avión y del coche. Estos trasvases de tráfico se traducen en reducciones del consumo de energía y de las emisiones en un corredor (considerando el conjunto de todos los modos de transporte).

c.2. Desde el punto de vista del tipo de sistema ferroviario, se comprueba que la construcción de una línea de alta velocidad y la consiguiente introducción de

servicios de alta velocidad en las rutas servidas por la línea, produce una redistribución de los viajeros que pasan hacia el tren de alta velocidad procedentes en buena parte del coche particular y, sobre todo, del avión; y por ello se reducen las emisiones. La experiencia muestra que este trasvase es mucho más significativo cuando se trata de una nueva línea de alta velocidad (LAV) con velocidades máximas de 300 kilómetros por hora que permite a los trenes obtener velocidades medias de más de 200 kilómetros por hora en rutas de 500 kilómetros; que cuando se implanta un sistema convencional mejorado (LCM) con velocidades medias en el entorno de los 150 kilómetros por hora. En una misma ruta, se comprueba que cuando el tren tiene velocidades medias de 150 kilómetros por hora (LCM) se reducen las emisiones del orden de 19 kilogramos de CO_2 por cada viajero que transporta, pero cuando se implanta la alta velocidad (LAV) y se pasa a 200 kilómetros por hora de media la reducción de emisiones sube hasta 33 kilogramos por viajero.

La principal ventaja energética y de emisiones de la implantación de una línea de alta velocidad no proviene, por lo tanto, de la sustitución del tren convencional: típicamente el tren de alta velocidad evita la emisión de 3 kilogramos de CO_2 por viajero respecto al tren convencional en distancias de 500 kilómetros; mientras que en el conjunto de la ruta (si hay oferta aérea) la implantación de la alta velocidad tiene un efecto multiplicador que supone que se evita la emisión de hasta 33 kilogramos de CO_2 por cada viajero transportado en alta velocidad.

c.3. Un incremento de la velocidad en el sistema de alta ferrocarril de alta velocidad manteniendo constantes todas las demás características del sistema (por ejemplo, pasando de 300 a 350 kilómetros por hora), puede incrementar el consumo de energía y las emisiones del propio tren, pero estos aumentos se verán compensados con los ahorros producidos en los viajeros captados del avión y del coche.

La captación de viajeros del avión no es proporcional a la velocidad del tren, sino que depende del tiempo de viaje que el tren sea capaz de ofrecer. Mientras el tiempo de viaje del tren está entre las dos y las tres horas, cada minuto de reducción del tiempo de viaje se traduce en una importante captación de viajeros del avión, pero cuando el tiempo de viaje está por encima de las tres horas y por debajo de las dos horas, las reducciones de tiempo de viaje no tienen un gran efecto en la captación de viajeros del avión, y por ello no tienen consecuencias tan positivas en la reducción del consumo de energía y de las emisiones.

c.4. Es posible encontrar una velocidad media óptima que minimice las emisiones en un corredor. Esta velocidad depende, lógicamente de numerosos factores, pero por ejemplo, en la ruta de Madrid a Barcelona puede estimarse en velocidades máximas entre 360 y 400 kilómetros por hora. Hasta llegar a estas velocidades, los incrementos de velocidad producen incrementos de emisiones en el propio ferrocarril pero suponen una reducción de tiempo que permite captar viajeros del avión, reduciendo las emisiones globales.

d) Conclusiones sobre la relación entre la velocidad y los costes de explotación

d.1. **Una parte significativa de los costes operativos no tiene relación con la velocidad ni con la producción**.- Hay una parte de los costes del operador que no guarda relación alguna con la velocidad ni con la circulación del tren (por ejemplo, los costes de los servicios a los clientes, los de venta de billetes, de publicidad, costes generales o el canon de uso de la infraestructura en la parte que excede el coste marginal). Los costes de explotación son la parte de los costes del operador que sí se relacionan con la producción del servicio (por ejemplo, los costes de posesión del tren, de mantenimiento, del personal operativo, o energía). El análisis de la incidencia de la velocidad y de las características del sistema de alta velocidad debe limitarse, en consecuencia, a los costes de explotación, si bien en muchas ocasiones el resto de los costes operativos son más altos en alta velocidad; pero no

porque dependan de la velocidad, sino por otros factores contingentes: por ejemplo, porque los trenes de alta velocidad tienen mayor capacidad de pago y suelen gravarse con cánones más altos; o porque los billetes suelen ser más caros y por ello aumentan los costes ligados a la venta; o porque se ofrecen más servicios a bordo. Ello hace que en ocasiones los costes operativos de la alta velocidad aparezcan como similares e incluso más altos que los de los trenes convencionales, pero como puede deducirse de lo expuesto, ello no es sino una forma de extraer el mayor valor aportado por la alta velocidad.

d.2. **Valores observados en los costes de explotación según el sistema** – En el ámbito de los costes de explotación, los menores costes se observan en el sistema de alta velocidad, tanto por unidad de oferta como por unidad de tráfico. Si se analizan los costes por unidad de oferta, son un 43 por ciento mayores en el sistema convencional mejorado; en un 58 por ciento en el convencional eléctrico y un 85 por ciento mayores en el convencional diésel. Si el análisis se realiza por unidad de transporte, los costes de explotación del sistema convencional mejorado son superiores en un 48 por ciento a los de alta velocidad; los del convencional eléctrico son superiores en un 112 por ciento; y los del convencional diésel en un 141 por ciento.

Ello se debe a que algunos costes se reducen casi proporcionalmente con el aumento de la velocidad. Entre estos costes (que son los que se inducen por tiempo) se pueden contar los siguientes:

- Costes de disponibilidad de los vehículos, incluyendo su amortización y los costes financieros asociados. Esta partida de costes es la más importante de entre los costes de explotación.
- Costes de personal operativo que trabaja a bordo de los trenes, como el personal de conducción e intervención.
- Costes de mantenimiento de los equipos de confort (equipos de aire acondicionado y calefacción, asientos y tapicerías, aseos, cafeterías, etc.)

Otro grupo de costes es menor en alta velocidad, pero no debido directamente a ésta, sino debido a otros requerimientos del sistema de alta velocidad, fundamentalmente relacionados con los trazados (con pocas curvas y de radios amplios y pocas paradas) así como con el mantenimiento de un perfil de velocidad homogéneo y uso preferente del freno eléctrico. Estos costes son:

- Mantenimiento de ruedas, pantógrafos, ejes, zapatas y discos de freno y avituallamiento de arena.
- Seguro de los trenes

Un tercer grupo de costes operativos aumenta debido a las mayores necesidades de vigilancia y control del sistema de alta velocidad. Así ocurre con los costes de mantenimiento y amortización de los sistemas adicionales de vigilancia y protección del tren (ATP).

El cuarto grupo de costes de explotación es independiente de la velocidad de los trenes y de si operan en el entorno de alta velocidad o en un entorno convencional. En este capítulo cabe considerar, por ejemplo los costes fijos de administración y de dirección de mantenimiento y de talleres; y los costes de limpieza.

No hay costes que aumenten con la mejora del sistema; y, por el contrario, sí se detectan muchos costes que se reducen con la velocidad y otros que se reducen en un entorno de alta velocidad. Puede concluirse que, sin lugar a dudas, la alta velocidad produce en el ferrocarril una reducción de los costes de explotación.

d.3. **La estructura de los costes de explotación es muy similar en todos los sistemas y, por lo tanto, relativamente independiente de la velocidad**. Alrededor de un tercio de los costes de explotación son costes de posesión del tren, otro tercio son costes de mantenimiento, y el tercio restante se reparte entre los costes energéticos (la mitad) y los del personal embarcado y costes variables de la infraestructura.

d.3. Elasticidad de los costes con respecto a la velocidad.- La elasticidad de los costes de explotación con respecto a la velocidad es reducida, del orden -0,2 a -0,3. La menor elasticidad en los valores representativos se observa en el sistema de alta velocidad (-0,197), y la mayor en el sistema convencional (-0,357).

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo del desarrollo de la tesis han ido apareciendo algunos temas colaterales sobre los que se ha identificado poca investigación previa y que podrían constituir líneas futuras de investigación cuyos avances, sin duda, podrían ayudar a ampliar o profundizar en los resultados alcanzados en la presente tesis: o bien adentrándose en terrenos próximos pero inexplorados (como el consumo de energía en la construcción de la infraestructura o en el mantenimiento de vehículos); o bien consiguiendo mayor detalle en ciertos aspectos como pudieran ser la transferencia modal del coche al tren de alta velocidad o el análisis más preciso del coste de los daños propios o a terceros.

Los temas que, en concreto, se consideran más prometedores para enriquecer y complementar esta tesis son los siguientes:

I- Relación entre el tipo de infraestructura ferroviaria y el consumo de energía y emisiones en su fase de construcción.- Las líneas ferroviarias de alta velocidad (como las convencionales y como todas las infraestructuras de transporte) requieren grandes cantidades de energía en su fase de construcción (movimiento de tierras, fabricación del hormigón y del acero, consumo de los vehículos de obra y tuneladoras, etc.)

Este consumo de energía, y las emisiones asociadas, deberían repartirse entre las plazas.kilómero que se ofertarán sobre ella y entre los viajeros.kilómetro que se transportarán en los vehículos que utilizarán la infraestructura a lo largo de toda su vida útil. Es posible (así lo aseguran numerosos autores aunque sin aportar datos concluyentes) que en el caso del ferrocarril de alta velocidad esta cantidad de energía y las emisiones sean mayores que en las infraestructuras de transporte para el avión, para el ferrocarril convencional, o para el automóvil. En tal caso, las ventajas energéticas de la alta velocidad se verían reducidas por el impacto diferencial de la energía empleada en la fase de construcción. De cualquier forma, la gran capacidad de las infraestructuras y su previsible uso intensivo hará probablemente que el reparto del diferencial de consumo en la construcción de las infraestructuras no altere esencialmente el equilibrio medioambiental entre la alta velocidad, el avión y el coche particular.

II.- Intensidad energética del mantenimiento de los vehículos.- No se han considerado en esta tesis, en la parte dedicada al consumo de energía y emisiones, los consumos que se producen en el mantenimiento del vehículo. Probablemente su importancia relativa no sea grande en comparación con los consumos y emisiones derivados del movimiento del vehículo; y probablemente no hayan grandes diferencias de intensidad energética en el mantenimiento entre diversos modos de transporte, pero es un campo en el que una mayor profundización daría un valor añadido a los resultados.

III.- Relación entre la velocidad y la captación de tráfico del coche particular. En esta tesis se ha mostrado que una de las aportaciones más importantes del tren de alta velocidad es la captación de viajeros del avión, donde se producen muchas más emisiones que en el tren rápido. Se ha analizado también la relación entre la velocidad del tren y la cuota de mercado que consigue frente al avión, observándose que no es una relación lineal.

Sin embargo, no es evidente cuál es la relación entre la velocidad media del tren y la cuota de mercado que es capaz de captar del coche particular. Probablemente esta relación sería diferente en cada uno de los rangos de distancias en las que ambos modos compiten. Además, la cuota debe estar muy influida por la política comercial y los precios del tren. En todo caso, el conocimiento de estas relaciones debería conducir a enriquecer el análisis del efecto de la alta velocidad en un corredor, ya

que, como se indica el texto, los viajeros trasvasados del coche al tren de alta velocidad aportan más valor social que los del avión, y además son potencialmente más numerosos.

IV.- Identificación de la demanda inducida y de las variables de las que depende.- Existe poca información sobre el porcentaje de viajeros nuevos (demanda inducida) que se generan como consecuencia de la existencia de una nueva línea de alta velocidad o del incremento de la velocidad de los trenes. Sin embargo, su conocimiento tiene gran importancia para la adecuada valoración del efecto de la alta velocidad en el conjunto de un corredor, puesto que la energía que se requiere para transportar los nuevos viajeros supone un incremento neto de la demanda de energía en el corredor, que reduce parcialmente las ventajas obtenidas por la transferencia de viajeros del coche y del avión.

V.- Valoración de los costes de los daños propios y a terceros. En la operación del ferrocarril hay significativos riesgos de causar daños a terceros y de producir lucro cesante a otros operadores por interceptación de la vía como consecuencia de la avería de un tren, así como la posibilidad de sufrir daños en los vehículos propios. La cuantificación de estos riesgos no ha sido estudiada con detalle, y constituye un gran problema para la operación en empresas pequeñas entrantes, a diferencia de los grandes operadores nacionales que tradicionalmente han optado por el autoseguro. En todo caso, los costes de los daños propios o a terceros, tanto si revisten forma de prima de seguro, como de provisiones, constituyen una parte importante de los costes de explotación y por lo tanto son relevantes en el análisis. Puede intuirse que estos costes son menores en alta velocidad, dado que la siniestralidad en la alta velocidad hasta la fecha ha sido muy inferior al ferrocarril convencional, pero se carece de datos para refrendarlo.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adler, N., Pels, E., & Nash, C. (2009). High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis. [High-Speed rail and air transport competition: game engineering as tool for cost-benefit analysis/ Competitividad entre el tren de alta velocidad y el transporte aéreo: claves de ingeniería como herramientas en el análisis coste-beneficio] *Transportation Research Part B, 44*, 1-22.

Albalate, D., & Bel i Queralt, G. (2010). Cuando la economía no importa: auge y esplendor de la Alta Velocidad en España. Revista de Economía aplicada 55 (19) P171-190.

Alcol Monge, A. (2010). *Apuntes de Resistencia al avance y aerodinámica de tren*. Madrid:

Aparicio Izquierdo, J. M., & López Martínez, J. M. (2004). Evolución de las tecnologías de propulsión del vehículo. *Adecuación de las tecnologías del transporte para la defensa: Undécimas jornadas UPM-Fuerzas Armadas,* Madrid. 55-81.

Arenillas Melendo, J. (2008). *La tracción en los ferrocarriles españoles*. Madrid: Vía Libre. FFE.

Barrón de Angoiti, I. (2005). Continuous growth of the spanish high speed network. *European Railway Review,* (23 de agosto de 2005)

Bel i Queralt, G. (2011). *España, capital París* (Séptima ed.). Barcelona:

Bente, H., Kindler, T., & Wittmeier, K. (2008). *Rail infrastructure cost benchmarking: Brief LICB-gap analysis and cost driver assessment*. Hamburg, Germay: BSL Management Consultants GmbH & Co. KG.

Bustinduy, J. (2008). La velocidad y las tarifas. In *La importancia de la velocidad en el ferrocarril* (Romo, E.; Zamorano, C. ed., pp. 163-163-170) Fundación Caminos de Hierro.

Casas Esplugas, C. (2008). *Evaluación de la potencial incidencia de las compañías aéreas de bajo coste en el desarrollo de la red ferroviaria europea de alta velocidad.* (COMSA EMTE, Universitat Politècnica de Catalunya)

Cillero Hernández, A., Bouzada Outeda, P., García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. del P. (2009). *Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte* Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Cillero Hernández, A., Bouzada Outeda, P., García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2009). *Incremento de recorrido en el tranporte por longitud de caminos, operación y gestión.* Madrid: Fundacion de los Ferrocarriles Españoles.

Cillero Hernández, A., Martinelli, G., & Bouzada Outeda, P. (2009). *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar*. Madrid: FFE.

Commission Decision of 21 February 2008 Concerning a Technical Specification for Interoperability Relating to the "Rolling Stock" Sub-System of the Trans-European High-Speed Rail System, DecisionU.S.C. (2008a).

Decisión de la Comisión de 20 de diciembre de 2007 sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, DecisionesU.S.C. (2008b).

Decisión de la Comisión de 21 de febrero de 2008 sobre la especificación técncia de la interoperabilidad del subsistema de material rodante del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, DecisiónU.S.C. (2008c).

de Rus, G., Campos, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del Transporte*. Barcelona: Antoni Bosch Editor.

European Commission. (2011). *EU transport in figures: Statistical pocketbook 2011.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

FFE. (2010). *Observatorio del Ferrocarril en España. Informe 2009.* (Documentos de Explotación Ferroviaria y Estadísticas del Transporte Madrid: FFE.

FFE, & IDAE. (2011). *Metodología de Evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. Madrid: FFE.

Fröidh, O. (2008). Perspectives for a future high-speed train in the swedish domestic travel market. *Journal of Transport Geography, 16*(4).

García Álvarez, A. (2005). El tren de alta velocidad no es un depredador de energía. *DYNA, Economía e Industria,* (Junio 2005), 33-38.

García Álvarez, A. (2006). *Explotación económica y regulación del transporte de viajeros por ferrocarril*. Madrid: FFE.

García Álvarez, A. (2007). Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos de transporte. *Anales de Mecánica y Electricidad, LXXXIV*(Fas. V, sept.-octub. 2007), 26-34.

García Álvarez, A. (2008). Consumo de energía y emisiones en el tren de alta velocidad. In (pp. 85-131). Madrid: Fundación Caminos de Hierro.

García Álvarez, A. (2009). *La demanda en el transporte de viajeros*. Madrid:FFE

García Álvarez, A. (2010a). *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril (2º edición)* Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2010b). The energy consumption and emissions of high speed train. *Journal of the Transportation Research Board,* (2159)

García Álvarez, A. (2010C). High speed, energy consumption and emissions. *2010 Highspeed,* Beiging, China. (II) 634-645.

García Álvarez, A. (2010e). Modelo multipropósito de estimación de los consumos de energía y emisiones en el transporte. In (FFE ed., pp. 10 (1-10))

García Álvarez, A. (2010f). Relationship between rail service operating costs and speed. *2010 Highspeed,* Beiging, China. *, II* 959-973.

García Álvarez, A. (2011a). *Costes operativos de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril (Parte I)*. Madrid: FFE: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2011b). *Dinámica de los trenes en alta velocidad (8ª edición)*

García Álvarez, A. (2011c). *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril* (2ª ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2011d). *Introducción a los costes en el transporte*. Madrid: FFE: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A. (2011e). *Magnitudes, unidades y conceptos básicos el transporte de viajeros. El "load factor" en el ferrocarril* (14ª ed.). Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A., Barrón de Angoiti, I., Puente Domínguez, F., & Martín Cañizares, M. P. (2009). *Alta Velocidad en España, líneas y trenes* (Primera ed.). Madrid: FFE; Vía Libre.

García Álvarez, A., Cillero Hernández, A., Martín Cañizares, M. del P., Puente Domíguez, F., & Ramos Melero, R. (2008). *Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros*. Madrid: FFE.

García Álvarez, A., Cillero Hernández, A., & Rodríguez Jericó, M. P. (1998). *Operación de trenes de viajeros: claves para la gestión avanzada del ferrocarril*. Madrid: FFE.

García Álvarez, A., & Fernández Arévalo, F. J. (2011). El canon por el uso de la infraestructura ferroviaria. *Documentos de explotación económica del transporte, ,* 1-39.

García Álvarez, A., & Fernández González, E. (2007). *Las distancias en el transporte por ferrocarril*. Madrid: FFE.

García Álvarez, A., & Fernández González, E. (2008). *Nota Técnica Proyecto EnerTrans, 5: Estudio sobre las variables que influyen los incrementos de recorrido e incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario*. Madrid: FFE.

García Álvarez, A., & Luceño Ramos, B. (2011). Relación entre el precio básico medio delo billete de tren, la velocidad media y la distancia recorrida por el viajero. In (pp. 27-44). Madrid: FFE.

García Álvarez, A., & Lukaszewicz, P. (2010). Ventajas energéticas y en coste de los trenes de caja ancha. *Actas del Congreso Internacional de Tecnología Ferroviaria,* , 51-70.

García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. del P. (2009). *Usos de la energía en el transporte* Fundacion de los Ferrocarriles Españoles.

García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2007, Comparación del consumo de energía en línea de alta velocidad y convencional en los tramos de Lleida a Roda y de Córdoba a Antequera. *www.vialibre.org*, , 1-10.

García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2008). Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos. *Vía Libre,* (515), 20-25.

García-Lomas y Cossío, J. M. (1947). *Tratado de Explotación de Ferrocarriles. Tomo II: El Material Móvil* (1ª ed.). Madrid: EDIX.

GIF. (2002). *Propuesta de canon por utilización de infraestructura en la LAV2 Madrid-Barcelona-Francia, tramo Madrid-cambiador de Lérida:* (Documentos de Explotación Ferroviaria y Estadísticas del Transporte Madrid: GIF.

González Franco, I., & García Álvarez, A. (2011). Estimación del consumo de energía y emisiones de CO_2 en trenes de mercancías y análisis de su variabilidad. In (pp. 195-208). Madrid: FFE.

González Franco, I. (2011). ¿Pueden los trenes de alta velocidad circular más deprisa y reducir el consumo de energía? *360revista de alta velocidad. p* 33-42.

González Savignat, M. (2006). Inversiones en alta velocidad velocidad ferroviaria. *Economistas,* (nº 110; diciembre 2006)

Grupo de Estudios e Investigación de Energía y Emisiones en el Transporte (FFE), & Grupo de Estudios del IDAE. (2011). *Metodología de Evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. Madrid: FFE.

Grupo de Investigación del Proyecto Enertrans. (2010). *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*. Madrid: Edita: Grupo Gestor del Proyecto EnerTRans.

Guiheu, C. (1982). La résistance a l´avancement des rames TGV-PSE. Bilan des études et des résultats. *Revue Generale des Chemis de Fer, 0035-3183/1982/17*

Hidalgo González, I. (2005). Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: descripción y aplicación del modelo POLES. *Revista de Economía Mundial 13,* , 42 (33-75).

Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg. (2010). *EcoPassenger: Environmental methodology and data -final report-*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros Heidelberg, Germay:

Ifeu-Institut fur Energie-und Umweltforschung Heidelberg, Oko-Institut, & IVE RMCOM. (2010). *EcoTransit. methodology and data -final report-*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros Heidelberg, Germany: Commisioned by DB Scnker Germany: International Union of Railways (UIC).

Jaro Arias, L. (2011a, septiembre 2011). La aportación de valor de los viajeros captados del coche particular por el tren de alta velocidad. *360. Revista de alta velocidad, 1*

Jaro Arias, L. (2011b). *Planificación y evaluación de la rentabilidad económico-social de líneas ferroviarias*. Madrid: FFE.

Jiménez Octavio, J. R., Such Taboada, M., Carnicero López, E., & Pilo de la Fuente, E. (2010). *Raíles para una nueva generación: simulación, cálculo y optimización ferroviaria.* E). *Sí,* (1), 260. (Sí)

Jorgensen, M. W., & Sorenson, S. C. (1997). *Estimating emissions from railway traffic*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros No. Deliberable Nº 17). Lyngby, Denmark:

Technical University of Denmark. emp, R. (1993). The european high speed network. *In "Passenger Transport After 2000 AD";,* , 9 (3-11).

Kemp, R. (2004a, October/November 2004). Save the planet, take the car. thought trains were always "greener" than cars? think again. *IEE Power Engineer,* , 6 (12-17).

Kemp, R. (2004b, 10 september 2004). Transport energy consumption. *Based on an Article Written for the October 2004 Issue of Power Engineer -IEE Bimonthly Magazine-,* , 7.

Kemp, R. (2007). *Traction energy metrics*. Lancaster, GB: Lancaster University.

Kottenhoff, K. (2003). Evaluation of passenger train concepts: Practical methods for measuring traveller's preferences in relation to costs. *KTH- Journal of Royal Institute of Tecnology,* (June 2003), 1-23.

Leboeuf, M. (2010). *Promoting and implementing a high speed rail project discussion paper on strategy (some lessons learnt from experience)*. Lisbonne: FUNDEC.

López Gómez, J. L. (2006). Diseño de la cadena de tracción diesel. Madrid. 1-27.

López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J., & Fernández, A. (2009). *Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte*. Madrid: Fundacion de los Ferrocarriles Españoles.

López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J., & Mora Sotomayor, A. (2009). *Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos*. Madrid: Fundacion de los Ferrocarriles Españoles.

López Pita, A. (2008). *Explotación de líneas de ferrocarril*. Barcelona: Edicions UPC.

López Pita, A. (2010). *Alta velocidad en el ferrocarril*. Barcelona: Edicions UPC.

López Pita, A., Fonseca Teixeira, P., Sánchez Borràs, M., Fernández Belmonte, D., Criado Domènech, O., Chico Herranz, P., . . . Perrod, P. (2006). *Study on infrastructure charges of high speed services in europe*. (Documentos de Explotación Ferroviaria y Estadísticas del Transporte Paris: UIC.

Lukaszewicz, P. (2006). Running resistance of ORE trains in sweden. [Running resistance of ore trains in Sweden / Resistencia a la circulación en los trenes "ore" en Suecia] *Sí,* (1), 10.

Lukaszewicz, P., & Andersson, E. (2006). Energy consumption and related air pollution for scandinavian electric passenger trains. *Journal of the Royal Institute of Technology,* (1), 43.

Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., . . . Bak, M. (2007). Handbook on estimation of external cost in the transport sector., 1-336.

Martín Cañizares, M. del P. (2011). Herramientas de simulación para el estudio de la explotación técnica y económica ferroviaria. *Investigación FFE: Memoria de artículos, publicaciones y conferencias 2011,* , 13.

Martín Cañizares, M. P., & García Álvarez, A. (2011, enero, 2011). Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español para el consumo de energía y costes operativos. *Memoria de artículos, publicaciones y conferencias 2009-2010, FFE,* , 83-100.

Martín Cañizares, M. P. (2011). Determinación de la velocidad óptima de los trenes de muy alta velocidad para minimizar las emisiones de dióxido de carbono en un corredor. *360.ave.revista de alta velocidad, 1*, 51-59.

Mayers, I., Proost, S., Vandercruyssen, D., de Nocker, L., Panis, L., Wouters, G., & de Borger, B. (2001). *The external costs of transport (INFRAS/IWWW 2000)*. (Documentos de Explotación Ferroviaria y Estadísticas del Transporte Belgium: Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs; State of Belgium, Prime Minister's Services.

Melis Maynar, M., de Matías, I., Alonso, J. M., Navarro, J. L., & Tasis, J. L. (2001). Diseño de túneles para trenes de Alta Velocidad: Fricción y ondas producidas por el tren. *Revista de Obras Públicas, 148*(3415), 27-44.

Minayo de la Cruz, F., & García Álvarez, A. (2008). Relación entre la alta velocidad ferroviaria y los costes operativos no energéticos. *La importancia de la velocidad en el ferrocarril,* , 145-163.

Ministerio de Fomento. (2008). *Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril*. Madrid: ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente de España). (2007). *Invnetario de gases de efecto invernadero en España: Edición 2007 (serie 1990-2005)*. Madrid:

Mourabit Fossas, O. (2003). *La velocidad óptima del sistema rueda-carril*. Universitat Politècnica de Catalunya). , 101.

Ortúzar, J. d. D., & Willumsen, L. G. (2008). *Modelos de transporte* Edit: Publican; Universidad de Cantabria.

Pérez Arriaga, J. I., Lumbreras Martín, J., & Equipo del Ayuntamiento de Madrid. (2009). Capítulo 2: El sector del transporte y la sostenibilidad. In *La contribución de las TIC a la sostenibilidad del transporte en España* [Capítulo 2: El sector del transporte y la sostenibilidad] (Primera ed., pp. 39 hasta 58). Madrid: Edita: Real Academia de Ingeniería.

Pérez Arriaga, J. I., Pilo de la Fuente, E., & López del Hierro Ausín, I. de L. (2009). *El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Pilo de La Fuente, E. (2003). *Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad*. Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Departamento de Electrotecnia y Sistemas). *Sí,* (1), 308. (Sí)

Pilo de la Fuente, E., Pérez Arriaga, J. I., Hierro Ausín, I. de L., & Jiménez Octavio, J. (2009). *Flujos de la energía de la electricidad en el transporte*. Madrid: Edita: Fundacion de los Ferrocarriles Españoles.

Riol, R. (2011, Revisión crítica de datos sobre consumo de energia y emisiones de los modos públicos de transporte. *Vías Libre Tecncia Investigación,*

Rochard, B. P., & Schmid, F. (2000). A review of methods to measure and calculate train resistances. *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F.,* (214 (4)), 185-199.

Schreyer, C., Schneider, C., Maibach, M., Rothengatter, W., Doll, C., & Schmedding, D. (2004). Costes Externos del Transporte: Estudio de actualización., 19 (1-19).

Seristö, H., & Vepsäläinen, A. P. J. (1997). Airline cost drivers: Cost implications of fleet, routes, and personnel policies. *Journal of Air Tranport Management, 3*(1), 11-22.

Steering Committee for the Transport Infrastructure Needs Assessment. (2004). *RAILPAG: Railway project appraisal guidelines*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros Luxembourg: European Investment Bank.

Ficha UIC 714 R. Clasificación de las vías de las líneas desde el punto de vista de la conservación de la vía: Instalaciones fijas, (1989).

CODE UIC 451-1 R: Marges de régularité à prévoir dans les horaires, dans le but de garantir la ponctualité du service - Marges de régularité, UIC CODEU.S.C. 1 (2000).

UIC. (2009). *Maintenance of high speed lines*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros France: UIC.

Van den Brink, R. M. M., & Gijsen, A. (2002). Energy use by and emissions from electric passenger trains: Description and results of a well-to-wheel model. *Proceedings of 11TH International Symposium, Transport and Air Pollution, I*, 203-210.

van Essen, H., Bello, O., Dings, J., & van den Brink, R. (2003). *To shift or not to shift, that's the question: The environmental performance of the principal modes of freight and passenger transport in the policy-making context*. (Artículos, Ponencias y Capítulos de Libros No. 03.4360.09). The Netherlands: Delft.

Van Wee, B., Van den Brink, R., & Nijland, H. (2003). Environmental impacts of high-speed rail links in cost–benefit analyses: A case study of the dutch zuider zee line. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 8*(4), 299-314. doi:DOI: 10.1016/S1361-9209(03)00017-8

Vignes, P., & Debosque, L. (1989). La maintenance du TGV SE. Espérience de huitannéss d'exploitation. *RGCF (Revue Générale des Chemins de Fer),* (Juillet - Août 1989), 33-50.

8. ANEJOS

Anejo 1. Índices de tablas y de figuras

Índice de tablas

Tabla 1. Variabilidad del consumo de energía del ferrocarril de mercancías 13

Tabla 2. Variabilidad de la características del ferrocarril en comparación con otros modos de transporte interurbano.....14

Tabla 3 . Valores del *Coeficiente de trayectoria* en el sistema español de transporte de viajeros 27

Tabla 4. Velocidades en diversos servicios españoles de alta velocidad.....35

Tabla 5. Efectos económico-sociales de la transferencia de viajeros de diversos modos de transporte al tren de alta velocidad.....48

Tabla 6. Ahorros por viajero de la alta velocidad frente resto de modos 49

Tabla 7. Distancias entre Madrid y otras ciudades por diferentes modos de transporte: ferrocarril alta velocidad, ferrocarril convencional y carretera 59

Tabla 8. Valor medio de los costes externos aplicados en España en los análisis costes beneficio 62

Tabla 9. Dependencia de las importaciones energéticas en 2007 en algunos países europeos 68

Tabla 10. Consumo de energía final por sectores y subsectores en 2007 en algunos países europeos 69

Tabla 11. Factores de emisión de los derivados de petróleo (en masa por kilogramo y masa por litro) 81

Tabla 12. Pérdidas de energía y emisiones en los procesos de transformación y transporte de los combustibles fósiles desde el yacimiento hasta el vehículo 81

Tabla 13. Coeficientes de pérdidas entre la central generadora de electricidad y el pantógrafo el tren según tensión.....83

Tabla 14. Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la generación de electricidad por países 84

Tabla 15. Evolución del factor de emisiones de dióxido de carbono en la generación de electricidad en España en el periodo 2005-2010.....85

Tabla 16. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua 86

Tabla 17. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente alterna 87

Tabla 18. Rendimientos en el vehículo de tracción diésel.....87

Tabla 19. Evolución de la potencia de las máquinas eléctricas de Renfe y su relación con la velocidad máxima. 95

Tabla 20. Comparación de los costes energéticos con los ingresos y los costes totales de las Unidades de Negocio de Renfe en 2005 97

Tabla 21. Comparación entre los tiempos de viaje y el consumo de energía a diferentes velocidades para un viaje de Londres a Edimburgo y otro de Madrid a Barcelona 103

Tabla 22. Resumen de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren 117

Tabla 23. Ejemplo de rampas críticas y pendientes de equilibrio de diversos trenes 121

Tabla 24. Prestaciones mínimas de los frenos en la ETI de Alta Velocidad..... 123

Tabla 25. Comparación de los procedimientos de cálculo de la energía consumida por un tren en su recorrido 128

Tabla 26. Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia mecánica al avance en función de la velocidad 142

Tabla 27. Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia adicional de las curvas 144

Tabla 28. Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia a la entrada de aire 146

Tabla 29. Variación de de la energía empleada para vencer la resistencia aerodinámica148

Tabla 30. Distancia entre paradas equivalentes por reducción de velocidad en diversos tipos de línea150

Tabla 31. Distancia entre paradas comerciales de los servicios que se prestan en cada línea. 151

Tabla 32. Variación de la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad 151

Tabla 33. Variación de de la energía potencial disipada en la bajada de pendientes..... 153

Tabla 34. Rendimientos representativos de los sistemas analizados 154

Tabla 35. Consumos representativos de los servicios auxiliares 156

Tabla 36. Valores representativos de la energía regenerada 158

Tabla 37. Relación con la velocidad de cada uno de los términos de la función de consumo 159

Tabla 38. Resultados de la comparación del consumo de energía final por kilómetro tren empleando los valores representativos 162

Tabla 39. Rango de las principales variables que intervienen en el modelo..... 164

Tabla 40. Valores extremos que puede alcanzar el consumo de energía final importada y neta por kilómetro.tren 165

Tabla 41. Elasticidad del consumo de energía respecto a diversas variables..... 167

Tabla 42. Rango de valores de la densidad de plazas 170

Tabla 43. Rango de valores del aprovechamiento de trenes de larga distancia..... 171

Tabla 44. Rango de valores del coeficiente de trayectoria..... 172

Tabla 45. Rango de valores del coeficiente de pérdidas de las redes eléctricas..... 174

Tabla 46. Rango de valores de los factores de emisión de gases de efecto invernadero. 175

Tabla 47. Rango de valores extremos y valores más representativos del conjunto de los factores logísticos y externos..... 176

Tabla 48. Valores más representativos de las emisiones por unida de tráfico según tipo de sistema 177

Tabla 49. Valores extremos que pueden alcanzar las emisiones por viajero kilómetro ortodrómico178

Tabla 50. Valores más representativos y extremos de los diversos indicadores del consumo de energía y de las emisiones en el ferrocarril de alta velocidad..... 180

Tabla 51. Emisiones de gases de efecto invernadero en las principales rutas españolas 183

Tabla 52. Ejemplo de comparación de tráfico y reparto modal con LAV 188

Tabla 53. Valores más representativos y extremos de las variables que intervienen en la función de emisiones de cada modo de transporte 193

Tabla 54. Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero del tren de alta velocidad en comparación con otros modos en España. 195

Tabla 55. Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero del tren de alta velocidad en comparación con otros modos en España. 198

Tabla 56. Diferencia de emisiones de dióxido de carbono en la ruta de Madrid a Sevilla con y sin alta velocidad 200

Tabla 57. Evolución de la demanda Málaga-Madrid y Barcelona-Madrid al cambiar el tiempo de viaje 202

Tabla 58. Comparación de emisiones evitadas en diversas rutas en función de la distancia y velocidad media del AVE..... 204

Tabla 59. Velocidad óptimas de circulación en la línea Madrid-Barcelona para diferentes factores de emisiones en la generación de electricidad 209

Tabla 60. Relación de componentes del coste operativo y del coste de explotación 230

Tabla 61. Comparación entre los costes de adquisición reales de diversos trenes y los estimados con el modelo..... 234

Tabla 62. Coste de adquisición de trenes de la misma capacidad en sistemas ferroviarios de alta velocidad y convencional..... 235

Tabla 63. Horas de uso diario del vehículo según el tipo de sistema ferroviario y la política de atención a las puntas de tráfico..... 237

Tabla 64. Distancia anual recorrida por diversos trenes de la misma capacidad y arquitectura239

Tabla 65. Producción anual de cada tren..... 240

Tabla 66. Coste de adquisición del tren por unidad producida en el año..... 241

Tabla 67. Coste de amortización del tren por plaza kilómetro 244

Tabla 68. Coste de capital por plaza.kilómetro 245

Tabla 69. Coste de daños propios y a terceros por plaza.kilómetro 246

Tabla 70. Costes totales de la posesión o tenencia de un tren por plaza.kilómetro 247

Tabla 71. Elasticidad de los costes de tenencia del tren con respecto a la velocidad ... 248

Tabla 72. Valores orientativos del coste de mantenimiento (incluida la gran reparación, pero no la limpieza)..... 250

Tabla 73. Valores aproximados de coste de mantenimiento de un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud..... 252

Tabla 74. Costes totales de mantenimiento y limpieza según sistemas ferroviarios 254

Tabla 75. Coste de la energía por plaza.kilómetro 259

Tabla 76. Elasticidad del coste de la energía con respecto a la velocidad 260

Tabla 77. Coste por minuto del personal operativo a bordo de los trenes 262

Tabla 78. Coste por plaza kilómetro del personal operativo a bordo de los trenes 263

Tabla 79. Variabilidad de los costes de la infraestructura la línea de alta velocidad de Madrid a Lleida..... 266

Tabla 80. Costes variables de infraestructura en el canon GIF de 2002 268

Tabla 81. Estimación de costes variables para diversos tipos de trenes 269

Tabla 82. Coste marginal del uso de la infraestructura por plaza.kilómetro 269

Tabla 83. Costes totales de explotación por unidad de oferta..... 271

Tabla 84. Elasticidad de los costes totales de explotación con respecto a la velocidad. 272

Tabla 85. Costes totales de explotación por unidad de tráfico (viajero.kilómetro ortodrómico)273

Tabla 86. Relación entre los costes comerciales y generales y los costes de explotación 278

Tabla 87. Cánones aplicados en España por circulación, reserva de la capacidad y tráfico 280

Tabla 88. Canon por el uso de la estaciones Red Adif en 2010 281

Tabla 89. Repercusión de los costes de infraestructura por encima del coste marginal 282

Tabla 90. Peso de los costes de explotación en los costes operativos totales 283

Tabla 91. Características de las líneas empleadas en la comparación y de los servicios considerados292

Tabla 92. Características de los trenes de viajeros empleados en los casos-ejemplo.... 297

Tabla 93. Comparación de velocidades entre los valores representativos genéricos y los casos-ejemplo299

Tabla 94. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en los casos analizados en comparación con los valores genéricos 300

Tabla 95. Comparación de los consumos de trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas 302

Tabla 96. Costes de explotación de los trenes de viajeros en los casos analizados en comparación con los valores genéricos 304

Tabla 97. Comparación de los costes de explotación de los trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas..... 305

Tabla 98. Consumo de energía y emisiones de los trenes de viajeros en las líneas singulares 307

Tabla 99. Comparación de los consumos de trenes de mercancías densos y ligeros en los diversos sistemas 309

Tabla 100. Costes de explotación de los trenes de viajeros en los casos analizados en trazados singulares..... 311

Tabla 101. Comparación de los costes de explotación de los trenes de mercancías densos y ligeros en los tramos singulares de Pajares y Ourense a Santiago 312

Índice de figuras

Figura 1. Indicadores de consumo con diversos divisores para diferentes propósitos. 25

Figura 2 . Desplazamiento y trayectoria entre dos puntos 26

Figura 3. Relación entre los diferentes indicadores de consumo y emisiones.....29

Figura 4. Perfil de velocidades máximas en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona por Zaragoza y Lleida (LAV 2) 32

Figura 5. Horario tren AVE Madrid-Zaragoza-Lleida-Barcelona 33

Figura 6. Ámbito de los sistemas de alta velocidad 40

Figura 7. Tiempo generalizado entre Madrid y Sevilla en diversos modos de transporte ..42

Figura 8. Diferentes forma de explotación de la alta velocidad según la combinación de trenes y líneas44

Figura 9. Costes para el Estado frente a ingresos y beneficios sociales en una línea portuguesa de alta velocidad 47

Figura 10. Sensibilidad de Valor Actual Neto (VAN) socioeconómico de una línea con respecto a la variación de diversos parámetros, entre ellos la tarifa cobrada al viajero. .48

Figura 11. Evaluación del impacto económico-social de la LAV Madrid Levante.....50

Figura 12. El atractivo de la alta velocidad interpretado en Francia.....51

Figura 13. Evolución del número de viajeros y del tiempo de viaje desde Madrid a diferentes destinos con y sin alta velocidad 53

Figura 14. "Coste generalizado" en diversos modos de transporte en función del valor del tiempo. Efecto en la competitividad del tren de un aumento de su velocidad.....55

Figura 15. Relación entre la percepción media y velocidad media por productos de transporte por ferrocarril en España en 2007.....57

Figura 16. Distancias entre Madrid y otras ciudades por diferentes modos de transporte: ferrocarril de alta velocidad, ferrocarril convencional y carretera 60

Figura 17. Consumo global de energía final y en el transporte en España, por modo de transporte en 2004.....66

Figura 18. Flujos de la energía en España en 2008 68

Figura 19. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España 1990-2005 70

Figura 20. Efectos negativos del uso de la energía usada en el transporte según fuente primaria utilizada.....73

Figura 21. Usos de la energía en el transporte.....75

Figura 22. Energía primaria, final y útil y pérdidas 78

Figura 23. Flujos de la energía empleada para el transporte y pérdidas asociadas a los procesos de transporte y transformación. 79

Figura 24. Orden de magnitud de las pérdidas "well to tank" y "tank to wheel" según tipo de tracción aplicada en el transporte 80

Figura 25. Mix de tecnologías empleadas para la generación de electricidad (2004) para el ferrocarril en diversos países. 82

Figura 26. Pérdidas en energía entre la central generadora y el pantógrafo del tren según el nivel de tensión.....83

Figura 27. Comparación entre el tiempo de viaje y el consumo de energía de un tren entre Londres y Edimburgo para varias velocidades máximas según Kemp 91

Figura 28. Emisiones de dióxido de carbono por viajero.kilómetro según Van Essen 92

Figura 29. Relación gráfica entre la velocidad máxima de los trenes y su potencia continua 95

Figura 30. Comparación del consumo de energía por viajero.kilómetro en diversos tipos de trenes ordenado de menor a mayor velocidad media. 98

Figura 31. Comparación del consumo de un tren de alta velocidad con otro convencional mejorado en la misma distancia. 100

Figura 32. Comparación del consumo de energía a diferentes velocidades para un viaje de Londres a Edimburgo (Kemp, 1993) y de Madrid a Barcelona (elaboración propia) 103

Figura 33 .- Comparación de la resistencia al avance de un mismo tren con tracción eléctrica y con tracción diésel..... 108

Figura 34 .- Resistencia longitudinal debida a la gravedad 114

Figura 35. Resistencia total al movimiento del Talgo 350 en diversos perfiles 115

Figura 36. Rampa crítica y velocidad de equilibrio en una subida 118

Figura 37. Pendiente de equilibrio y velocidad de equilibrio en una bajada 120

Figura 38. Esquema del modelo aplicado para el cálculo de la energía y de las emisiones del ferrocarril127

Figura 39. Consumo energético de un tren en su recorrido entre A y B (sin considerar consumo de auxiliares ni freno regenerativo)..... 132

Figura 40. Flujo de energía en el tren para el conjunto de un recorrido de ida y vuelta (sin freno regenerativo) 133

Figura 41. Esquemas de las pérdidas en tracción eléctrica 136

Figura 42. Etapas en la aplicación del modelo 137

Figura 43. Valores característicos del coeficiente de curvas en función de la velocidad máxima de la línea por trazado 143

Figura 44. Perfiles de velocidad máxima de las líneas representativas en España de alta velocidad, convencional mejorado y convencional 150

Figura 45. Esquema de proceso de deceleración ante un punto de parada 157

Figura 46. Consumo desagregado del tren y su relación con la velocidad media 160

Figura 47. Visión gráfica de los resultados de la comparación del consumo de energía final por kilómetro tren empleando los valores representativos 162

Figura 48. Representación gráfica de los valores extremos que puede alcanzar el consumo de energía final neta por kilómetro.tren 165

Figura 49. Consumo neto de energía por kilómetro.tren y su relación con la velocidad media sin paradas según el sistema..... 168

Figura 50. Representación gráfica de los valores extremos que pueden alcanzar las emisiones por unidad de demanda (viajero kilómetro ortodrómico) 178

Figura 51. Representación gráfica de los valores extremos que pueden alcanzar diversos indicadores en el sistema de alta velocidad 179

Figura 52. Comparación gráfica de los valores de emisiones por viajero kilómetro ortodrómico en diversos estudios con los rangos de valores verosímiles..... 186

Figura 53. Representación de la variación del volumen del mercado y de la cuota de cada modo al introducir el tren de alta velocidad. 188

Figura 54. Representación gráfica del efecto global en una ruta de la implantación de un sistema de alta velocidad y del aumento de la velocidad..... 189

Figura 55. Representación del rango de emisiones por modos de transporte para una misma ruta 194

Figura 56. Rangos de variación y valores medios de las emisiones de los diferentes modos de transporte en diez rutas españolas 197

Figura 57. Representación gráfica de la evolución de la demanda Málaga Madrid y Barcelona Madrid al cambiar el tiempo de viaje 202

Figura 58. Relación entre la velocidad media del tren de alta velocidad y las emisiones evitadas en la ruta por cada viajero kilómetro que utiliza el tren de alta velocidad; distinguiendo rutas con oferta aérea y rutas sin oferta aérea 204

Figura 59. Relación entre la cuota del tren en el mercado tren+avión y el tiempo de viaje entre en las principales rutas mundiales y españolas entre 400 y 600 km..... 206

Figura 60. Consumo de energía importada y neta en pantógrafo en función de la velocidad media del tren en la línea Madrid-Barcelona 207

Figura 61. Emisiones del tren y el avión en el corredor Madrid-Barcelona para diferentes velocidades medias del tren..... 210

Figura 62 .- Coste y valor para los clientes de algunos atributos del servicio de viajeros 215

Figura 63 .- Esquema general de clasificación de costes del transporte..... 219

Figura 64 . Esquema general de la traslación de los costes 220

Figura 65 . Flujos económicos en la operación de servicios de viajeros..... 222

Figura 66. Relación entre el desgaste de diferentes materiales del tren y la velocidad media del servicio 249

Figura 67. Desglose de los costes totales de mantenimiento y limpieza según sistemas ferroviarios254

Figura 68 . Relación entre los costes de personal operativo y la velocidad media del servicio 264

Figura 69 . Variabilidad de los costes totales de explotación por unidad de oferta..... 271

Figura 70 . Estructura de costes de explotación por unidad de oferta..... 271

Figura 71 . Variabilidad de los costes totales de explotación por unidad de tráfico 273

Figura 72 . Estructura de costes de explotación por unidad de tráfico 273

Figura 73 . Representación gráfica de cada uno de los componentes de los costes operativos 283

Figura 74 .- Situación en la red de los tramos estudiados en los casos-ejemplo..... 288

Figura 75 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional de Madrid a Lleida ... 290

Figura 77. Planta de la sección de Alicante a Castelledefels..... 291

Figura 78 .- Perfil de las secciones de Alicante a Castelldefels antes y después de la adaptación a 200 kilómetros por hora 291

Figura 79 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional en Pajares 294

Figura 80 .- Perfil de las líneas de alta velocidad y convencional en Pajares 294

Figura 81 .- Planta de las líneas de alta velocidad y convencional entre Ourense y Santiago 296

Figura 82 .- Perfil de las líneas de alta velocidad y convencional entre Ourense y Santiago 296

Figura 83 . Representación gráfica del consumo de energía de los trenes de viajeros en cada uno de los casos analizados..... 300

Figura 84 . Representación gráfica del coste de explotación de los trenes de viajeros . 304

Figura 85 . Representación gráfica del consumo de energía de los trenes de viajeros en las líneas singulares..... 307

Figura 86 . Representación gráfica del coste de explotación de los trenes de viajeros en trazados singulares..... 311

Anejo 2. Abreviaturas y terminología

En la presente tesis se emplean con carácter general las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI)[33] y sus indicadores de múltiplos y submúltiplos. Sin embargo, existen algunas unidades, abreviaturas o acrónimos específicos de las materias que se tratan, que se enuncian o definen aquí para mayor claridad. Sobre las unidades y magnitudes más empleadas en el transporte de viajeros puede verse con un mayor detalle (García Álvarez, 2011e)

Magnitudes y unidades

Aprovechamiento ($v.km/p.km$).- Indicador que relaciona la oferta con la demanda en un servicio de transporte. Es el cociente entre los viajeros.kilómetro y las plazas.kilómetro, y para los servicios con paradas intermedias, como suelen ser los de ferrocarril, es un indicador mejor que el cociente entre los viajeros y las plazas. En inglés suele denominarse "load factor". Si en ningún momento viajan más viajeros que las plazas disponibles, el aprovechamiento es menor que la unidad.

Coeficiente de trayectoria (km/km_{ort}).- Para un modo de transporte, y entre dos puntos, llamamos *coeficiente de trayectoria* al cociente entre la longitud de la efectivamente recorrida por el vehículo (trayectoria) y la distancia ortodrómica entre esos puntos. Cuanto mayor sea el coeficiente de trayectoria, mayor será el recorrido necesario por ese modo de transporte para cubrir la distancia existente entre los dos puntos de origen y destino del viaje.

Demanda inducida (**$v.km$** o **v**).- Se denomina "demanda inducida" por una nueva infraestructura la integrada por aquellos viajeros que no viajarían si no existiera la nueva infraestructura. La cuantificación de la "demanda inducida", resulta mucho más compleja que la evaluación del nuevo reparto modal, y aún cuando se han realizado diversos estudios al respecto no parece haberse encontrado un modelo de validez general.

Distancia ortodrómica (km_{ort}).- Camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre; es el arco del círculo máximo que los une, menor de 180 grados. Dada la curvatura de la superficie de la tierra, la ortodrómica es una curva, y por ello la distancia ortodrómica no es la línea recta o más corta entre dos puntos, ya que tal línea recta podría atravesar la corteza terrestre entre dos puntos muy separados entre si (por ejemplo, entre España y Australia la ortodrómica mide unos trece mil kilómetros y la línea recta unos veinte mil kilómetros). La distancia ortodrómica es útil cuando se comparan distancias entre localidades lejanas. Se mide en kilómetros ortodrómicos (km_{ort})

Ocupación (v/p).-Indicador que relaciona la oferta con la demanda, dividendo los viajeros transportados por las plazas ofertadas. No es un indicador adecuado en el transporte interurbano cuando en el servicio se realizan paradas intermedias, siendo entonces preferible el *aprovechamiento*. La *ocupación* puede ser mayor que la unidad aunque no haya en ningún momento del recorrido más viajeros que plazas.

TKBR.- Tonelada kilómetro bruta remolcada, unidad de producción empleada en el ferrocarril y que se obtiene multiplicando la masa bruta de cada tren (tara más carga) sin contar la locomotora (de ahí lo de "remolcada") por su recorrido. Cuando se incluye la masa de la locomotora, la unidad pasa a ser **TKBC**, tonelada kilómetro bruta completa.

[33] El sistema legal de unidades de medida vigente en España es, tal y como establece la Ley de Metrología (3/1985), el Sistema Internacional de Unidades adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y vigente en la Unión Europea. En el Real Decreto 2032/2009 se establecen las unidades legales de medida, las definiciones de las unidades, sus nombres y símbolos, así como las reglas para la formación de sus múltiplos y submúltiplos de conformidad con los acuerdos de la CGPM y la normativa de la Unión Europea.

Tren.- Unidad de oferta concretada en una oportunidad de viaje. Puede asimilarse a "expedición". **Hora.tren** es la suma de es la suma de los tiempos de viaje de todos los trenes en un ámbito determinado (por ejemplo, en un año en una ruta); y **kilómetro.tren** es la suma de los recorridos de todos los trenes en un ámbito determinado. La palabra "tren" puede tener un significado confuso, pues en el mundo ferroviario se emplea para designar varios conceptos. Cuando se refiere a un conjunto físico de vehículos, en esta tesis hemos procurado emplear la denominación de "vehículo" o "material rodante", reservado la palabra "tren" para la unidad de circulación o de oferta.

Viajero.kilómetro ($v.km$).- Unidad de tráfico y de demanda que mide la suma de los recorridos realizados (o que se podrían realizar cuando se entiende como unidad de demanda) en un cierto periodo de tiempo en un servicio de transporte. Es la unidad básica de medida del transporte o del tráfico realizado ya que en el ámbito interurbano es necesario poner en relación el número de viajeros con el recorrido que realizan. Obsérvese que los kilómetros se refieren a los efectivamente realizados en el modo de transporte de que se trate, y por ello no tienen por qué coincidir con las distancias que pudiera haber en otro modo de transporte en la misma ruta. Se abrevia como "$v.km$" y en inglés suele expresarse como "passenger.kilometer" o su equivalente "passenger.mile".

Viajeros (v).- Unidad de tráfico, y de demanda que mide el número de viajes realizados (o que se podrían realizar cuando se entiende como unidad de demanda) en un cierto periodo de tiempo en un servicio de transporte. Un viajero se corresponde con un viaje, y la misma persona puede realizar varios viajes en el periodo temporal considerado, dando lugar a varios "viajeros". Se abrevia como "v", y en inglés se corresponde con el concepto de "passenger".

Acrónimos

AC.- Alternative Current, corriente alterna. Es el tipo de corriente eléctrica con el que se alimentan los trenes de alta velocidad, a diferencia de los convencionales que en su mayor parte se alimentan con corriente continua (**DC**, direct current)

ADIF.- Administrador de infraestructuras ferroviarias español. Creado por la Ley de Sector Ferroviario de 2003, comenzó su andadura el 1 de enero de 2005 absorbiendo al GIF y la actividad de infraestructura de Renfe (mantenimiento, gestión de la circulación, de las estaciones y del patrimonio). Es propietario de la red y estaciones de alta velocidad y gestor de la red convencional y de sus estaciones por encargo de su propietario, el Estado.

ATP.- Automatic Train Protection. Sistema automático de protección del tren que produce su frenado y detención si excede la velocidad prescrita; si se aproxima a excesiva velocidad a un punto de parada o de reducción de velocidad; o si rebasa un punto donde deba parar. Estos sistemas pueden ser de transmisión puntual o continua de la información desde la infrestructura hasta el tren; y pueden ser de supervisión puntual o continua de la velocidad del tren. Los sistemas de alta velocidad requieren equipos ATP (que no son imprescindibles para los ferrocarriles convencionales) al menos de supervisión continua (como es el ETCS nivel 1), pero preferiblemente denen ser además de transmisión continua (como es el ETCS nivel 2)

AVE.- Alta Velocidad Española. Marca que se aplica en España a todo lo relacionado con la alta velocidad ferroviaria. Designa tanto productos o servicios comerciales, como vehículos, y con menos frecuencia, líneas. Es el equivalente al francés TVG o al HST inglés. En los primeros años de la alta velocidad en España la marca se popularizó y algunos hicieron del acrónimo otra lectura alternativa como "ancho de vía europeo". En aquellos años en los que el tren de alta velocidad en España emulaba al avión, la ambivalencia de la palabra "AVE" se utilizó en la publicidad e imagen jugando con las ideas "vuela" y "sube".

CVM.- Cuadro de velocidades máximas. Tabla publicada por el administrador de infraestructuras en el que se expresan las velocidades máximas (de carácter permanente) existentes en cada tramo de una línea ferroviaria.

ERTMS.- European Railway Traffic Management System, sistema interoperable europeo de gestión del tráfico, que incluye varios susbsistemas como el ERTMS (sistema de protección del tren), o el GSM (sistema de comunicaciones tren-tierra).

ETCS.- European Traffic Control System, sistema europeo interoperable de protección del tren que forma parte del ERTMS. Puede operarse en niveles 1, 2 y 3, los dos primeros de los cuales están instalados en casi todas las líneas españolas de alta velocidad.

ETI.- Especificación Técnica de Interoperabilidad (STI, en inglés). Las ETIs establecen los parámetros técnicos sobre infraestructuras, material rodante, energía, etc. en el ámbito europeo. En muchos casos existen ETIs diferentes en la misma materia para el sistema ferroviario de alta velocidad y para el sistema ferroviario convencional.

UDT.- (Energía para) usos distintos de tracción, que es la parte de la energía consumida por una compañía ferroviaria que no se dedica al movimiento de los trenes. La energía UDT comprende la necesaria para talleres, oficinas, estaciones, señalización, etc.

UIC.- Unión Internacional de Ferrocarriles, organización de ámbito mundial (con sede en París) que agrupa a gestores de infraestructura, operadores ferroviarios, empresas integradas y otras entidades del ferrocarril en todo el mundo. Los miembros de la UIC representan alredor del 85% de los tráficos ferroviarios del mundo.

Conceptos o términos específicos empleados en el documento

Rampa y pendiente.- **Rampa** es un tramo de línea ferroviaria con perfil ascendente en el que los trenes aumentan su altitud. Se opone al concepto de **pendiente** que es un tramo de línea de perfil descendente. Obviamente, el concepto de rampa o pendiente está relacionado con el sentido de circulación de un tren, ya que al ser las líneas ferroviarias bidireccionales, el mismo tramo, que es un rampa para un tren, es una pendiente para un tren que circula en sentido contrario al anterior.

Aceleración y deceleración.- Un tren acelera cuando aumenta su velocidad, sea por la causa que sea. Normalmente acelerará si está traccionando, pero también puede acelerar sin traccionar en una pendiente. Normalmente decelera cuando frena, pero también puede decelerar sin frenar, por ejemplo, al subir una rampa.

Freno y tracción.- Un tren frena cuando ejerce una fuerza que se opone al movimiento del tren, y tracciona cuando los motores hacen una fuerza a favor del movimiento del tren. Habitualmente el efecto del frenado es una deceleración (pero no siempre) y análogamente con la tracción se logra una aceleración (aunque tampoco siempre ocurre así). Es importante dejar claro que *frenar* y *decelerar* no son sinónimos, como tampoco lo son, análogamente, *acelerar* y *traccionar*.

Este estudio analiza el efecto de la velocidad del tren en el consumo de la energía y emisiones de productos contaminantes, así como en los costes de explotación.

Para ello se comparan, en cada uno de dos campos de estudio, los resultados del sistema de alta velocidad (más de 250 km/h), el convencional mejorado para 200 km/h, el convencional eléctrico (160 km/h) y el convencional diesel.

Las diferencias de consumo y de emisiones entre los trenes de tracción eléctrica parecen más reducidas en el sistema de alta velocidad que en el sistema convencional mejorado, y más aún que en el sistema convencional.

En concreto, las emisiones en el sistema convencional mejorado (empleando en el cálculo los valores representativos) son superiores en un 11,5 % a las del sistema de alta velocidad; las del sistema convencional con tracción eléctrica son superiores en un 53,3 % al de alta velocidad; y las del convencional con tracción diésel son 4,2 veces superiores a las del sistema de alta velocidad.

En el ámbito de los costes de explotación, los menores costes se observan en el sistema de alta velocidad, tanto por unidad de oferta como por unidad de tráfico: los costes por unidad de oferta, son un 43 % mayores en el sistema convencional mejorado que en el de alta velocidad, un 58 % en el convencional eléctrico y un 85 % mayores en el convencional diésel.

Alberto García Álvarez es doctor en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte y doctor en Ciencias Económicas y Empresariales. Actualmente (2015) es director gerente de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Ingresó en Renfe en 1981 y ha sido director gerente de Estaciones; director de Operaciones de AVE y director de Explotación del GIF. Entre 2012 y 2014 fue director General de Renfe Viajeros.

Ha publicado entre otros libros: "La alta velocidad en España: líneas y trenes (2009)"; "Explotación económica y regulación del transporte de viajeros por ferrocarril" (2006); "Operación de trenes de viajeros" (1998); "La velocidad en el ferrocarril" (1986); "Diseño funcional y técnico de estaciones ferroviarias para viajeros" (2002); "Dinámica de trenes en alta velocidad" (2004 a 2015) y "Cambio automático de ancho de vía de los trenes en España" (2009).

PATROCINA

ALSTOM

Ediciones Vía Libre

Fundación de los Ferrocarriles Españoles