



*La extensión de la red AVE mejora la sostenibilidad del transporte*

---

## Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos

Alberto García Álvarez  
albertogarcia@ffe.es

Versión extendida, actualizada y corregida del artículo publicado en la revista "Anales de Mecánica y Electricidad" (Vol.LXXXIV, Fas. V, sept.-octub. 2007), y ampliado en la revista "Via Libre" núm. 515, enero 2008)

Un viaje de Barcelona a Madrid en avión produce unas emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes, aproximadamente, al peso de la persona que viaja (70 kg); si el viajero opta por el tren de alta velocidad en el mismo recorrido, las emisiones serán aproximadamente iguales al peso de su equipaje (13 kg). En ese artículo se muestra que, en el caso español, y en trenes y en líneas concretas (Madrid a Sevilla, a Barcelona, a Toledo, a Valladolid y a Málaga) el tren de alta velocidad es más eficiente energéticamente que todos los demás modos de transporte (incluso que el tren convencional). Como la aparición del tren de alta velocidad supone la captación de viajeros de todos los otros modos, también reduce las emisiones y el consumo de energía en el corredor. El trabajo es relevante por cuanto está basado en datos reales y concretos, en lugar de emplear valores medios que conducen a resultados no siempre comparables y que son difíciles

**de aceptar de forma general. Por otra parte, los estudios publicados suelen carecer de datos reales del consumo del tren de alta velocidad, que ha sido detalladamente estudiados para este trabajo.**

La puesta en servicio de las líneas de alta velocidad de Madrid a Barcelona, Córdoba a Málaga y Madrid a Valladolid sitúa a España un destacable lugar en cuanto a la longitud de nuevas líneas de alta velocidad y a las velocidades máximas practicadas en ellas. Esta expansión de la red plantea la cuestión del efecto del tren de alta velocidad sobre el consumo de energía y las emisiones, ya que muchas voces reclaman que, en lugar de extender el tren de alta velocidad se proceda a la mejora del tren convencional (supuestamente más eficiente) o simplemente a la mejora de la eficiencia en los modos actuales.

La cuestión puede abordarse desde tres puntos de vista:

1. Determinar si el tren de alta velocidad produce unas emisiones y tiene una eficiencia energética mayores o menores que el tren convencional mejorado.
2. Comparar la eficiencia energética del tren de alta velocidad con la de otros modos de transporte
3. Analizar el efecto de la aparición del tren de alta velocidad en un corredor, considerando el diferencial de consumo y emisiones, la transferencia de tráfico de otros modos de transporte y la demanda inducida.

La primera de las cuestiones ha sido ya abordada por el autor en diversas publicaciones, cuyos resultados se sintetizan a continuación; la segunda es objeto principal de este trabajo; y la tercera está siendo estudiada por el autor en el marco de un próximo trabajo sobre el que se que se avanzan algunas reflexiones.

Así pues, en el artículo se trata de analizar, con el apoyo de casos concretos reales de diversas explotaciones de alta velocidad en España, cuáles son los factores que intervienen en el balance final energético y de emisiones; y disponer de un orden de magnitud de los resultados que pueden esperarse en los casos más significativos.

## ¿El tren alta velocidad es menos eficiente que el tren convencional?



El autor ha publicado diversos trabajos en los últimos años sobre el consumo de energía de los trenes de alta velocidad. Su objetivo 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 esos trabajos se comparan los consumos del tren de alta velocidad con los de tren convencional mejorado<sup>1</sup>.

Así, en García Álvarez (2005), mediante simulación validada con datos reales, se compara específicamente el consumo de energía de un tren convencional a 200 km/h (locomotora 252 y 7 coches Arco) por una línea clásica mejorada (Barcelona a Alicante) con el consumo de un tren de alta velocidad (Talgo 350, serie Renfe 102) en la línea de alta velocidad de Madrid a Lledia. En ambos casos, el tren tiene la misma capacidad. La velocidad media es superior en un 32,6 % en 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 (-15,7%). No se ha tenido en cuenta el efecto de la reducción del recorrido de las líneas de alta velocidad, 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 simula también el consumo del mismo tren de alta velocidad (Talgo 350) en dos casos: uno rodando por la línea de alta velocidad, y otro rodando por la línea convencional mejorada. Se observa que la diferencia del consumo es más reducida, pero sigue siendo inferior (- 7,4% en barras

---

<sup>1</sup> Sin que ello signifique que el autor piense que ha de abandonarse el ferrocarril convencional, que debe jugar un papel fundamental en ciertos segmentos y zonas y además es un buen complemento del tren de alta velocidad; ni tampoco piensa el autor que el tren de alta velocidad sea una solución de aplicación universal. Tan solo se trata de comprobar el hecho objetivo de si el tren de alta velocidad consume más o menos energía que el tren convencional mejorado.

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 km/h o más) sea esencialmente diferente del tren convencional mejorado (circulando a velocidades máximas del orden de 200 km/h), siempre para características homogéneas del servicio”.

Otra comparación de un nuevo tren de alta velocidad con un tren clásico sobre la misma línea (aunque mejorada) puede encontrarse en Andersson y Lukaszewicz (2006) que han trabajado en profundidad en el estudio del consumo detallado de los trenes en Suecia, y quienes muestran que en el mismo recorrido (Väterás a Estocolmo) en 1994 un tren convencional empleaba 78 minutos y gastaba 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%).

Más en detalle, en García Álvarez (2006) se analizan las razones físicas y técnicas que explican que el consumo del tren de alta velocidad no sea muy diferente del consumo del tren convencional: puede ser mayor o menor según los casos, pero en general será ligeramente menor. Entre las razones que explican este hecho están:

- Algunas propiedades de los trenes de alta velocidad (menor resistencia mecánica y aerodinámica, mayor rendimiento energético, menor masa por plaza);
- Otras típicas del servicio (menor número de paradas, mayor tamaño del tren medio, mayor aprovechamiento...);
- Otras, en fin, de la línea (menor resistencia de las curvas y mayor coeficiente de túneles por ser éstos de mayor sección; perfil de velocidades más homogéneo; menor necesidad de frenar en las pendientes; mayor tensión de electrificación -y, por ello, menores pérdidas-, menos tiempo de uso de los servicios auxiliares)...
- Además, recorren una menor trayectoria para el mismo desplazamiento (ya que las líneas de alta velocidad son más cortas que las convencionales entre los mismos puntos); y a las mayores posibilidades de realizar conducción económica y de aprovechar la energía del freno regenerativo.

En García Álvarez y Martín Cañizares (2007 a) 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 tren Alvia serie 120 entre Lleida y Roda de Bará, y el 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 comprueba que en este caso, los trenes Alvia y Talgo 200 consiguen reducciones del consumo de energía en pantógrafo del 16% y del 8% 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 64% y del 78% respectivamente.

También analizamos en el mismo artículo el consumo de electricidad en barras de salida de la central generadora. Las diferencias con el consumo en pantógrafo son debidas a que en el transporte de la energía y la transformación de la tensión desde la central generadora al pantógrafo se producen pérdidas, lo que hace que el consumo en barras de la central sea mayor que en el pantógrafo; y además a que el tren puede devolver energía de frenado a la red, lo que reduce la necesidad de producción de la central. En el caso de Lleida a Roda se observa 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 disminuye un 27% (en pantógrafo la reducción 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 líneas convencionales.

Los trabajos anteriores están orientados a dar respuestas técnicamente válidas para elegir entre la mejora de las líneas convencionales o construir nuevas líneas de alta velocidad. También se demuestra que, en general, un aumento de las velocidades máximas (por ejemplo de 300 a 350 km/h) no produce necesariamente un aumento del consumo energético por encima del valor del tiempo ahorrado por los viajeros.

El "sistema de alta velocidad" implica un determinado diseño del material, de la infraestructura y de la explotación del servicio; y todos esos factores, de forma conjunta y no separable, constituyen un subsistema de transporte de alta eficiencia energética y mayor que la del tren convencional. Desde luego que un moderno tren de alta velocidad, circulando sobre una moderna infraestructura de alta velocidad de trazado recto, y haciéndolo a una velocidad baja consumiría menos que el mismo tren a mayor velocidad. Pero en ese caso cabría preguntarse para qué se ha hecho la inversión en el tren, y sobre todo, en la infraestructura. Y también es útil comprobar cómo un tren que circule a esas velocidades reducidas es incapaz de captar cantidades relevantes de viajeros del avión y del coche particular, por lo que el conjunto de emisiones y consumo de energía en el corredor (tomando en consideración todos los modos de transporte) sería indudablemente superior al que se podría lograr con el tren a alta velocidad.

## Comparación de la eficiencia energética en el caso español



Foto: Patier/renfe

El balance energético y de emisiones de la extensión de la red de alta velocidad requiere la comparación del consumo energético de los diversos modos de transporte alternativos. Esta comparación, suele dar lugar a numerosos y divergentes resultados dependiendo de las hipótesis que se empleen relativas a factores de carga de los vehículos, factores de emisiones, rendimientos y pérdidas del sistema de generación, transporte y conversión de la electricidad, características de los servicios (velocidades y paradas, etc). En numerosos estudios se emplean valores medios extraídos de casos a veces incompatibles y además con valores que, en ocasiones corresponden a países diferentes (téngase en cuenta que los factores de emisión de los sistemas de generación de electricidad pueden variar de unos países a otros en proporción de 1 a 4, y en el mismo país de unos años a otros puede variar de 1 a 1,5).

Kemp en varios trabajos, entre ellos el titulado "Salvemos el planeta, tomemos el coche" (2004) obtiene diversos resultados comparativos muy desfavorables para el tren de alta velocidad, y al salir al paso de la polémica suscitada en Gran Bretaña por la publicación de sus resultados, afirma que "nadie tiene datos autorizados del consumo del tren de alta velocidad; en segundo lugar, 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 medidas empleadas, incluyendo MJ, toneladas equivalentes de petróleo, toneladas de carbón y gramos por plaza kilómetro hace la comparación casi imposible para los no especialistas".

Pues bien, para tratar de salvar estas dificultades, en este trabajo se sigue la metodología de análisis expuesta en García Álvarez y Martín Cañizares (2007b) y la aplicación concreta, en lugar de emplear valores medios de origen desconocido, se hace para cinco casos concretos españoles, que pueden ser representativos de las nuevas líneas de alta velocidad y de los servicios que en ellas se prestan.

- Se analiza el caso de línea de alta velocidad (LAV) de Madrid a Sevilla, de la que dispone de suficientes datos reales obtenidos en más de quince años de explotación, y que corresponde a un caso bastante representativo de una línea de alta velocidad de primera generación, con una longitud de casi 500 kilómetros y con un movimiento mayoritario entre las estaciones extremas (Madrid y Sevilla) situadas en localidades que disponen de aeropuertos y de servicios aéreos entre ellas. Además, en la ruta hay servicios de autobús y posibilidad de transporte por coche.
- Un segundo caso se corresponde con la LAV de Madrid a Barcelona, de la que solo se dispone de algunos datos de la explotación parcial desde 2003 y sobre la que, por lo tanto, habrá que hacer algunas suposiciones basadas en la simulación. En este caso, las características de la línea y del servicio presentan algunas diferencias con la de Sevilla, como son la mayor longitud (625 kilómetros, aproximadamente), la existencia de un mayor número de localidades intermedias sin servicios aéreos alternativos al ferrocarril (Zaragoza, Lleida, Tarragona, Guadalajara), la madurez del mercado de negocio y la existencia de una muy notable movilidad previa a la aparición de la alta velocidad y el peso enorme del modo aéreo. Esta nueva línea de alta velocidad y los trenes que circulan por ella, además han sido diseñados con algunos parámetros diferentes (más evolucionados) que la de Madrid a Sevilla, y pueden considerar representativos de la segunda generación de líneas y trenes de alta velocidad.
- El tercer caso corresponde a la línea de alta velocidad de Madrid a Toledo, con un servicio típicamente regional, sin paradas intermedias, una distancia corta (75 km), las alternativas de una autopista de peaje, una autovía y un frecuente servicio de autobuses como modos alternativos.
- Las nuevas líneas de Alta Velocidad de Córdoba a Málaga y de Madrid a Valladolid son también analizadas, si bien en estos casos con las limitaciones que supone el no disponer de datos de la explotación en alta velocidad por lo que es preciso recurrir a los modelos comprobados en las demás líneas, realizado las adaptaciones sugeridas por las peculiaridades del caso. En el caso concreto de Madrid a Valladolid, no se realiza la comparación con el avión por entender que, aún cuando ambas poblaciones disponen de aeropuerto, la reducida distancia entre ellas (menos de 200 km) la hace inabordable para el modo aéreo, y de hecho nunca ha habido servicios regulares por avión.

### **Observaciones metodológicas generales**

Seguidamente se explican algunos de los puntos clave o diferenciales de la metodología empleada (en el Anexo se presentan otras hipótesis metodológicas con mayor detalle).

**Distancias.**- Un elemento importante del estudio es considerar las distancias reales que se recorren en cada uno de los modos y que, en la misma ruta, presentan diferencias significativas. En este caso, llegan al 30% en la ruta de Valladolid, están entre el 22 y 25% en la rutas Madrid a Sevilla, Málaga y a Barcelona y al 17% en la ruta de Toledo. Las diferencias de recorrido no suelen considerarse en los estudios comparativos de consumo y emisiones, pero son relevantes como puede deducirse de lo expuesto.

Especialmente importante es que el tren de alta velocidad suele requerir, entre los mismos puntos, recorridos más cortos que el tren convencional, e incluso en el caso de Madrid a Sevilla, la distancia recorrida en tren de alta velocidad llega a ser similar recorrida en avión, incluyendo los accesos a la estación y al aeropuerto.

Para una comparación más completa, en el caso de los viajes en avión y en tren se consideran las distancias a los aeropuertos y estaciones, si bien en estos recorridos de acceso se emplearán los consumos del coche y no los del modo que se está analizando.

Como origen final de los viajes se han considerado los siguientes puntos: en Madrid, la Plaza de Colón; en Sevilla, el Paseo de Colón; en Barcelona, la Plaza de Catalunya, en Toledo, la plaza de Zocodover, en Málaga la plaza de las Flores; y en Valladolid, la plaza de Zorrilla.

DISTANCIAS REALES Y DE ACCESO EN DIVERSOS MODOS DE TRANSPORTE															
Todas las distancias en kilómetros	Madrid a Málaga			Madrid a Barcelona			Madrid a Valladolid			Madrid a Sevilla			Madrid a Toledo		
	Tramo interurbano	Tramo urbano (coche o bus)	Accesos (tren, avión)	Tramo interurbano	Tramo urbano (coche, bus)	Accesos (tren, avión)	Tramo interurbano	Tramo urbano (coche, bus)	Accesos (tren, avión)	Tramo interurbano	Tramo urbano (coche, bus)	Accesos (tren, avión)	Tramo interurbano	Tramo urbano (coche, bus)	Accesos (tren, avión)
Distancia ortodrómica	417,0			486,0			162,0			396,0			70,0		
Distancia media vuelo	446,2		29,0	528,0		33,0	179,8			448,0		29,0			
Distancia en coche	536,0	7,0		612,5	8,5		211,0	5,0		526,0	7,0		83,0	5,0	
Distancia en autobús	575,0	5,0		614,5	17,5		198,0	3,0		528,0	16,0		70,0	4,0	
Distancia tren convencional	542,0		3,5	707,7		4,5	256,0		2,5	570,8		4,0	90,2		3,0
Distancia tren alta velocidad	512,0		3,5	627,2		4,5	180,0		7,0	470,5		4,0	75,1		3,0
<b>Distancia mínima/máxima</b>	<b>0,78</b>		<b>0,82</b>	<b>0,75</b>		<b>0,79</b>	<b>0,70</b>		<b>0,72</b>	<b>0,78</b>		<b>0,83</b>	<b>0,83</b>		<b>0,84</b>

FC Convencional: De Madrid At. a Barcelona Sants, distancia media de por Valls y Lledia Tarragona; Madrid a Toledo por Aranjuez  
 FC Alta Velocidad: De Madrid P.A. a Barcelona Sants, por Zaragoza y no por pasando por Lledia  
 Bus: De Madrid Toledo por A42, de Madrid a Sevilla por Córdoba (A4) y de Madrid a Barcelona entrando en Zaragoza  
 Coche Madrid Barcelona por AP2-AP7. Madrid Sevilla por Merida. Madrid a Toledo por AP41

**Vehículos empleados.**- Se ha procurado utilizar el vehículo más representativo de aquellos con los que se prestan los servicios en la ruta indicada, ponderando en su caso si hay diversos tipos de vehículos. En el caso del tren y del avión se toman en consideración los consumos debidos al acceso a la estación y al aeropuerto desde el centro de la ciudad suponiendo que los viajeros acceden en coche particular o en taxi.

**Aprovechamiento.**- Uno de los puntos clave en los estudios de comparación modal es el "aprovechamiento" considerado, ya que los consumos y emisiones para mover un vehículo son poco dependientes de si éste va a lleno o vacío, por lo que al imputar los consumos a los viajeros, se producen importantes variaciones dependiendo de cuál sea el número de viajeros que transporta. Los viajeros se calculan multiplicando la capacidad del vehículo (plazas) por el aprovechamiento (o "load factor" empleando la terminología anglosajona de la aviación), definido como el cociente entre los viajeros.kilómetro y las plazas.kilómetro. Como los aprovechamientos medios suelen ser muy diferentes según modos de transporte, este factor influye de forma notable en los resultados de a comparación modal. En este trabajo emplearemos como "medios" los aprovechamientos reales (conocidos o estimados) en el caso español, en cada modo de transporte. También estudiamos los consumos en el caso de un aprovechamiento muy bajo (20%, que es el mínimo posible en el coche) y de un aprovechamiento muy alto (100%) en todos los modos de transporte, para poder analizar la sensibilidad de a este factor.

## Resultados del coche

Para el transporte en coche a larga distancia se han considerado todo tipos de vehículos: Uno de gasolina del segmento "berlina media" y uno de gasóleo del segmento "compacto"; para Madrid Toledo y a Valladolid (en el que se supone mayor sensibilidad al consumo por ser los viajeros más repetitivos) se han considerado dos coches de gasóleo: uno del segmento "utilitario" y otro del segmento "compacto". Para los accesos a la estación y al aeropuerto se ha considerado una berlina grande de gasóleo. Se han empleado coches modernos (los que están a la venta a finales de 2007) y, por lo tanto, el consumo del parque automovilístico existente es superior; sin embargo, estos coches se consideran más representativos del parque que existirá en los próximos años.



Se emplean los consumos oficiales homologados para los coches y las emisiones asociadas, si bien los consumos en la conducción real son superiores a estos valores. Como estos datos homologados no tienen en cuenta el consumo de energía para los servicios auxiliares (calefacción, aire acondicionado, iluminación, etc.), se ha sumado una cantidad fija de 0,4 l/100 en el caso del ciclo interurbano y de 0,8 l/100 en el ciclo urbano para ese concepto.



En cada caso se han calculado el consumo y emisiones del coche para el ciclo urbano y para el interurbano, así como para los ciclos "mixtos" de estación (100% urbano) y de aeropuerto (60% interurbano y 40% urbano, aunque en el análisis posterior se aplicará el dato real de cada aeropuerto).

Los resultados obtenidos para el coche, son los recogidos en la tabla. En ella se aprecia el efecto de la baja ocupación media del coche y cómo las emisiones se sitúan en el entorno 54 a 63 kg de CO<sub>2</sub> por viajero en los recorridos largos, y de unos 6 kg por pasajero de Madrid a Toledo y 14 kg de Madrid a Valladolid.

CONSUMO Y EMISIONES DEL COCHE POR VIAJERO EN EL RECORRIDO											
Ruta	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
						Con LF=0,2		Con LF medio estimado		Con LF = 1	
	Distancia recor. (km)	kWh energía primaria	Emisiones CO <sup>2</sup> (g)	Aprov. (LF) (vkm/pkm) estimado	Plazas	kWh energía primaria	Emisiones CO <sup>2</sup> (kg)	kWh energía primaria	Emisiones CO <sup>2</sup> (kg)	kWh energía primaria	Emisiones CO <sup>2</sup> (kg)
Madrid PC a Malaga PF	543	371,4	82.671	5	0,30	371,4	82,7	247,6	55,1	74,3	16,5
Madrid PC a Barcelona PC	621	424,9	94.577	5	0,30	424,9	94,6	283,3	63,1	85,0	18,9
Madrid PC a Valladolid	216	125,5	28.371	5	0,40	125,5	28,4	62,8	14,2	25,1	5,7
Madrid PC a Sevilla PC	533	364,6	81.157	5	0,30	364,6	81,2	243,1	54,1	72,9	16,2
Madrid PC a Toledo PZ	88	51,5	11.645	5	0,40	51,5	11,6	25,8	5,8	10,3	2,3

## Autobús

En el autobús, se emplean estimaciones de resultados de los servicios regulares en España. De ellos, se dispone de una información precisa de tipo de autobús empleado, su capacidad y los consumos aproximados; mientras que del índice de aprovechamiento es estimado por observaciones directas y la media de servicios análogos.

Los resultados del autobús muestran unas emisiones del orden de 4 veces menores que las del coche (consecuencia, entre otros factores, de un aprovechamiento mucho mayor) del entorno de 13 a 14 kg de CO<sub>2</sub> por viajero en recorridos largos y de dos kilogramo de CO<sub>2</sub> por viajero de Madrid a Toledo y 6 de Madrid a Valladolid. Los resultados aparecen recogidos en la tabla.

CONSUMO Y EMISIONES DEL AUTOBÚS POR VIAJERO EN EL RECORRIDO											
Ruta	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
	Distancia recorrida (km)	kWh energía primaria pet.	Emisiones CO <sub>2</sub> (g)	Plazas por autobús	Aprov. medio (LF) vkm/pkm	LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
						Energía primaria petról. (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid a Málaga	580	1.721	450.000	56,26	0,59	153	40,0	52	13,5	31	8,0
Madrid a Barcelona (Parada Zaragoza)	632	1.889	493.880	56,26	0,61	168	43,9	56	14,5	34	8,8
Madrid a Valladolid	201	598	156.320	50	0,54	60	15,6	22	5,8	12	3,1
Madrid a Sevilla (parada Córdoba)	544	1.627	425.387	56,26	0,55	145	37,8	53	13,9	29	7,6
Madrid a Toledo (directo)	74	223	58.400	50	0,60	22	5,8	8	2,0	4	1,2

Notas:  
Aprovechamiento y plazas por bus, el estimado de los servicios regulares en 2007

## Avión

Para el avión, se emplean los datos de las distancias reales voladas en los aviones en la rutas de Madrid Barajas a Sevilla San Pablo, Málaga y a El Prat (que presentan incrementos entre el 13% y el 9% sobre la distancia ortodrómica). Se ha considerado un mix de 15% de aviones de tipo antiguo (MD80) y un 85% de aviones nuevos, más eficientes (A 320). Los datos resultantes, incluyendo los desplazamientos de acceso en coche, revelan unas emisiones de 61 a 71 kg de CO<sub>2</sub> por viajero de los que alrededor de un 5% proceden de los consumos en los accesos al aeropuerto. Los resultados completos se muestran en la tabla.

CONSUMO Y EMISIONES DEL AVIÓN POR VIAJERO EN EL RECORRIDO											
RUTA AÉREA											
	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
	Distancia recorrida (km)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Plazas por avión	Aprov. medio (LF) vkm/pkm	LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
						Energía primaria petról. (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid B. a Málaga	446,19	23.886	7.377	170	0,75	703	217,0	187	57,9	141	43,4
Madrid B. a Barcelona EIP.	528	27.702	8.555	170	0,75	815	251,6	217	67,1	163	50,3
Madrid B. a Sevilla SP	448	23.967	7.402	170	0,75	705	217,7	188	58,1	141	43,5

RUTA AÉREA MÁS ACCESOS											
	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
	Distancia aérea+accesos (km)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (g)	Plazas por coche acceso	Aprov. Med.ca. (LF) vkm/pkm	LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
						Energía primaria petról. (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid PC a Málaga	475,19	N.P.	N.P.	4	0,3	724	221,9	202	61,2	145	44,4
Madrid PC a Barcelona PC	561	N.P.	N.P.	4	0,3	840	257,3	234	70,9	168	51,5
Madrid PC a Sevilla PC	477	N.P.	N.P.	4	0,3	727	222,7	203	61,4	145	44,5

## Tren convencional

Se han empleado para el tren convencional, los datos de los trenes que hacían los servicios diurnos de Madrid a Sevilla, Barcelona, Málaga, Valladolid y Toledo antes de la implantación de la alta velocidad. También se han empleado las distancias de las rutas por las que circulaban estos trenes, sus plazas y consumos. Para los aprovechamientos medios se han considerado los últimos datos disponibles de Renfe, que son los del año 2006, utilizándose aprovechamiento medio de los trenes de "Larga distancia" para las rutas de Madrid a Sevilla, Málaga y a Barcelona, el aprovechamiento medio de los trenes de "Media Distancia convencionales" para la ruta de Madrid a Toledo y una media ponderada (70-30) en la de Madrid a Valladolid.



CONSUMO Y EMISIONES DEL TREN CONVENCIONAL POR VIAJERO EN EL RECORRIDO											
RUTA FERROVIARIA											
Ruta	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
						LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
	Distancia FC (km)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Plazas por tren	Aprov. medio (LF) vkm/pkm	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid At. a Málaga M.Z.	542	7.887	2.070	282	0,64	140	36,7	44	11,5	28	7,3
Madrid At. a Barcelona S.	707,7	9.136	2.398	228	0,64	200	52,6	63	16,4	40	10,5
Madrid At.C. a Valladolid	256	2.268	595	274	0,35	41	10,9	24	6,2	8	2,2
Madrid At. a Sevilla Sta.J.	570,8	8.306	2.180	282	0,64	147	38,6	46	12,1	29	7,7
Madrid At.C a Toledo	90,17	614	161	270	0,35	11	3,0	6	1,7	2	0,6

RUTA FERROVIARIA MÁS ACCESOS											
	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
						LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
	Distancia FC+acceso s (km)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Plazas por coche acceso	Aprov. Med.ca. (LF) vkm/pkm	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>pet</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid PC a Málaga M.Z.	571	N.P.	N.P.	4	0,30	144	37,5	46	12,0	29	7,5
Madrid PC a Barcelona PC	740,7	N.P.	N.P.	4	0,30	205	53,6	66	17,1	41	10,7
Madrid PC a Valladolid C.G.	258,5	N.P.	N.P.	4	0,50	44	11,5	25	6,5	9	2,3
Madrid PC a Sevilla PC	599,8	N.P.	N.P.	4	0,30	151	39,6	49	12,7	30	7,9
Madrid PC a Toledo PZ	93,17	N.P.	N.P.	4	0,50	15	3,7	8	2,0	3	0,7

Se ha aplicado el consumo por tonelada kilómetro deducido de las tarifas aplicadas por Adif en 2007 para la facturación del coste de energía a los operadores. Al ser los trenes estudiados de tracción eléctrica, hay que tener en cuenta que se ésta se produce con un mix de generación variable de un año a otro, lo que induce un consumo de combustibles fósiles y una emisiones también variables. Se ha adoptado el criterio de empujar el mix de generación del año 2006 para el sistema eléctrico peninsular español (42% rendimiento de generación, y emisiones de 337 g de CO<sub>2</sub>/kWh). Para el tren se obtiene como un indicador relevante, la energía primaria (medida en kWh<sub>pf</sub>) procedente de fuentes fósiles (petróleo, carbón y gas) para tratar de medir, a través de este indicador, la contribución al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Este indicador es comparable al de la energía primaria de petróleo empleada para los modos de carretera y para el avión, pues reflejan la misma contribución al agotamiento de los recursos del planeta.

Las emisiones resultantes bajan hasta los 13-17 kg de CO<sub>2</sub> por pasajero en las rutas de larga distancia (de ellos, un 5% proceden de las emisiones en los accesos a la estación). Estas emisiones son aproximadamente unas cuatro veces menos que el coche.

## Tren de alta velocidad

Por lo que se refiere al tren de alta velocidad, se han considerado las distancias reales existentes por estas líneas (más los accesos en coche a las estaciones). Las características físicas de los trenes empleados en este servicio (Madrid Sevilla, series 100 y 103; Madrid a Barcelona y Madrid a Málaga series 102 y 103, Madrid a Toledo serie 114; y Madrid a Valladolid series 102 y 114); con sus plazas y los aprovechamientos medios reales en 2006 de los servicios de alta velocidad Larga distancia (0,7) y de Avant de Madrid a Toledo (0,56) y una intermedia ponderada de Madrid a Valladolid (0,62).



Los consumos de electricidad del tren de alta velocidad se ha obtenido de un simulador desarrollado por el autor, ajustado y validado con observaciones de la realidad (tanto medidas de energía importada y exportada en subestaciones como en el tren).

Los resultados muestran unas emisiones del orden de 9,4 a 14 kg de CO<sub>2</sub> por pasajero en larga distancia, es decir, de 4,5 a 6 veces menos que el coche.

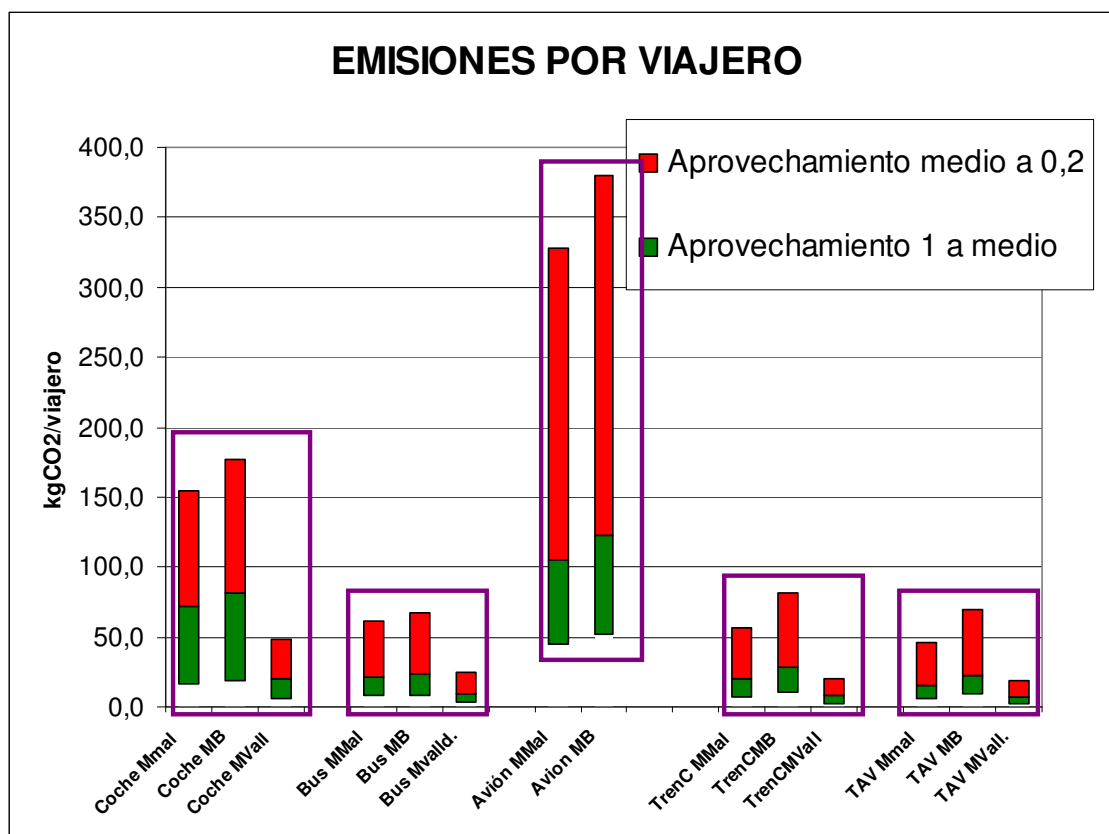
<b>CONSUMO Y EMISIONES DEL TREN DE ALTA VELOCIDAD POR VIAJERO EN EL RECORRIDO</b>											
<b>RUTA FERROVIARIA</b>											
Ruta	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
						LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
	Distancia FC (km)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Plazas por tren	Aprov. medio (LF) vkm/pkm	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria fósil (kWh <sub>fósil</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid P.At. a Málaga M.Z.	512,0	8.483	2.226	367	0,70	116	30,4	33	8,7	23	6,1
Madrid P.At. a Barcelona S.	627,2	12.276	3.222	351	0,70	175	45,9	50	13,1	35	9,2
Madrid Ch. a Valladolid	180,0	2.681	704	293	0,62	46	12,0	15	3,9	9	2,4
Madrid P.At. a Sevilla Sta.J.	470,5	8.561	2.247	367	0,70	117	30,7	33	8,8	23	6,1
Madrid P.At. a Toledo	75,1	766	201	270	0,56	14	3,7	5	1,3	3	0,7
<b>RUTA FERROVIARIA MÁS ACCESOS</b>											
	Datos generales del recorrido					Consumo y emisiones por viajero en el recorrido					
						LF=0,2		LF= Medio real		LD 1 (Plena carga)	
	Distancia FC+accesos (km)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>petr</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (g)	Plazas por coche acceso	Aprov. Med.ca. (LF) vkm/pkm	Energía primaria petrol. (kWh <sub>petr</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>petr</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)	Energía primaria petróleo (kWh <sub>petr</sub> )	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg)
Madrid a Málaga	515,5 N.P.	N.P.	N.P.	4	0,30	119	31,2	36	9,2	24	6,1
Madrid a Barcelona	631,7 N.P.	N.P.	N.P.	4	0,30	179	46,9	53	13,8	36	9,2
Madrid (Colón) a Valladolid (Pl.Zorilla)	187,0 N.P.	N.P.	N.P.	4	0,5	48	12,6	16	4,1	10	2,4
Madrid a Sevilla	474,5 N.P.	N.P.	N.P.	4	0,30	121	31,6	36	9,4	24	6,1
Madrid (Colón) a Toledo (Zocodover)	78,1 N.P.	N.P.	N.P.	4	0,50	17	4,4	6	1,6	3	0,7

## Comparación de modos

La comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los diversos modos de transporte muestra que en las todas las rutas el tren de alta velocidad es el modo que menos emisiones produce (tanto para el aprovechamiento máximo, mínimo o medio) seguido a poca distancia del tren convencional y del autobús que presentan emisiones similares.

Tren convencional y autobús se reparten el segundo lugar según los corredores: en las rutas de Málaga y Sevilla el tren convencional emite menos que el bus; en las de Barcelona y Valladolid el autobús emite menos; y en la Toledo emiten prácticamente lo mismo, aunque las diferencias son mínimas en todos los casos.

El coche particular con un aprovechamiento máximo (5 personas por coche), puede llegar a igualar las emisiones del tren de alta velocidad, convencional o autobús, pero sólo si éstos tienen un aprovechamiento muy bajo. El avión, sin embargo, aunque vuele lleno, no llega a igualar las emisiones de trenes de alta velocidad, convencionales y autobuses no siquiera cuando éstos vayan sólo con el 20% de aprovechamiento.



En cuanto a la comparación de los consumos de energía primaria de origen fósil y por ello en trance de agotamiento) los resultados son muy semejantes a los de las emisiones. El tren de alta velocidad se comporta mejor que cualquier otro modo de transporte en todas y cada una de las rutas, pero aun así el autobús muestra también una gran eficiencia en este campo con cifras del orden de magnitud de las del tren convencional, pero no así el coche particular y el avión, que se sitúan claramente por encima en cualquier rango de aprovechamientos.

## **1.1. Anexo Hipótesis para el cálculo del consumo y emisiones en cada modo de transporte alternativo**

El cálculo del consumo y emisiones para cada uno de los grupos de viajeros en alta velocidad y en el modo alternativo que utilizarían, se realiza de acuerdo con las hipótesis y la metodología que se explican seguidamente.

### **Distancias y rutas**

En primer lugar, se han analizado las distancias existentes cada uno de los modos. En los casos del ferrocarril y la aviación, se ha considerado, además de la distancia recorrida en el tren o en el avión, las distancias de acceso a las estaciones y aeropuertos respectivamente. No se han considerado estas distancias adicionales en el caso del coche y del autobús por entender que en el coche se puede ir de centro a centro, y en el autobús que la distancia hasta la terminal se puede cubrir también en autobús. Por eso, la distancia se cuenta desde el centro de la ciudad, pero pasando por la terminal, pero sin considerar otro modo de transporte. En los casos del coche y del autobús se ha separado, por ser diferente el consumo por kilómetro, el recorrido interurbano del recorrido urbano.

Como centro de las ciudades se han considerado la Plaza de Colón en Madrid, la de Catalunya en Barcelona, la de Inglaterra en Sevilla y la Zorrilla en Valladolid, la de Zocodover en Toledo. Se han considerado los aeropuertos de Barajas, El Prat, Málaga y San Pablo, y las estaciones ferroviarias de Madrid Puerta de Atocha, Barcelona Sants, Sevilla Santa Justa, Valladolid-Campo Grande, Málaga-María Zambrano y Toledo. Como estaciones de autobuses se han considerado la de Avenida de América en Madrid para la ruta hacia Barcelona, y la Terminal Sur para la de Sevilla; la estación del Norte en Barcelona y las estaciones de autobuses de Toledo, Valladolid, Málaga y Sevilla.

En cuanto a los encaminamientos, se han considerado en el caso del ferrocarril convencional Madrid Barcelona la media entre las distancias por Lleida-Valls y por Lleida-Reus Tarragona (que eran las que empleaban los trenes de largo recorrido antes de circular por la línea de alta velocidad), y en el tren de alta velocidad, se ha considerado que en la ruta de Barcelona entra en Zaragoza pero no en Lleida. A Valladolid se ha considerado el encaminamiento por Ávila, y a Málaga por Linares-Córdoba. En el autobús, el viaje de Madrid a Barcelona se ha calculado entrando en la estación de Zaragoza, como de hecho hacen la mayor parte de los servicios de autobús. En coche entre Madrid y Sevilla se ha considerado la ruta recomendada por "Vía Michelin" (vía Mérida, 523 km) mientras que el autobús se ha considerado por Córdoba y entrado en esta ciudad. Para Toledo se ha considerado como ruta del coche particular la autopista de Peaje AP 41 y para el autobús la que realmente utiliza, que es la autovía A 42. En el avión, en fin, se han figurado tanto las distancias ortodrómicas como la distancia real que suelen recorrer los aviones en estas rutas (media entre los sentidos de ida y de vuelta).

Con respecto a las equivalencias energéticas empleadas, se basan en los datos de la generación eléctrica en España en el año 2006. Los aprovechamientos son los reales de los servicios ferroviarios y estimados de los servicios de carretera y avión.

### **Coche**

Seguidamente se estima el consumo de energía y las emisiones para cada uno de los modelos de coches empleados, tanto para la comparación de la transferencia modal como para el acceso a estaciones y aeropuertos.

Para el transporte en coche a larga distancia se han considerado todo tipos de vehículos: Uno de gasolina del segmento "berlina media" y uno de gasóleo del segmento "compacto"; para el caso de Madrid Toledo (en el que se supone mayor

sensibilidad al consumo por ser los viajeros más repetitivos) se han considerado dos coches de gasóleo: uno del segmento "utilitario" y otro del segmento "compacto". Para los accesos a la estación y al aeropuerto se ha considerado una berlina grande de gasóleo. Adviértase que se han empleado coches modernos (los que están a la venta a finales de 2007) y que, por lo tanto, el consumo del parque automovilístico existente es superior; sin embargo, estos coches se consideran más representativos del parque que existirá en los próximos años.

Se emplean los consumos homologados para los coches y las emisiones asociadas, si bien los consumos en la conducción real son superiores a estos valores. Como estos datos homologados no tienen en cuenta el consumo de energía para los servicios auxiliares (calefacción, aire acondicionado, iluminación, etc.), se ha sumado una cantidad fija de 0,4 l/100 en el caso del ciclo interurbano y de 0,8 l/100 en el ciclo urbano para ese concepto.

En cada caso se han calculado el consumo y emisiones del coche para el ciclo urbano y para el interurbano, así como para los ciclos "mixtos" de estación (100% urbano) y de aeropuerto (60% interurbano y 40% urbano, aunque en el análisis posterior se aplicará el dato real de cada aeropuerto).

AUTOMÓVILES EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS Y DATOS HOMOLOGADOS DE SU CONSUMO Y EMISIONES									
		Consumo interurbano (l / 100 km)	Consumo urbano (l / 100 km)	Consumo ciclo Estación (0-100%)	Consumo ciclo aerop. (60-40%)	Emisiones ciclo interurbano (gCO <sub>2</sub> /km)	Emisiones ciclo urbano MD (gCO <sub>2</sub> /km)	Emisiones ciclo estac. (CO <sub>2</sub> /km)	Emisiones ciclo aerop. (gCO <sub>2</sub> /km)
Renaul Clio	Diesel 1,5 dCi 85 CV	5,4	6			144	160		
Renault Megane	Diesel 1,5 dCi 105 CV	4,4	6			117	160		
Renaul Laguna	Gasolina 2,0	6,9	12,4			163	292		
Skoda Octavia	Diesel 1,9 TDi 105 CV	4,5	7,1	7,1	5,54	120	189	120	148
<i>Notas:</i>									
<i>Se ha añadido por Cons. aux interurbano (l / 100)</i>		0,4		<i>Cons. aux urbano (l / 100)</i>		0,8			
<i>FE diesel [(gr / km) / (l / 100 km)]</i>		26,67		<i>FE gasol. [(gr / km) / (l / 100 km)]</i>		23,57			

De acuerdo con estos consumos y emisiones, se calculan seguidamente los que corresponden al conjunto del recorrido en cada uno de las rutas y accesos analizados.

Se ha considerado un índice de ocupación de 1,5 personas por coche en los casos de larga distancia y de 1,6 en el caso de Madrid a Toledo, y de 2 viajeros en los accesos a estaciones y aeropuertos.

## REFERENCIAS

Andersson, E. y Lukaszewicz, P (2006): “*Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*”, Report KTH/AVE 2006:46, Estocolmo (Suecia), 2006,

García Álvarez, A. (2005): “*El tren de alta velocidad no es un depredador de energía*” (Dyna, 2005), edición actualizada en mayo de 2007

García Álvarez, A. (2007): “*Normalización de los consumos energéticos de los trenes de viajeros*”, ponencia presentada en el III Congreso de Innovación Ferroviaria (Tenerife, mayo de 2007)

García Álvarez, A. y Martín Cañizares, P. (2007): “*Ferrocarriles: más velocidad, menos consumo*”. Vía Libre, número 510, septiembre de 2007. Versión extendida “*Comparación del consumo de energía en línea de alta velocidad y convencional en los tramos de Lleida a Roda y de Córdoba a Antequera*” en [www.vialibre.org](http://www.vialibre.org).

Kemp, R (2004): “*Take the car and safe de planet. Thought trains were always greener than cars? Think again*”, IEE Power Engineer, october november 2004.

Pilo, E. (2006): Ponencia en “*Jornadas de Eficiencia energética en el ferrocarril*”, FFE marzo 2006