

EL TREN DE ALTA VELOCIDAD NO ES UN DEPREDADOR DE ENERGIA

No se puede afirmar, sin faltar a la verdad técnica, que el tren de alta velocidad sea un “depredador de energía”, como argumento para defender la mejora del ferrocarril convencional frente a la alternativa de la construcción de nuevas líneas de alta velocidad. En este artículo se trata de mostrar cómo el consumo energético del tren de alta velocidad no es muy diferente al del tren convencional mejorado, y además que la reducción diferencial de tiempo de viaje permite la captación de clientes de otros modos menos eficientes lo que produce una mejora global del sistema de transporte. Todo ello, después de dejar sentado que no hay verdades absolutas o de validez universal y que, por lo tanto, hay que analizar cada caso concreto.

Es frecuente, cuando se trata de decidir sobre la planificación de la expansión del ferrocarril, oír afirmaciones como éstas: “construir nuevas líneas de alta velocidad en lugar de mejorar el ferrocarril convencional, va contra la sostenibilidad energética y ambiental del transporte”, o “a partir de un cierto nivel no interesa aumentar la velocidad porque el consumo de electricidad crece en proporción al cuadrado de la misma”.

Pues bien, se espera mostrar en este artículo que:

- El consumo de energía del tren de alta velocidad no es muy diferente del consumo tren convencional; incluso puede ser menor.

- El aumento de la velocidad media del tren, en casi todos los casos, permite aumentar la competitividad del este modo de transporte, captado viajeros de otros modos menos eficientes y por ello, incrementando la eficiencia del sistema de transporte.

Alberto García Álvarez

Fundación de los Ferrocarriles Españoles
Ingeniero Industrial del ICAI, Doctor en
Ciencias Económicas y Empresariales,
Licenciado en Derecho



- Por las dos razones anteriores, en rutas de alta densidad de tráfico potencial, el tren de alta velocidad contribuye a aumentar la sostenibilidad del sistema de transporte más que el tren convencional mejorado.

Hay que afirmar, antes de seguir adelante, que ello no significa que se deba abandonar la red de ferrocarril convencional. Al contrario, la mejora de la red ferroviaria convencional, siendo siempre una necesidad para la eficiencia del sistema de transporte, es un instrumento imprescindible para complementar la nueva red de alta velocidad (ofrece mayor capilaridad y capacidad de conexión, libera capacidad para trenes de mercancías, etc.). Incluso para aumentar la sostenibilidad energética debería replantarse la conveniencia de volver a dar uso a ciertos corredores abandonados por el ferrocarril. Lo que se postula en este artículo es que la decisión entre una u otra opción (cuando sean excluyentes) no puede hacerse por con-

sideraciones energéticas como las citadas; o, al menos, no puede hacerse de forma generalizada.

Una primera aproximación con datos

Para disponer de una primera aproximación al tema veremos algunas ratios que se pueden calcular de forma muy simple a partir de documentos publicados (1).

Así, para el año 2002 y en Renfe, si se compara el tráfico (medido en viajeros.km) de cada tipo de tren de viajeros, con la energía consumida (empleando la equivalencia de 1 litro de gasóleo =10 kWh), nos encontramos con que se precisan, por término medio 101 Wh para transportar un viajero a lo largo de un kilómetro. Primera sorpresa: Los trenes gestionados por la Unidad de Negocio de Alta Velocidad (AVE y Talgo 200) con una velocidad media 159,99 km/h, consumen 73,39 Wh/v.km, es decir, menos que la media. Y, en contra de lo que

Trenes	Veloc. media (km/h)	GWh equivalentes	Wh / v-km	kWh / p-km	kWh / t-km
Cercanías	53,29	1.013	130,33	349,31	224,70
Regionales	71,21	240	93,04	261,79	188,73
GL	89,29	572	82,25	118,22	158,12
AVE	159,99	160	73,39	110,90	146,23
Total / media	69,07	1.984	101,87	220,60	221,71

Tabla 1. Comparación de consumos específicos de diversos tipos de trenes y relación con sus velocidades medias

FUENTE: Elaboración propia sobre datos de la Memoria medioambiental de Renfe 2003 e Informe anual Renfe 2002.

podiera pensarse *a priori*, estos trenes (que son los más rápidos) son justamente los que menos consumen por viajero-km transportado, muy por debajo del consumo de 130,33 Wh/vkm de Cercanías (a 53,29 km/h), de 93,04 Wh/vkm de Regionales (a 71,21 km/h) y de 82,25 Wh/v.km de Grandes Líneas (a 89,29 km/h). Y los trenes de alta velocidad son los que menos energía consumen, tanto si la comparación se realiza (como hemos hecho) por viajero kilómetro (V-km), como si se hace por plaza kilómetro (p-km) o si se analiza por tonelada-kilómetro (t-km).

Si se compara el consumo medio por tren kilómetro (19 kWh/km) de un tren de Cercanías formado por dos unidades 447 que pesa 320 t y que circula a una velocidad media de 53 km/h, con el consumo medio del AVE que pesa 393 t (15,59 kWh/tren.km) se observa que al AVE, aún pesando más y circulando tres veces más rápido, consume menos que un tren de Cercanías.

Si se prefiere establecer una comparación entre trenes con un servicio más homogéneo y con características técnicas casi iguales, se puede comparar el AVE en la línea de Madrid a Sevilla con los trenes *Euromed* en el corredor Mediterráneo (con la misma masa, pero con una velocidad media de 196 km/h los primeros y de 128 km/h los segundos). Se observa entonces que el consumo de los AVE es de 15,59 kWh/km, frente a 11,46 de los *Euromed*; es decir una velocidad media un 53% superior sólo supone un consumo un 36% más elevado.



1.- Tren Arco en el Corredor Mediterráneo (Foto: J.M.Luna /Vía Libre)

	Tren Línea Trayecto	Arco 7 C	Talgo 350	Diferencia	
		Corr.Med. Alc-Bcn(red)	LAV 2 Mad-Lle.	Abso.	Relativ.
Consumo de energía					
	Ud.				
Energía en llantas resistencia mecánica	kWh	451	346	-104	0,77
Energía en llantas resistencia mecánica curvas	kWh	80	23	-56	0,29
Energía en llantas resistencia entrada aire	kWh	372	634	262	1,70
Energía en llantas resistencia aerodinámica	kWh	1.993	3.515	1.522	1,76
Energía en llantas resistencia aerodinámica desv.tip.veloc.	kWh	208	62	-146	0,30
Energía en llantas resistencia aerodinámica túneles	kWh	54	298	244	5,50
Energía auxiliares	kWh	1.203	855	-348	0,71
Energía disipada en frenados de deceleración	kWh	2.971	1.073	-1.898	0,36
Energía disipada en frenado deceleración bajadas	kWh	396	365	-31	0,92
TOTAL ENERGÍA EN LLANTAS	kWh	7.728	7.172	-556	0,93
Pérdidas en la máquina					
Pérdidas en catenaria	kWh	1.258	1.072	-186	0,85
Pérdidas en catenaria	kWh	781	526	-255	0,67
Pérdidas en subestaciones	kWh	407	179	-228	0,44
Pérdidas en la red	kWh	315	136	-178	0,43
TOTAL ENERGÍA EN BARRAS DE LA CENTRAL	kWh	10.489	9.085	-1.405	0,87
Energía del freno regenerativo aprovechada otros trenes					
Energía del freno regenerativo aprovechada otros trenes	kWh	-1.077	-460		
Energía del freno regenerativo devuelta a la red	kWh	0	-690		
Total aprovechamiento freno regenerativo	kWh	-1.077	-1.150		
TOTAL ENERGÍA NETA EN BARRAS CENTRAL	kWh	9.412	7.934	-1.477	0,84

FUENTE: Elaboración propia sobre datos tren Talgo serie 102 entre Madrid y Lleida (LAV1) y tren Arco de 252+7 coches entre Alicante y Barcelona.

Tabla 2. Desglose comparado del consumo de energía de un tren de alta velocidad y de un tren convencional mejorado

Cierto es que estos datos son medios, y, en cada caso, los resultados se ven afectados por numerosos fac-

menos, poner en cuarentena las afirmaciones "populares" recogidas al comienzo del artículo y entrar en una

El tren en alta velocidad no tiene un consumo muy diferente (frecuentemente es menor) que el tren rápido en líneas convencionales mejoradas.

tores tales como las paradas, índices de utilización de los trenes, limitaciones de velocidad, etc.. Aún así, parecen ser suficientes como para, al

reflexión más técnica cualitativa (aunque apoyada en un ejemplo numérico).

Mejora del tren convencional vs. tren de alta velocidad

Como hemos expuesto, el debate más frecuente se concreta en la alternativa de mejorar las líneas existentes para velocidades del orden de 200-220 km/h, o construir nuevas líneas de alta velocidad para 300 km/h o más. Por ello, se hará una exposición de cada uno de los factores que inciden en la diferencia de consumo energético en uno y otro caso.

Para que la comparación resulte más comprensible, se acompaña con datos numéricos de un caso ejemplo real en el que se comparan los con-

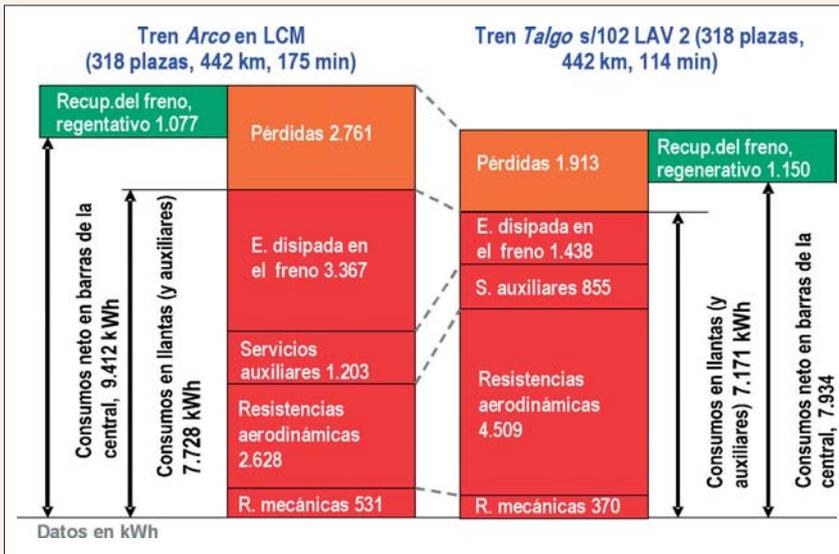


Figura 1. Desglose y comparación del consumo de energía de un tren convencional en línea mejorada y otro de alta velocidad.

FUENTE: Elaboración propia sobre datos de tren Arco de 252+7 coches entre Alicante y Barcelona (Corredor Mediterráneo) y tren Talgo serie 102 entre Madrid y Lleida (LAV1)

sumos de trenes y líneas representativos de los casos que se desea contraponer. Así, la referencia será un tren a 200 km/h sobre una línea clásica mejorada (en concreto se ha tomado la línea de Alicante a Barcelona del Corredor Mediterráneo), estando el tren formado por una locomotora eléctrica de la serie 252 y 7 coches tipo Arco. Como alternativa, se toma la ruta de Madrid a Lleida en la línea de alta velocidad pasando por Zaragoza y con un tren Talgo de alta velocidad (popularmente llamado Pato, serie 102 de Renfe).

Para homogenizar la comparación, se supone que en ambos casos los trenes tienen tres paradas comerciales en su recorrido. Para la línea de Madrid a Lleida se ha tomado la distancia real (442 km) y para la línea

de Alicante a Barcelona se ha considerado la misma distancia (como la distancia real de Alicante a Barcelona es de 523 km se “encoge” la línea

rencias que existen entre ellos son representativas de las que hay entre los trenes de altas prestaciones y los de alta velocidad.

En estas condiciones, el tren convencional mejorado (lo llamaremos Arco LCM en sucesivo) tarda 175 minutos (sin márgenes y sin contar los tiempos de parada) en recorrer los 442 en su línea, a una velocidad me-

Aunque la velocidad hace aumentar el consumo por la resistencia aerodinámica, se reduce la energía disipada en el freno y la requerida por los servicios auxiliares

hasta alcanzar la longitud virtual deseada, pero se mantiene el perfil medio de rasantes, de curvas y de velocidades autorizadas).

Los trenes que se emplean para la comparación son, en fin, de capacidad y confort semejantes y las dife-

dia de 151 km/h. El tren de alta velocidad (lo llamaremos Pato LAV en adelante) que circula a una máxima de 300 km/h, tarda 114 minutos en cubrir la misma distancia (es decir, su velocidad media es de 232 km/h).

El consumo de energía del tren Arco LCM en 442 km es de 7.728 kWh (en llantas) que se convierten en 9.412 kWh en la salida de la central generadora de electricidad (sumando pérdidas y restando el aprovechamiento del freno regenerativo). El consumo del Pato en la LAV (a 300 km/h) con la misma distancia recorrida (442 km) en la salida de la central es de 7.934 kWh, es decir, un 16% menos que el del Arco a 200 km/h.

Nos encontramos ante una paradoja, pues el saber popular nos dice que “como el consumo de energía aumenta con el cuadrado de la velocidad”, este consumo debería haberse multiplicado por 2,25 (ya que la velocidad máxima se ha multiplicado por 1,5), y resulta que, no sólo no se



2.- Tren Talgo serie 102 (Pato) en la línea de alta velocidad de Madrid a Lleida (Foto Miguel Ángel Patier /Renfe)

La electrificación en 25 kV en alterna, empleada en alta velocidad, supone menores pérdidas y la posibilidad de devolver a la red la energía generada en el frenado

ha duplicado, sino que se ha reducido.

Lo cierto es que una parte del consumo es proporcional al cuadrado de la velocidad, otra parte a la velocidad, algunos consumos son independientes de la velocidad y los hay que hasta disminuyen al crecer la velocidad. Por otra parte, el peso relativo de los consumos varía fuertemente con el perfil de la línea, y sobre todo, con el perfil de velocidades máximas. Finalmente, las características del material rodante inciden fuertemente en el consumo (2).

Lo primero que podemos observar si se compara el desglose detallado de los consumos es que los que se relacionan con la velocidad (que son los debidos a la resistencia aerodinámica a cielo abierto y en túnel y resistencia a la entrada de aire) efectivamente son mayores en el "Pato LAV", en concreto en un 71% (+1.881 kWh).

Los consumos derivados de resistencias mecánicas son menores en el Pato LAV por efecto del menor número de curvas (y por ser éstas de mayor radio) y de tener el tren menor masa. En el caso ejemplo, la disminución del consumo por la menor resistencia mecánica es de 161 kWh (-30,5%).

El consumo de los servicios auxiliares (aire acondicionado, iluminación, ventilación, etc) no se incrementa con la velocidad; sino, al revés, se reduce al aumentar la velocidad media, pues estos consumos se producen por tiempo. En el caso ejemplo, al reducirse el tiempo de viaje un 35 % el consumo de estos servicios disminuye un 29 %, reduciéndose en 348 kWh. La diferencia de porcentaje obedece a que el

consumo por hora en el Pato es mayor, pues su potencia es más elevada y la energía necesaria para la ventilación de los motores es mayor.

La reducción más importante, sin embargo, se produce por el hecho de que las líneas de alta velocidad requieren un trazado más recto y el número de puntos en que se reduce la velocidad es menor, por lo que tren disipa menos energía al frenar para cumplimentar estas restricciones. En el caso, pese a que los dos trenes tienen las mismas paradas comerciales, el menor consumo por este concepto del Pato LAV frente al Arco LCM es de 1.898 kWh (-64%), de los que 261 son imputables a la menor masa (tanto masas en translación como masas rotativas), y el resto a un perfil más homogéneo de velocidades. En concreto, en este caso el sumatorio de las semidiferencias de los cuadrados de velocidades en los escalones decrecientes es de 0,014 kWh/t.km en la LCM y de 0,004 kWh/t-km en la LAV 2.

En lo que se refiere a la energía disipada por el freno en la bajadas, la cantidad es prácticamente la misma, pues aunque en la línea de alta velocidad hay mayores pendientes (-25

mm/m frente a -20 mm/m), las velocidades autorizadas son mucho mayores en las pendientes de alta velocidad, lo que obliga a usar menos el freno para retener el tren, por lo que la energía disipada en el freno es prácticamente la misma (-31 kWh).

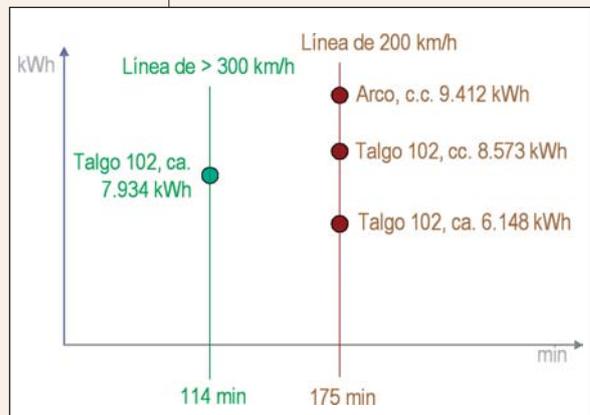
Todo ello hace que el consumo en llantas del Pato LAV sea inferior al Arco LCM (-556 kWh en este caso), pero la diferencia se hace mayor aún en barras la central de generación de electricidad por tres razones:

- Las pérdidas óhmicas y de transformación son mayores en el Arco LCM, tanto en valor absoluto (por el mayor el consumo en llantas) como relativo (el rendimiento del tren es algo menor).

- Las pérdidas entre la central generadora de energía eléctrica y el pantógrafo, son menores en el Pato LAV, pues el tren de alta velocidad funciona a 25 kV y el Arco a 3 kV.

- El freno regenerativo puede devolver en alta velocidad la energía a la red pública, lo que no ocurre en las líneas convencionales electrificadas en corriente continua en las que la energía que no es aprovechada por otro tren, tiene que disiparse en resistencias (freno reostático) pues no puede ser devuelta a la red. En las líneas electrificadas en alterna (caso de las de alta velocidad) la energía no aprovechada en los servicios auxiliares del propio tren o en otros trenes es devuelta a la red pública, donde es empleada por otros consumidores.

Figura 2. Incidencia en el consumo del tipo de línea, del material empleado y del sistema de electrificación
FUENTE: Elaboración propia sobre datos tren Talgo serie 102 entre Madrid y Lleida (LAV1) y tren Arco de 252+7 coches entre Alicante y Barcelona.



² Cierto es, sin embargo, que la potencia que se precisa instalar en las subestaciones sí que aumenta de forma importante, pues las puntas de demanda son más altas, si bien el consumo de energía no se incrementa en proporción a las puntas.

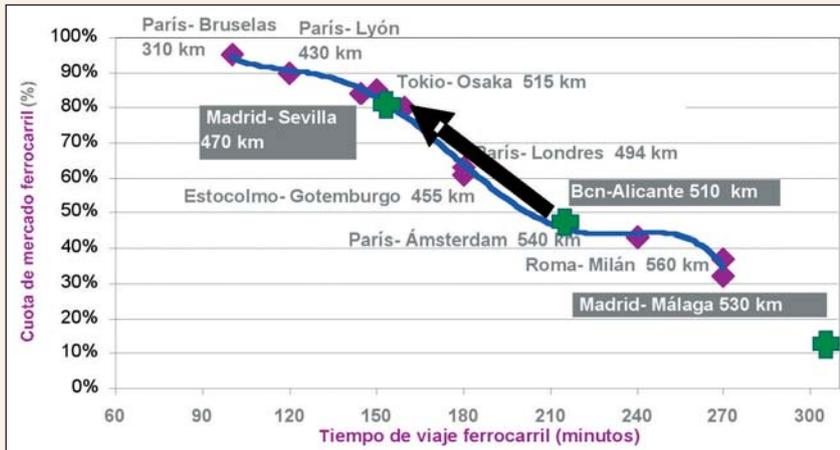


Figura 3. Reparto modal tren-avión en función del tiempo de viaje del tren e incidencia de la alta velocidad vs. ferrocarril convencional mejorado
FUENTE: García Álvarez, A., 2004, y López Pita, A., 2001.

La principal conclusión que puede deducirse del razonamiento y del caso ejemplo presentado es que el consumo de energía de un tren de alta velocidad en una línea de muy alta velocidad no es necesariamente mayor (incluso puede ser menor) que el de un tren a una velocidad alta (200 km/h) en una línea convencional mejorada. Desde luego, el diferencial absoluto y relativo y su signo dependen de muy numerosos factores, por lo que no es posible establecer a priori una afirmación rotunda. Tan sólo se puede afirmar con cierta certeza que el consumo no es muy diferente.

Como puede desprenderse del razonamiento expuesto, en el diferencial del consumo intervienen diversos factores tales como el diferente perfil de velocidades de la línea, las diferencias de masa y aerodinámica entre los trenes de alta velocidad y los convencionales, los diferentes sistemas de electrificación, etc. Por ofrecer una idea de la incidencia de cada uno de estos factores, puede decirse que en el caso ejemplo, la diferencia total del consumo en barras de la central puede descomponerse así:

- Efecto de la menor masa y mejor aerodinámica del tren: -839 kWh.
- Efecto de la velocidad: +1.786 kWh.
- Efecto de la diferente tensión de electrificación y regeneración: -2.425 kWh.

Debe observarse que no se ha considerado en las cifras anteriores el

efecto sobre el consumo del hecho de que una línea para 300 km/h tendrá normalmente una longitud menor que una línea para 200 km/h entre los mismos puntos. Esta diferencia de longitud puede evaluarse entre el 2,5 y el 10% o incluso más, por lo que cabe esperar una reducción adicional del consumo (a igualdad de los demás factores) de la misma proporción. Así, por ejemplo, la distancia por la línea de alta velocidad frente a la convencional entre Córdoba y Sevilla es menor en un 2,3%, entre Madrid y Ciudad Real en un 2,8%, entre Madrid-Atocha y Zaragoza Delicias un 8,9%; entre Madrid y Valladolid (por Segovia) en un 23%.

Contribución de la alta velocidad a la eficiencia energética del sistema de transporte

Ya se ha demostrado que el ferrocarril de alta velocidad no es, en absoluto, un "depredador de energía" en comparación con el ferrocarril convencional mejorado: no consume, para el mismo transporte, una cantidad significativamente mayor de energía.



3.- Tren AVE en las proximidades de Zaragoza (Foto: Juan Miguel Sastre)

Pero es que, además, hay dos razones adicionales para afirmar que la construcción de una línea de alta velocidad, en lugar de la mejora de una línea existente, contribuye (siempre que haya suficiente densidad de tráfico) a mejorar la eficiencia energética del sistema de transporte:

Por una parte, el tiempo de viaje es menor, por lo que se producirá una transferencia de otros modos de transporte menos eficientes (por ejemplo del avión) hacia el tren de alta velocidad, transferencia que se producirá en menor proporción que al tren de velocidad alta.

Además, puede comprobarse fácilmente que los costes de explotación del tren de alta velocidad son, en general, menores que los del tren de velocidad alta, (básicamente por la menor necesidad de recursos que se consumen por tiempo, especialmente material rodante y personal operativo). Por ello, el coste es menor y el precio del billete puede también ser menor, por lo que se produce una transferencia adicional de tráfico desde el avión y desde el coche particular. Lógicamente esta transferencia no se produce si el operador decide retener el diferencial de coste para mejorar su margen.

Aunque no es el objeto primordial de este artículo, se pueden aplicar datos del ejemplo para ilustrar estos importantes efectos colaterales sobre la eficiencia del sistema de transporte:

Si imaginamos una ruta de 523 km (como la de Alicante a Barcelona) en la que hay suficiente densidad de tráfico y aeropuertos en ambos extremos, podemos comparar los tiempos de viaje en tres escenarios (siempre con tres paradas de dos minutos cada una y un margen de tiempo del 5% sobre el tiempo mínimo):

- Ferrocarril convencional a velocidades máximas de 160 km/h: 335 min (5h 35 min).

- Ferrocarril convencional mejorado, con trazado de línea para 200 km/h (como el de Alicante a Barcelona) y con tren apto para tal velocidad: 223 min (3 h 42 min).

- Ferrocarril de alta velocidad (con un trazado como el de Madrid a Lleida) y tren para 300 km/h: 147 min (2 h 27 min).

Pues bien, si se suponen estos tiempos de viaje sobre la curva que representa la participación modal tren-avión en las principales rutas europeas, puede observarse que pasar de la línea sin mejorar a la línea mejorada ya permite al tren acceder a cuotas de mercado próximas a la mitad



4.- Locomotora eléctrica serie 252 en la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona (Foto: Jesús Ugena)

tardan 147 minutos (y si la rotación mínima es de 45 minutos y la frecuencia de 30 minutos), hacen falta 14 trenes en línea para hacer el servicio. Si el tiempo de viaje es el que corresponde a la velocidad máxima de

xiliares (por el menor tiempo de viaje) y disipará menos energía en el frenado en los puntos de reducción de velocidad y en las pendientes.

- Además, en el tren de alta velocidad se producen menos consumos adicionales por cuanto los trenes de alta velocidad suelen tener menos masa por plaza y mejores condiciones aerodinámicas, y las líneas de alta velocidad suelen estar electrificadas en alterna (los que significa menores pérdidas y también la posibilidad de devolver energía a la red).

- Adicionalmente, las líneas de alta velocidad tienen un trazado más recto, lo que supone reducciones del recorrido de entre el 3 y el 10% entre los mismos puntos y menor resistencia al avance en las curvas.

- Por otra parte, el menor tiempo de viaje de un tren a alta velocidad frente a un tren convencional mejorado supone que el tren puede captar un porcentaje importante de viajeros del avión, lo que produce un reparto modal más eficiente energéticamente.

Las líneas de alta velocidad son entre y 3 y un 10% más cortas que las líneas convencionales, lo que representa una reducción equivalente del gasto energético

del total tren+avión. De hecho, en la ruta Barcelona Alicante es del 50 % (del 9/02 al 8/03).

Sin embargo, una mayor reducción del tiempo de viaje permite a la cuota "trepar" por la parte más elástica de respecto al tiempo y puede suponer que, con un tiempo de viaje de unos 150 min, la cuota del tren se sitúe en el 85% frente al avión (más semejante a la de Madrid a Sevilla o a la de Tokio a Osaka, con distancias semejantes). El tren puede, por lo tanto, arrebatar al avión casi 2/3 de sus viajeros actuales sólo por la reducción adicional del tiempo de viaje que supone pasar a la alta velocidad. Este trasvase de tráfico supone una reducción del consumo de energía del sistema de transporte en su conjunto, pues el consumo unitario del tren de alta velocidad es muy inferior al del avión.

En lo que se refiere a la reducción de costes que aporta la alta velocidad, baste apuntar que en una ruta de los 523 km analizados, si los trenes

200 km/h (223 minutos) y con la misma rotación y frecuencia, el número de trenes se eleva a 18 (un 28% más), mientras que no hay motivos para pensar que el precio de cada tren (para una tecnología semejante, la misma fecha de compra y de idéntica capacidad) suba más allá de un 7-8% por la mayor potencia necesaria.

Resumen

En síntesis puede concluirse lo siguiente:

- No se puede afirmar que el consumo de energía del tren de alta velocidad (a 300 km/h) sea esencialmente diferente del tren convencional mejorado (circulando a velocidades máximas del orden de 200 km/h), siempre para características homogéneas del servicio.

- El tren de alta velocidad frente al convencional mejorado tenderá a tener un mayor consumo para vencer la resistencia aerodinámica, pero consumirá menos para servicios au-

REFERENCIAS:

(1) "Memoria Medioambiental de Renfe 2003", "Informe anual de Renfe 2002".

(2) Un análisis detallado de las fuerzas que inciden en el movimiento del tren y de sus variaciones puede verse en: **García Álvarez, A.**, "Dinámica de los trenes en alta velocidad".

(3) La descripción de la incidencia del tiempo de viaje en el reparto modal tren avión puede verse en **García Álvarez, A.** (2004) "Explotación económica y regulación de transporte" y en **López Pita, A.** (2001) "El ferrocarril y el avión en el sistema de transporte europeo", ediciones UPC. ■