

Determinación de la velocidad óptima de los trenes de muy alta velocidad para minimizar las emisiones de dióxido de carbono en un corredor

M^a del Pilar Martín Cañizares
pilarmartin@ffe.es
Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Resumen: A medida que aumenta la velocidad del tren, éste capta viajeros del avión (una reducción del tiempo de viaje de diez minutos supone un incremento de la cuota de mercado del tren entre el 2 % y 5%), y como el consumo de energía y emisiones del avión son muy superiores a los del tren de alta velocidad, el efecto neto en el corredor resulta positivo. En este artículo se establece una metodología para determinar la velocidad del tren en la que se minimizan las emisiones del corredor (entendiendo por tal la suma de tren y avión).

La metodología propuesta se aplica a modo de ejemplo a la ruta Madrid-Barcelona resultando que las velocidades que minimizarían las emisiones en el corredor, se encuentran aproximadamente entre 350 y 400 kilómetros por hora.

Palabras clave: emisiones, cuota de mercado, competencia modal, alta velocidad.

Introducción

El incremento de la velocidad máxima de circulación en líneas de alta velocidad es un tema que genera siempre gran controversia. Son muchos los detractores del incremento, que aducen como razones principales para no hacerlo el presunto incremento del coste de mantenimiento, tanto de la infraestructura como del material móvil, y el mayor consumo de energía.

Los costes de mantenimiento han sido abordados por diversos autores por lo que este artículo se centra en el consumo de energía y emisiones. De los trabajos sobre mantenimiento existentes merecen destacarse Minayo y García (2009) sobre los costes de explotación, que concluyen que éstos decrecen con el incremento de la velocidad y UIC (2010) sobre mantenimiento de líneas el que no se muestre una relación.

Sin duda las críticas más fuertes al ferrocarril de alta velocidad han sido las llevadas a cabo por los colectivos ecologistas que llegan a recomendar el ferrocarril convencional frente al de alta velocidad (Ecoloxistes n'alción - Asturias, 2010) y a subrayar entre sus desventajas que supone un gran aumento del gasto energético para una escasa reducción del tiempo de viaje

empleado (Greenpeace, 2009) y la alta dependencia de fuentes fósiles para la generación de energía eléctrica.

Uno de los primeros trabajos exhaustivos sobre el consumo de energía del tren de alta velocidad frente al convencional es el de Anderson, E. y Lukaszewicz, P. (2006) que determina el consumo de energía y las emisiones, de trenes autopropulsados en Suecia, Dinamarca y Noruega cuya velocidad máxima es de 200 km/h y los compara con los de un tren remolcado más antiguo.

El Grupo de Estudios e Investigación de energía y emisiones en el transporte de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles ha elaborado diversos trabajos sobre el consumo de energía y las emisiones tanto del ferrocarril convencional como de alta velocidad y en comparación con otros modos de transporte.

García Álvarez (2005) muestra que el consumo energético del tren de alta velocidad no es muy diferente al del tren convencional mejorado, incluso suele ser menor.

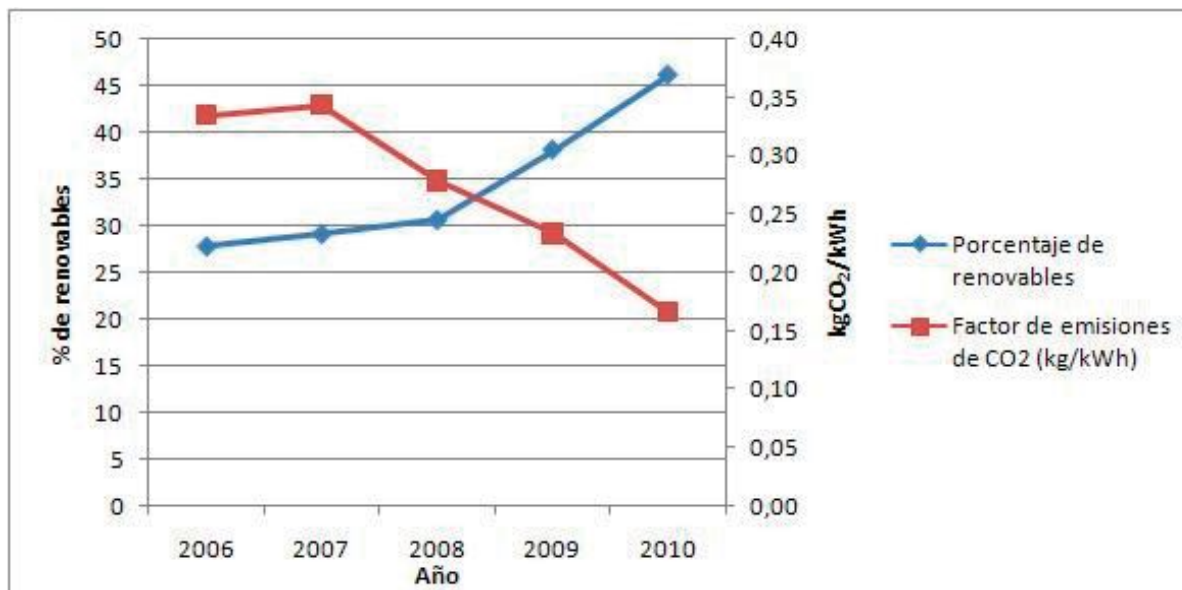
García Álvarez y Martín Cañizares (2007) comparan el consumo de energía de un mismo tren por línea convencional y alta velocidad y concluyen que el consumo de energía es inferior en la línea de alta velocidad en los casos analizados.

En García Álvarez (2007) se comparan las emisiones del tren de alta velocidad con las de otros modos de transporte resultando que en siete de las diez rutas analizadas el tren de alta velocidad es el modo que menos emisiones produce, y en las otras tres rutas es el convencional. Por término medio, las emisiones del tren convencional son superiores en un 40% a las del tren de alta velocidad.

García Álvarez (2009) en una recopilación y ampliación de todos los trabajos realizados por el autor sobre consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en el que, entre otras ideas, evalúa el efecto de la velocidad *ceteris paribus*.

Uno de los últimos trabajos publicados sobre la materia por el Grupo de investigación es "High speed, energy consumption and emissions" (GEI, 2010) que fue elaborado por encargo de la Unión Internacional de Ferrocarriles y en el que se estudia el consumo de energía y las emisiones del tren de alta velocidad.

Respecto a la dependencia de fuentes fósiles para la generación de energía eléctrica, los datos de España del Observatorio de la Electricidad de WWF-Adena demuestran que cada vez es mayor la proporción de energías renovables en el mix de generación, al mismo tiempo que la tendencia de las emisiones de dióxido de carbono es decreciente. Incluso en algunos países toda la energía proviene de fuentes renovables, como en el caso de Suecia o en un alto porcentaje como Austria con más de un 95% de renovables.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de WWF-Adema (2006-2010)

Figura 1. Evolución del porcentaje de energía renovable en la generación de electricidad y del factor de emisiones en el sistema eléctrico peninsular

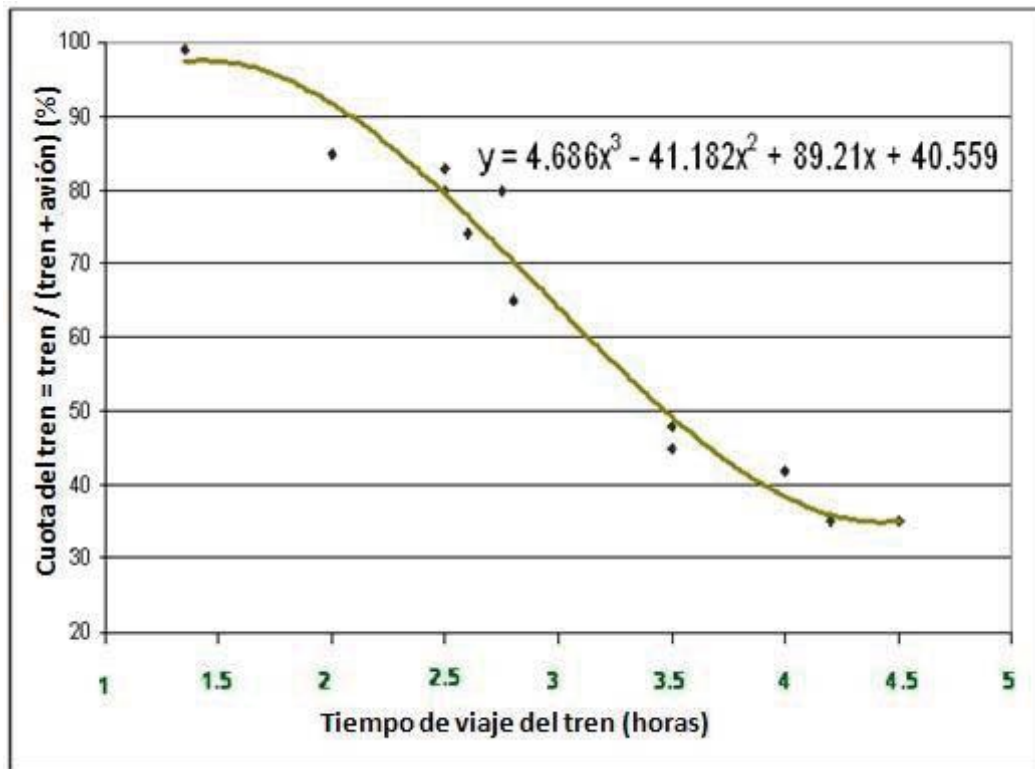
En este artículo se expone cómo el incremento de la velocidad máxima de circulación (y consecuentemente de la media) del tren de alta velocidad supone la captación de viajeros de otros modos de transporte más contaminantes y se señala la idoneidad de evaluar el consumo de energía y las emisiones de un corredor en su conjunto y no de los diferentes modos de transporte de manera aislada.

Se presenta la relación entre tiempo de viaje y cuota de mercado del ferrocarril frente al avión. Posteriormente se discute el consumo de energía del tren de alta velocidad en función de la velocidad, se presenta un modelo para calcular la velocidad óptima del tren en un corredor (desde el punto de vista del consumo de energía), se aplica el modelo al caso español de la línea Madrid-Barcelona y finalmente se muestran las conclusiones.

Velocidad y cuota de mercado

En los corredores en los que coexisten el ferrocarril y la aviación se ha constatado la existencia de una relación entre la cuota de mercado del ferrocarril y el tiempo de viaje de éste.

García Álvarez (2008) muestra gráficamente, a partir de datos de casos reales tanto de España como internacionales, cómo 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, las cuotas están por debajo del 50%.



Fuente: García Álvarez, A. (2008)

Figura 2. Relación entre la cuota del tren en el mercado tren+avión y el tiempo de viaje en las principales rutas mundiales y españolas entre 400 y 600 km

Sobre los puntos que corresponden a cada uno de los casos el autor traza una línea de ajuste polinómica de orden tres cuya ecuación es:

$$TS(t) = 4,686 \times t^3 - 41,182 \times t^2 + 89 \times t + 40,5 \quad [1]$$

que permite estimar la cuota de mercado del tren en una ruta en función de su propio tiempo de viaje.

La curva presenta tres tramos, dos extremos de pendiente baja y uno intermedio 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% en los tramos extremos y del 5% en el tramo central. Del mismo modo, un aumento de la velocidad máxima de 10 km/h supone un incremento de la cuota de viajeros en torno al 0,5% en los extremos y de hasta un 4% en el tramo central.

López Pita (2008) afirma la existencia de esta curva de tendencia general, concluyendo que es análoga para relaciones nacionales e internacionales, pero plantea 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 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 temporalmente por trenes de ancho variable. Mientras el tiempo de viaje se mantuvo alrededor

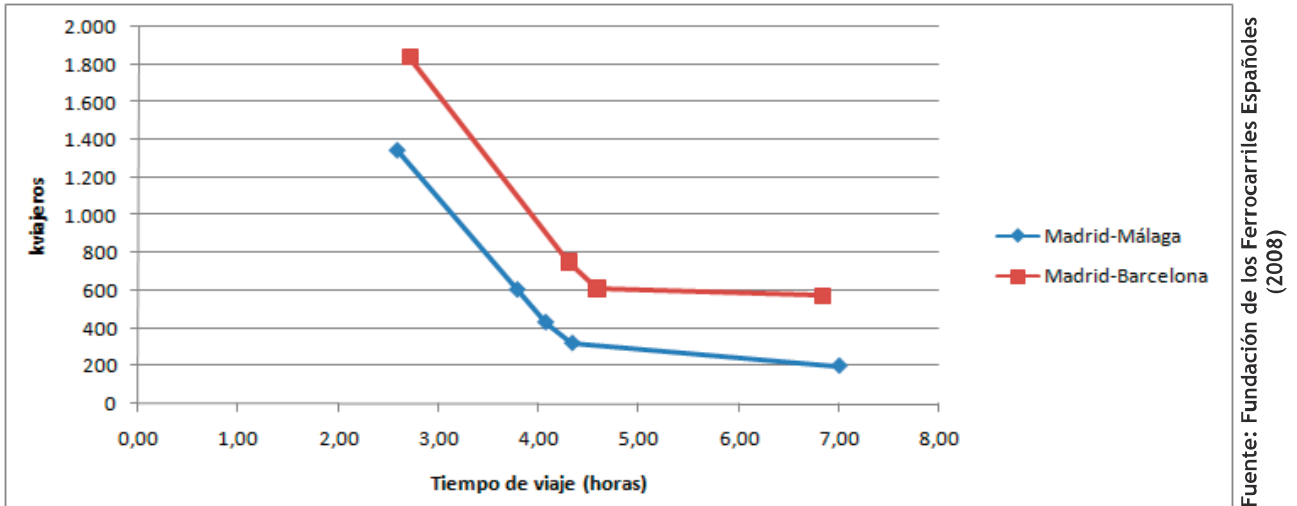


Figura 3. Evolución del número de viajeros y del tiempo de viaje de Madrid a Málaga y Barcelona con y sin alta velocidad

Consumo del tren de alta velocidad en función de la velocidad

Es evidente que al aumentar la velocidad máxima de circulación de un tren (a igualdad de otros factores) se incrementa también su consumo de energía. A modo de ejemplo 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 la energía importada en pantógrafo y el consumo neto, una vez descontada la energía regenerada.

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.

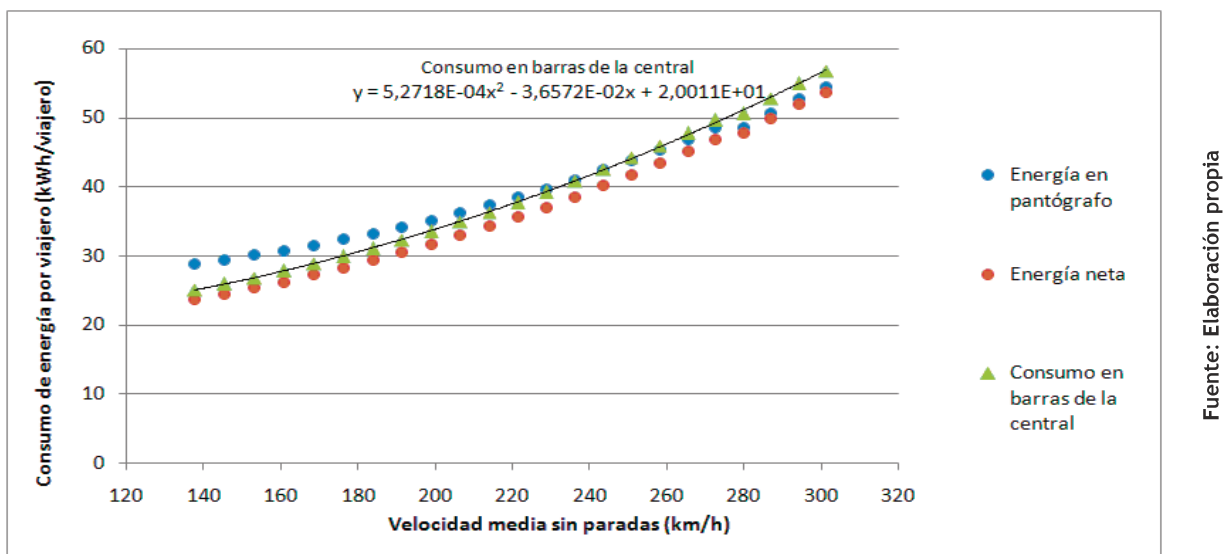


Figura 4. Consumo de energía importada y neta en pantógrafo en función de la velocidad media del tren en la línea Madrid-Barcelona

Existe un caso en el que el incremento de la velocidad no supone un aumento del consumo de energía y es cuando, como demuestra González Franco y García Álvarez (2010), dicho incremento de velocidad se efectúa exclusivamente en pendientes (bajadas). Ello es consecuencia directa del menor uso del freno y, ya que la energía que se disipa en el freno se pierde, un menor uso del freno supone menor pérdida de energía, y por tanto menor necesidad de importarla. Obviamente este resultado se ve afectado si se puede aprovechar la energía del freno regenerativo.

Modelo para la determinación de la velocidad óptima

Como se ha expuesto anteriormente en [1], la cuota del tren, en corredores en los que coexiste con el avión, se puede expresar en función del tiempo de viaje.

Si asumimos que el tiempo de viaje (t_t , en horas) es la distancia recorrida por el tren (l_t , en kilómetros) dividida por la velocidad media (v_t , en km/h) y siendo P el número anual de viajeros (suma del tren y el avión), el número anual de viajeros del tren se puede calcular como:

$$V_t = P/100 \times (4,686 \times v_t^3/l_t^3 - 41,182 \times v_t^2/l_t^2 + 89 \times v_t/l_t + 40,5) [2]$$

Para poder hacer homogéneo el cálculo, el consumo de energía del tren eléctrico se debe estimar en barras de la central de generación y el del avión en boca de depósito.

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 en barras de la central por viajero con la velocidad media del tren.

El consumo del tren de alta velocidad, medido en barras de la central generadora, es:

$$C_t [kWh] = 5,2718 \times 10^{-4} \times v_t^2 - 3,6572 \times 10^{-2} \times v_t + 2,0011 \times 10^1 [3]$$

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 es:

$$C_a [kWh] = 39,599 \times l_a + 4750,4/plazas_a + aprov_a [4]$$

El factor de emisiones del tren de alta velocidad (E_t) es diferente para cada país y varía de año en año debido a los cambios en el mix de generación de energía eléctrica. Sin embargo, el factor de emisiones del queroseno (E_a) es constante, siendo de 3,15764 kilos de CO₂ por litro de queroseno. Con estos datos las emisiones en el corredor se pueden calcular como:

$$Emisiones_{t+a} [kg] = P \times ((100 - TS/100) \times C_a \times E_a + (TS/100) \times C_t \times E_t [5]$$

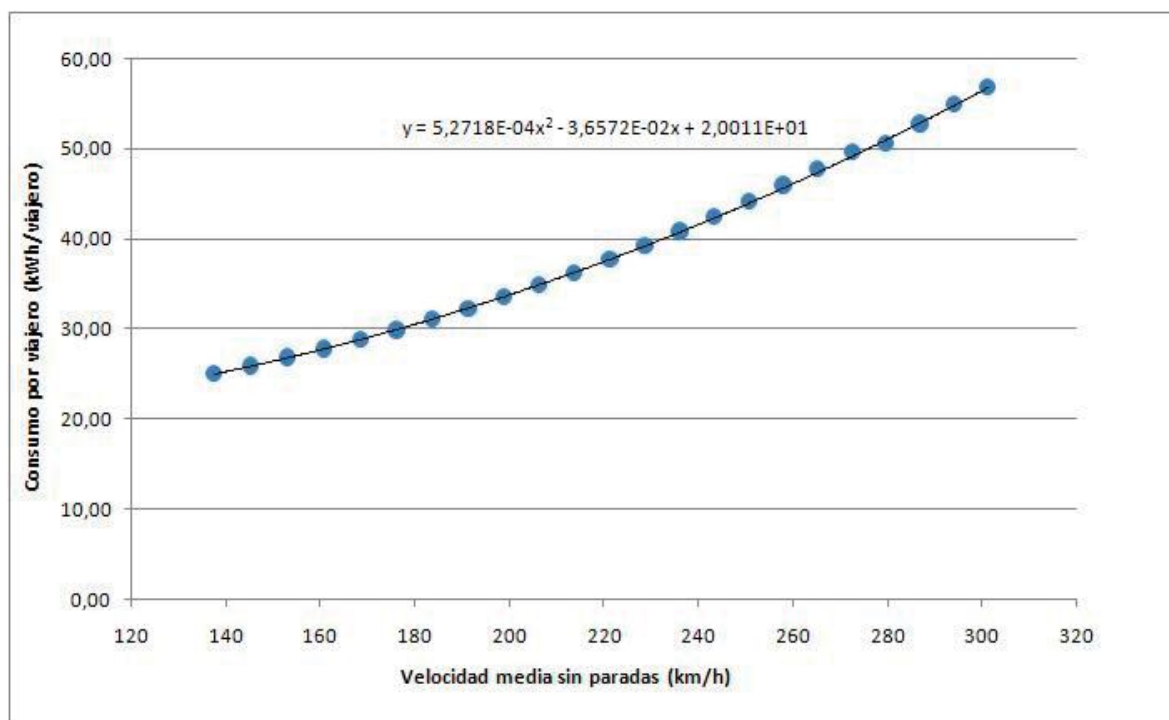


Figura 5. Consumo de barras de la central por viajero en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

Sustituyendo en [5] las expresiones cuota del tren (TS), consumo del avión (Ca), emisiones del avión (Ea), consumo del tren (Ct) y emisiones del tren (Et), 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 E_{t+a} .

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 sin paradas es de dos horas y 43 minutos.

Se considera un tren de alta velocidad de la serie 102, de 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, la velocidad máxima.

La velocidad óptima del tren en un corredor, desde el punto de vista de la minimización de emisiones, se puede visualizar gráficamente calculando las emisiones del tren y el avión variando la velocidad media de éste, y consecuentemente la cuota de mercado. Así, para el caso ejemplo y con el factor de emisiones de 2010 del sistema eléctrico peninsular (0,166 kgCO₂/kWh) se puede apreciar que la velocidad media óptima del tren es de 335,28 km/h lo que se corresponde con una velocidad máxima de 399,14 km/h.



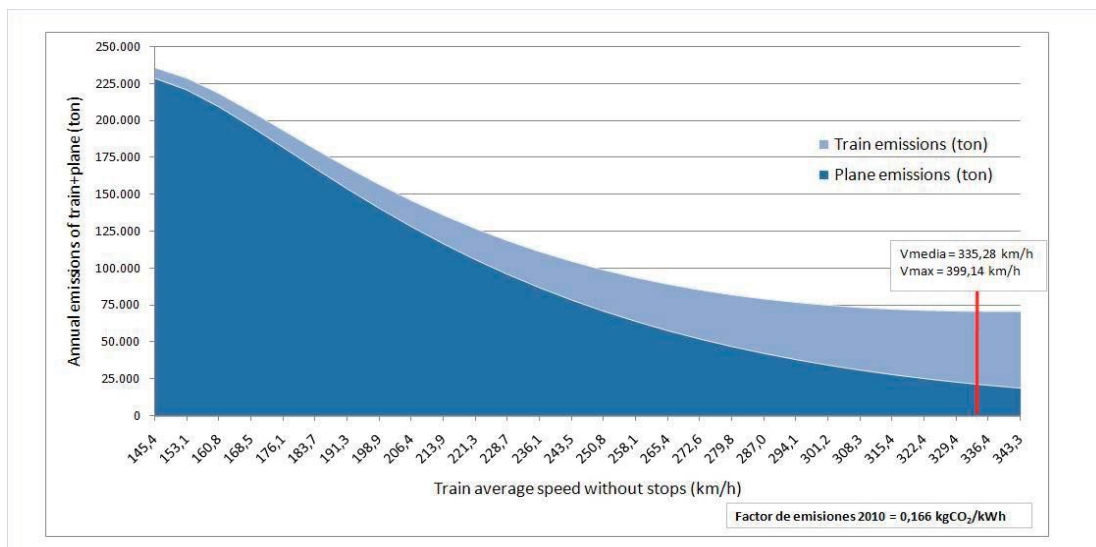
Fuente: Elaboración propia a partir de Adif (2010)

Figura 6. Velocidades máximas de circulación actuales en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

Año	Factor de emisiones tracción eléctrica (kgCO ₂ / kWh)	Velocidad media óptima (km/h)	Velocidad máxima óptima (km/h)
	0,100	360,63	429,32
	0,150	340,67	405,56
2010	0,166	335,28	399,14
	0,200	325,01	386,92
2009	0,233	316,24	376,48
	0,250	312,10	371,55
2008	0,278	305,74	363,98
	0,300	301,11	358,46
2006	0,335	294,26	350,31
2007	0,343	292,78	348,55
	0,350	291,51	347,04
	0,400	283,01	336,92

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 1, 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.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Emisiones del tren y el avión en el corredor Madrid-Barcelona para diferentes velocidades medias del tren

Si se considera por ejemplo, el paso de 348,55 km/h a 363,98 km/h, que serían las velocidades máxima óptimas para los años 2007 y 2008 respectivamente, la velocidad se incrementa un 4,2% y el consumo del tren un 6,2%.

Conclusiones

1. El análisis del consumo de energía y emisiones en un corredor no debe limitarse a un modo de transporte concreto, sino considerar todos los modos que coexisten, debido al trasvase modal de viajeros que se puede producir al mejorar las prestaciones de uno de los mismos. Por ejemplo, a media que aumenta la velocidad del tren éste capta viajeros del avión, y como quiera que el consumo de energía y emisiones del avión son muy superiores a los del tren de alta velocidad, el efecto neto en el corredor resulta positivo.

2. Las emisiones del avión son independientes de la velocidad pero varían con la distancia recorrida.

3. Las emisiones del tren son independientes de la distancia, pero aumentan ligeramente al incrementarse la velocidad media.

4. En los corredores en los que coexisten el ferrocarril y la aviación se ha constatado la existencia de una relación entre la cuota de mercado del ferrocarril y el tiempo de viaje de éste. La curva presenta tres tramos, dos extremos de pendiente baja y uno intermedio con mayor pendiente. Se observa que una reducción del tiempo de viaje de diez minutos supone un incremento de la cuota de mercado alrededor del 2% en los tramos extremos y del 5% en el tramo central.

5. Incrementar la velocidad del tren en el tercer tramo de la curva (con tiempos de viaje por debajo de dos horas) supone un aumento significativo de las emisiones pero no permite captar muchos viajeros del avión.

Bibliografía

Adif (2010). Cuadro de velocidades máximas.

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

Ecologistas n'alción - Asturias (2010): "AVE Pola de Lena - Gijón". En <http://www.ecologistasenaccion.org/>

Fundación de los Ferrocarriles Españoles (2008): *Observatorio del ferrocarril en España*.

García Álvarez, A. (2005): "El tren de alta velocidad no es un depredador de energía", en *Dyna*, junio 2005, LXXX-5, pág. 33 a 38; edición actualizada en mayo de 2007.

García Álvarez, A. (2007): "Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos", en "Anales de Mecánica y Electricidad" (Revista de la Asociación de Ingenieros del ICAI), Vol.LXXXIV, Fas. V, sept.-octub. 2007); y ampliado, con el mismo título, en "Via Libre" (núm. 515, enero 2008).

García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M. 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.

García Álvarez, A (2008): "Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad". Monográfico: La importancia de la velocidad en el ferrocarril.

García Álvarez, A., Barrón de Angoití, I., Puente Domínguez, F., Martín Cañizares, M. P. (2009): *Alta velocidad en España, líneas y trenes*. Colección monografías Vía Libre, N° 1.

GEI (2010): "High speed, energy consumption and emissions". International Union of Railways. High Speed Committee.

González Franco, I. y García Álvarez, A. (2011): "Efectos del cambio de criterio en la definición de la velocidad máxima del tren en el coste del vehículo, tiempos de viaje y consumo de energía". Ponencia presentada el 31 de marzo de 2011 en el 6º Congreso de Innovación Ferroviaria celebrado en Málaga.

Greenpeace (2009): "Transporte de viajeros: tren de alta velocidad (TAV)"

IFEU (2010): "EcoPassenger. Environmental methodology and data".

López Pita, A. (2008): "Explotación de líneas de ferrocarril". Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Minayo de la Cruz, F. y García Álvarez, A. (2009): "Relación entre la alta velocidad ferroviaria y los costes operativos no energéticos". Monográfico: La importancia de la velocidad en el ferrocarril.

Mourabit Fossas, O. (2003): *La velocidad óptima del sistema rueda-carril. Proyecto Fin de Master*. Universidad Politècnica de Catalunya.

UIC (2010): "Maintenance of high speed lines". UIC Report.

WWF-Adena (2006-2010): "Observatorio de la electricidad. Sistema peninsular".