

Evaluación de la repercusión económica ligada al coste energético de las limitaciones de velocidad por precauciones en las líneas férreas

Energetic and economic evaluation temporary of speed limitations in railways

Rafael Navarro López

Departamento de Ingeniería e infraestructura de los transportes
Universidad Politécnica de Valencia

Resumen

En la operación de sistemas ferroviarios, el gasto energético es una de las principales partidas económicas. Con el fin de optimizar tanto el sistema como los recursos disponibles, se pretende evaluar la influencia de las precauciones temporales de velocidad en el consumo energético. Para ello, se ha modelizado el consumo energético del material móvil que opera en un servicio ferroviario y se ha generado hipótesis de consumo suprimiendo las precauciones, constatando su influencia. Por otro lado, se ha estimado el coste que supondría la corrección de los defectos presentes en la infraestructura estableciendo una comparación con el sobre coste energético obtenido. Por último, se evalúa la conveniencia de la ejecución de las actuaciones propuestas.

Palabras clave: Consumo energético, optimización, precaución temporal de velocidad, sistema ferroviario.

Abstract

In railway operation, one of the most important parts of the investment is the energy consumption. With the objective of optimizing the railway system and energy resources, the intention is to evaluate the temporary speed restrictions, which influence the energy consumption. For this reason, by modelling the energy consumption in a train, which runs the railway service and creating a hypothesis of consumption without the speed's limitation, one will evaluate its influence. On the other hand, one will have to estimate the cost of the correction of the defects, which are the cause of the speed restrictions. By comparing this cost with the extra energy cost the economic profitability of track repairing is evaluated.

keywords: Energy Consumption, optimize, temporary restrictions, railway system.

Abreviaturas

E	Energía consumida/disipada	G	Gravedad
R_a	Resistencia al avance	I	Pendiente
l_T	Longitud total del tramo	R_{ac}	Resistencia de avance en curva
M	Masa del material móvil	a, β	Semiejes del elipsoide WGS-84
a	Aceleración	Ψ	Vector posición
C_{mg}	Centro de masas giratorias	E	Excentricidad del elipsoide WGS-84
A, B y C	Factores característicos del material rodante	Φ	Longitud en radianes
V	Velocidad		

1. Introducción

La evolución social y económica desarrollada en los últimos 20 años, sumado con la coyuntura económica actual, es la base donde se sustenta el cambio de modelo ingenieril. Por un lado surge la necesidad de crear modelos de desarrollo integrados en el medio ambiente con el objetivo que su impacto ambiental sea el menor posible. La creación de normativas que obligan al cumplimiento de requerimientos ambientales genera el interés de las empresas y administraciones de desarrollar sistemas más respetuosos con el medio ambiente y evitar penalizaciones por emisiones contaminantes que gravan sus balances económicos. Por otro lado, la coyuntura económica actual, está provocando un cambio estructural en la ingeniería civil. Hoy en día la disminución de los recursos económicos de los estados y la subida de precios de los combustibles, ha generado en el sector la necesidad de aportar un servicio a la sociedad pero mediante un sistema económicamente viable.

El sector del transporte, tras el de la industria, es uno de los sectores de actividad de mayor consumo de energía en los países desarrollados. En el caso concreto de España es el principal sector de consumo de energía, representando el 33% de del consumo energético, además de ser el que tiene más altos ritmos de crecimiento y mayor dependencia de los combustibles fósiles, implicando la necesidad de las importaciones del exterior. Por todo ello, se debe insistir en la importancia de la reducción de del consumo de energía y de las emisiones de contaminantes. En el sector ferroviario español, la partida de gasto dedicado a la energía de tracción en la principal empresa operadora del país, Renfe-operadora, supone un 10.1% del total de su reparto anual de gastos. (Renfe, 2009).

Con lo cual se puede concluir que la motivación inicial del estudio ha sido la obtención de la optimización del sistema ferroviario tanto en términos energéticos como en términos económicos.

La estimación de los costes totales asociados al consumo de energía se realiza, en muchas ocasiones, para el sistema integrado, que una vez estandarizados otorgan el consumo energético del sistema. Esto presenta la desventaja de no poder discretizar dichos datos para los distintos subsistemas y su consiguiente estudio y optimización. Esta necesidad de optimización es capital en las líneas férreas de baja densidad, donde los márgenes de explotación son reducidos o incluso deficitarios.

El desarrollo de modelos de cálculo representa el comportamiento real de un sistema mediante variables cuantificables. El objetivo es realizar una representación lo más real posible para evaluar su comportamiento de una forma aproximada. Por tanto, se debe definir los parámetros del modelo que resulten de relevancia para la mejor aproximación a la situación real. El sistema ferroviario es un complejo sistema de múltiples variables que interactúan entre sí, aun así estas formulaciones consideran tres factores principales:

- Trazado, característica principal del sistema de consumo, representado por el perfil de velocidades. Dicho perfil de velocidades es función de la pendiente, la geometría del trazado en planta y las características técnicas de los componentes de la vía.
- Geometría del tren: donde es de relevancia la masa, número de ejes, superficie transversal y “perímetro mojado”.
- Conducción, debido a la existencia de un rango de velocidades característico en los que el rendimiento energético del sistema de tracción es mayor. Al divergir de esta velocidad de “equilibrio” o “basal” el consumo energético aumenta tanto para velocidades superiores como inferiores.

Existen diversas formulaciones, basadas en estos parámetros, para obtener el consumo energético del material móvil: los modelos empíricos y el modelo basado en las ecuaciones de la dinámica. Las formulaciones empíricas, fundamentadas en experiencias y características locales, son difícilmente extrapolables a otros servicios distintos y por tanto coartan la posibilidad de aplicación en un ámbito general.

Con el objetivo de regenerar y reactivar líneas férreas ya construidas y con unos condicionantes ya determinados, se ha pretendido evaluar la afección en el consumo de los condicionantes operacionales. A igualdad de condicionantes de trazado y material móvil, el factor más determinante es la variación de velocidad. A mayor variabilidad de ésta, mayor consumo energético. Para focalizar el estudio, se ha particularizado el análisis estimando el sobreconsumo generado por las restricciones temporales de velocidad debidas a un deterioro de las condiciones originales de la infraestructura, mediante el cálculo del consumo energético en diferentes escenarios que permiten evaluar el grado de afección en el consumo de los distintos defectos. Una vez obtenido el sobrecoste energético y con la finalidad de optimizar, tanto energética como económicamente, la línea férrea, se realiza una estimación económica de las correcciones a desarrollar para suprimir las precauciones temporales y se establece una comparativa de idoneidad de las actuaciones o cuales de estas son potencialmente rentables.

2. Desarrollo teórico y experimental

En el sector ferroviario se denomina precaución a la limitación de velocidad impuesta por dos posibles factores, el trazado, lo que genera precauciones fijas, es decir las velocidades máximas permitidas de circulación; y el segundo factor el estado de la infraestructura que reduce la velocidad de manera temporal hasta la corrección del defecto. Estas limitaciones, además de variar el perfil de velocidades, provocan un aumento en el consumo energético para mantener el mismo tiempo de viaje, debido a la reducción de los tramos en los que el tren circula en deriva o bien aumentando la velocidad máxima en otros puntos del trazado. Si como consecuencia de una limitación puntual de velocidades

se aumenta el tiempo de viaje, el tren puede perder atractivo frente a otros medios. El origen de estas limitaciones puede ser por defectos en el propio trazado o por cambios en la operatividad del servicio ferroviario.

2.1. Descripción del modelo

El modelo empleado en este estudio ha sido el modelo basado en las ecuaciones de la dinámica debido a su formulación, aplicable en todos los casos. Se basa en la resultante de fuerzas actuantes sobre el material móvil en cada instante de tiempo. Esta formulación se ha extraído de tratados de ferrocarriles consultados como material bibliográfico para el estudio (García, 2007)

$$E = R_a \cdot l_T = (M \cdot a \cdot cmg + M \cdot g \cdot i + A + B \cdot V + C_T \cdot C \cdot V^2 + R_{ac}) \cdot l_T \quad (1)$$

Dicha resultante es función de las características del trazado, mediante la pendiente longitudinal y los radios de curvatura, características del material móvil, como la masa o los coeficientes aerodinámicos. Y características de la explotación ferroviaria como es la velocidad y aceleración del tren en cada instante. El modelo de consumo se basa en el balance de energías que intervienen en el movimiento general del tren. Con todo ello se obtiene la energía necesaria para el movimiento del material móvil.

Todos estos cálculos se discretizan por tramos de condiciones homogéneas y mediante sumatorios de los diferentes subtramos se obtiene la energía total consumida en el tramo a estudio por kilómetro. Cabe reseñar también que todos los sumandos deben ser multiplicados por coeficientes adecuados para conseguir la dimensionalización correcta de las unidades de medida que, en el caso del consumo energético la medida empleada frecuentemente, es el kilovatio-hora (kWh). Además, para poder conocer la energía total requerida de la fuente de energía primaria, debido a que no se dispone de un sistema ideal, se debe calcular las pérdidas en la cadena de tracción, mediante los estándares y coeficientes de rendimiento de los sistemas de tracción.

2.2. Obtención de los datos

Para llevar a cabo el estudio se ha empleado datos de velocidades, aceleraciones y posicionamiento del material móvil en espacios definidos de tiempo, que introducidos en la formulación correspondiente se obtienen resultados de consumo energético y consiguiente coste económico del material móvil para el tramo analizado, objetivo principal del estudio. El intervalo temporal elegido es de un segundo, es decir, para cada segundo del trayecto realizado por el material móvil se ha obtenido los datos necesarios. La recogida de datos se ha llevado a cabo mediante un aparato de posicionamiento GPS con un error menor a 2,5 metros con un sistema DGPS y un error en el valor de la velocidad de $\pm 0,1$ Km/h. Esta precisión está ligada a una correcta recepción de la señal, disminuyendo en zonas donde la intensidad de la señal de transmisión es baja. Los datos proporcionados por el aparato empleados en los cálculos posteriores han sido aquellos relacionados con el posicionamiento terrestre en el formato de longitud y latitud, la velocidad instantánea obtenida en nudos y el tiempo en segundos. Otra información ha sido útil para calificar la bonanza de los resultados obtenidos, como es el número de satélites de referencia en cada medición empleados por el sistema.

Las coordenadas de latitud y longitud son función del elipsoide teórico elegido como referencia, en este caso el WGS-84. Una vez transcritos los valores a una hoja de cálculo se ha realizado las transformaciones adecuadas para obtener las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), y mediante relaciones trigonométricas, finalmente, el espacio recorrido en cada intervalo de tiempo, un segundo.

$$\Psi = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad e^2 = \frac{\alpha^2 - \beta^2}{\alpha^2} \quad (II)$$

Con las velocidades en nudos, mediante un cambio de unidades y aplicando la fórmula de integración numérica mediante la regla del trapecio, se ha obtenido una segunda medición de la distancia recorrida en cada intervalo de tiempo. Comparando con las distancias reales obtenidas en los distintos puntos de control, donde se conoce el kilometraje, se ha hecho una estimación del error acumulado en la medición, así como cual de las dos formas de estimación se aproximaba más a la realidad.

Una vez elegido el tipo de dato más fiable para el modelo, conociendo la distancia absoluta, se ha corregido el error apreciado en la medición ajustando el error espacial de manera proporcional a las mediciones realizadas. Para ello se ha empleado una fórmula de interpolación lineal donde se compara la longitud real del tramo con la suma de las distancias de cada espacio temporal obtenidas de los datos del localizador GPS.

$$l_{i-1} = l_i + \frac{l_T - \sum l_i}{\sum l_i} \cdot l_i \quad (III)$$

Con los valores de la velocidad corregidos se han obtenido, mediante derivación, los valores de la aceleración en cada intervalo de tiempo. Posteriormente se han procesado los resultados obtenidos eliminando aquellos resultados que resultaran incoherentes o fuera de orden. En los tramos en los que la presencia de un túnel han provocado una pérdida significativa de señal, se han obtenido los valores aproximados mediante la fórmula de interpolación lineal con el último dato anterior con señal fiable y el primero posterior. Introduciendo los parámetros geométricos del trazado, así como los valores que definen el avance del material móvil en las formulas de la dinámica del tren para cada espacio temporal, se obtienen los valores de energía requerida y energía disipada en el movimiento de avance del tren en cada instante. Para ello se ha empleado la fórmula:

$$R_a = M \cdot a \cdot cmg + M \cdot g \cdot i + A + B \cdot V + C_T \cdot C \cdot V^2 + R_{ac} \quad (IV)$$

Con esta ecuación se ha obtenido la resistencia al avance del material móvil para cada intervalo de tiempo. Multiplicando la resistencia media entre dos intervalos por la longitud recorrida en dicho espacio temporal, con las correcciones de dimensionalización adecuadas, se obtiene la energía en kWh consumida para cada intervalo.

$$E_i = \frac{(R_{a i} + R_{a i-1})}{2} \cdot (l_i - l_{i-1}) \quad (V)$$

Realizando el sumatorio de los valores de energía para todo el recorrido se consigue el valor de la energía requerida al sistema de tracción y aquella energía disipada por el sistema de frenado para el tramo de estudio. Añadiendo las características técnicas del motor de tracción en cuanto a poder calorífico y rendimiento motor, se obtiene los litros de combustible diesel necesarios para las condiciones del estudio. Una vez obtenido el consumo total de combustible se multiplica por el precio de mercado, logrando el coste requerido para realizar el servicio en términos energéticos.

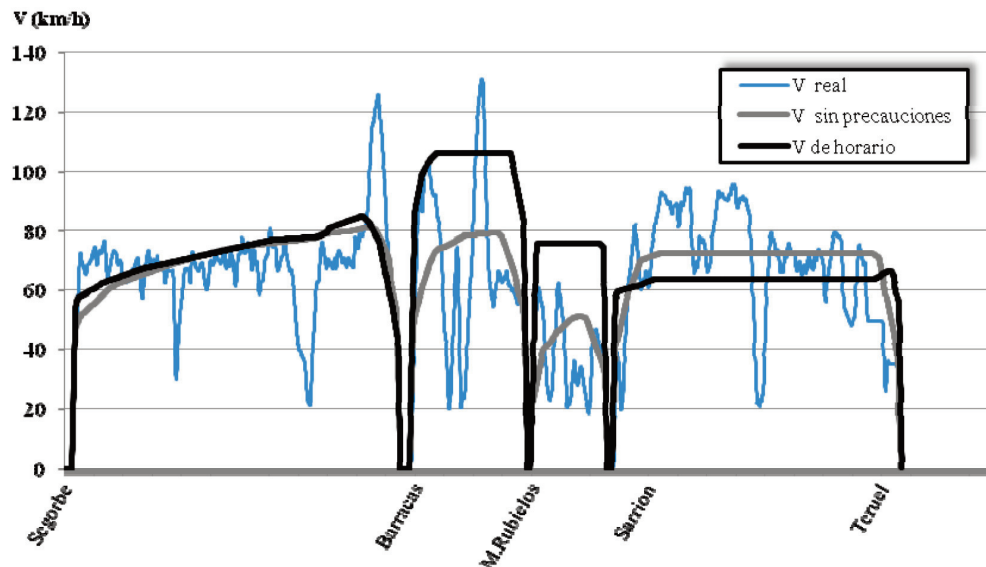
3. Exposición y análisis de los datos

Para establecer una valoración comparativa de diferentes situaciones que pueden reproducirse en la realidad, se ha realizado el análisis de tres escenarios distintos. En el primero se evalúa el coste energético y consiguiente coste económico, de la circulación en condiciones reales del material móvil por el tramo de estudio, a partir de los valores de velocidades y aceleraciones, previo tratamiento de los datos, medidos in situ. El segundo estadio evalúa los costes energéticos en el caso hipotético de la supresión de las precauciones temporales recorriendo el tramo en el mismo tiempo que con la presencia de éstas. Para ello, con los condicionantes de distancia y tiempo establecidos, se han simulado perfiles de velocidades que cumplen con las aceleraciones y deceleraciones habituales de la explotación ferroviaria, y a partir de estos valores de velocidades, se han calculado las aceleraciones correspondientes. Por último, el tercer estadio ha sido desarrollado con la hipótesis de la corrección de los defectos presentes en la vía y consiguiente supresión de las precauciones temporales, pero con la incorporación del condicionamiento temporal de la operación comercial llevada a cabo por la empresa Renfe-Operadora, es decir, cumpliendo el horario comercial establecido por dicha empresa. Como en el segundo estadio, con los condicionantes temporales y espaciales, se han obtenido curvas teóricas de velocidades comerciales.

En la figura 1 se puede apreciar la variabilidad de los valores de la velocidad para el escenario medido in situ en comparación con la tendencia cuasi constante de las curvas teóricas de velocidad de los escenarios con hipótesis de supresión de precauciones temporales. Se observa que el trazo correspondiente con el primer escenario (V real) presenta una gran variabilidad. También se refleja los descensos puntuales de velocidades en los puntos kilométricos donde se sitúan las precauciones, así como picos, que representan un incremento notable de la velocidad para intentar cumplir el horario de servicio, lo que supone un sobrecoste energético. Los trazos de los escenarios hipotéticos son mucho más constantes y sin necesidad de desarrollar una velocidad excesiva en el trayecto. Se observa también una velocidad mayor en el tercer escenario (V de horario) debido a la restricción temporal del horario comercial.

La línea de estudio es la línea de media distancia entre Valencia y Zaragoza, en concreto el tramo entre las estaciones de Segorbe (P.K. 238+400) y Teruel (P.K. 132+200) de 106,2 km de longitud. La motivación que ha llevado a la elección de esta línea surge de mejorar la eficiencia económica de ciertos servicios que debido a su baja densidad son poco rentables desde el punto de vista del operador. En este caso en concreto existen diversos puntos conflictivos donde situaciones circunstanciales han provocado defectos en las características geométricas iniciales de la vía y por tanto un sobrecoste energético, y económico, en su explotación.

Figura 1. Comparativa de velocidades en los distintos escenarios



La diferencia de cota entre ambos puntos es de 569 metros. El montaje de la vía se dispone sobre plataforma flexible constituida por balasto. La línea está definida con ancho 1.668 mm entre carriles, ancho ibérico, no electrificada con una rampa característica de 24 milésimas (ADIF, 2012). La superestructura está constituida por carril UIC-54 de 54 kg/m y suministrado en barra soldada in situ de 18 m de longitud. La conexión entre dos barras sucesivas se realizó mediante soldadura aluminotérmica proporcionando continuidad longitudinal a la vía. A lo largo del tramo se disponen dos tipos de traviesas, prefabricadas de hormigón bloque y monobloque con un espaciamiento entre ellas de 60 cm y sujeciones elásticas. Las fijaciones elásticas utilizadas para la tipología de traviesa monobloque son de tipo clip Vossloh. La traviesas bloque emplean el sistema de sujeción J2-P2. Bajo la traviesa se dispone de un espesor teórico de balasto entre 25 y 30 cm aunque dependiendo de las características particulares de cada tramo puede llegar, excepcionalmente, hasta un metro de espesor. El hombro de la banqueta de balasto es de 0,90 m y el talud 5H:4V. El balasto a emplear es silicio de tipo “2”, con Coeficiente de Desgaste Los Ángeles no superior al 15%. La pendiente transversal es de un 5% salvo en aquellas secciones en las que no apoya sobre la capa de subbalasto, es decir, en el caso de pasos a distinto nivel que se hace directamente sobre una capa de mortero de nivelación.

El material rodante con el que se opera los servicios de la línea es el denominado Renfe serie 599. La composición de dicha serie se basa de tres coches automotores diesel, de longitud cercana a los 76 metros y un peso de 157 toneladas, que pueden desarrollar una velocidad máxima de 160 km/h. Está compuesto por tres cajas, de distribución Motor-Remolque-Motor. Cada coche motor está dotado con dos bogies presentando cuatro motores en total. Los motores de tracción diesel del modelo MAN D2876 LUE 623 con una potencia nominal de 382 kW cada uno pudiendo desarrollar una potencia total de 1528 kW (Alonso, 2005).

El análisis se ha llevado a cabo por servicio y sentido. Una vez realizado el estudio por separado se ha incluido un servicio por sentido para evaluar el coste teórico de un recorrido donde coincide el punto de partida con el final. En la presentación de resultados se obtiene cuatro tipos de resultados:

- Requerimiento energético en términos de kWh, siendo estas las unidades estandarizadas de consumo energético.
- Consumo del sistema de tracción en litros de combustible diesel.
- Coste económico de la cantidad de combustible diesel empleado.
- Energía disipada por el sistema de frenado

Este último dato no se puede estandarizar en términos económicos, aunque supone una medida útil para evaluar la eficacia de la gestión de desarrollo energético del sistema tractor, así como aporta un baremo de estimación del desgaste del sistema de frenado.

Para obtener los valores de consumo y coste económico totales extrapolados de manera anual, se ha tenido en cuenta el número de servicios semanales comerciales de viajeros. La comunicación entre las estaciones de Valencia y Zaragoza consta de cuatro servicios diarios por sentido los siete días de la semana. Dispone, a su vez, de un servicio de mercancías que comunica el puerto de la ciudad de Valencia con Zaragoza dos veces por semana en ambos sentidos.

Escenario 1: Marcha en condiciones reales del material móvil.

En este escenario se ha tenido en cuenta las condiciones actuales de servicio y sus limitaciones. Es decir se han tenido en cuenta las limitaciones temporales existentes en el tramo de estudio.

En la tabla 1 se presenta los datos de coste energético y su correspondiente coste económico. Se aprecia un mayor consumo energético en el tramo Segorbe-Teruel debido al perfil longitudinal del trazado. Es decir, al ser un trazado característico de subida con rampas, el sistema de tracción debe realizar mayor esfuerzo de tracción y por tanto aumenta el consumo. En el tramo Teruel-Segorbe la energía disipada por el sistema de frenado es, lógicamente, mayor, debido a la presencia de pendientes favorables a lo largo de todo el trazado.

Tabla 1. Consumo energético y económico del escenario 1. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	702,83	602,31	1305,15	kWh
Consumo gasóleo	220,49	188,96	409,45	L
Coste	138,91	119,04	257,95	€
Energía disipada	279,29	438,03	717,32	kWh

Escenario 2: Marcha con la hipótesis de supresión de las precauciones temporales.

Partiendo de la supresión de las precauciones temporales y con curvas teóricas de velocidades se obtienen datos hipotéticos sobre la marcha del material móvil y consiguiente consumo. La presencia de precauciones temporales puede acarrear un incumplimiento en el horario comercial. De ahí la motivación de evaluar este escenario y obtener la variación de consumo. Para los cálculos, se ha tenido

en cuenta el mismo tiempo de trayecto del medido in situ en las labores de campo. En la tabla 2 se recogen todos los resultados de consumo obtenidos bajo esta hipótesis.

Tabla 2. Consumo energético y económico del escenario 2. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	559,00	328,30	887,29	kWh
Consumo gasóleo	175,37	102,99	278,36	L
Coste	110,48	64,89	175,37	€
Energía disipada	144,30	153,43	297,74	kWh

Escenario 3: Marcha sin precauciones temporales cumpliendo el horario comercial.

En este caso se plantea la evaluación de los costes derivados del consumo energético con las condiciones de estado óptimo de la vía y el cumplimiento del horario propuesto por la operadora. El tiempo de trayecto completo no difiere mucho del empleado en el escenario 2, pero los condicionantes temporales derivados de las paradas comerciales intermedias causan que, en ciertos tramos la velocidad sea superior para cumplir el horario comercial. Esto provoca que el coste requerido en este escenario sea superior al obtenido en el escenario 2. El horario comercial propuesto para el trayecto Segorbe-Teruel es de una hora y treinta y tres minutos y para el trayecto Teruel-Segorbe es de una hora y treinta y un minutos.

Tabla 3. Consumo energético y económico del escenario 3. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	576,97	333,02	909,99	kWh
Consumo gasóleo	181,01	104,47	285,48	L
Coste	114,04	65,82	179,85	€
Energía disipada	161,97	179,32	341,28	kWh

Una vez finalizado el análisis de manera separada, se ha realizado una comparativa entre las diferentes alternativas, evaluando el incremento de gasto energético y económico entre la situación real actual y las posibles situaciones futuras tras las actuaciones propuestas. En la primera comparativa se analiza el decremento de costes después de la realización de las actuaciones propuestas para el mismo coste temporal. La diferencia de gasto asciende hasta la cantidad de 82,59 € por servicio, lo que supone un 32% de ahorro sobre el consumo actual. En la segunda comparativa se analiza el decremento introduciendo el condicionante del cumplimiento del horario propuesto por la empresa operadora. En este caso el ahorro económico es de 78,10 € lo que supone una variación porcentual del 30.3%. En la tabla 4 se realiza una comparativa de los escenarios dos y tres, donde hipotéticamente se han eliminado las precauciones, respecto a las mediciones realizadas. En esta tabla se ha añadido la diferencia de coste en términos anuales. Para ello se ha tenido en cuenta los servicios semanales en el tramo, y se han extrapolado a términos anuales. Esto arroja una diferencia económica de 128.800 euros en la primera comparación, lo que supone una disminución de alrededor de un 30% del gasto

actual y un ahorro en la energía disipada de 420 kwh por servicio, lo que supone cerca del 55% de la energía disipada actualmente. Para la segunda comparativa, los valores absolutos son ligeramente inferiores pero prácticamente iguales en términos porcentuales.

Tabla 4. Comparativa de costes de los distintos escenarios. Elaboración propia

	Comparativa escenario 1 con el escenario 2			Comparativa escenario 1 con el escenario 3			Ud
	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	
Consumo total	143,84	274,02	417,85	125,86	269,29	395,15	kWh
Consumo gasóleo	45,12	85,96	131,09	39,48	84,48	123,97	l
Coste	28,43	54,16	82,59	24,88	53,22	78,10	€
Energía disipada	134,98	284,60	419,58	117,32	258,71	376,04	kWh
Coste anual	44.347,91	84.485,58	128.833,49	38.805,41	83.030,09	121.835,50	€

Una vez analizado el efecto económico que supone la corrección de los defectos causantes de las precauciones, se analiza el coste de dichas actuaciones así como la posible amortización y viabilidad económica de las obras a realizar. Para ello se han propuesto unas posibles actuaciones que enmienden la problemática existente y se ha realizado una estimación del gasto económico que implicarían. Todas las actuaciones propuestas parten de la premisa de la corrección puntual del defecto y no se plantea la posibilidad de modificar las características geométricas de la vía ni el trazado original. Los tramos de análisis vienen dados por las prevenciones temporales publicadas por la empresa que administra la infraestructura (ADIF, 2012). Tras recopilar información al respecto y realizar una inspección ocular en la infraestructura, se han podido identificar las diversas causas que han provocado los desperfectos en la infraestructura. Para una mayor simplicidad en el análisis se han agrupado aquellas limitaciones que hayan sido ocasionadas por la misma causa generalizando la actuación a desarrollar. En total existen nueve precauciones temporales repartidas a lo largo del tramo, una vez realizado un primer análisis se ha concluido que las actuaciones de los nueve defectos pueden agruparse en cuatro tipologías distintas. Para cada tipo de actuación se analiza las posibles causas que ocasionan el defecto, el proceso constructivo de la actuación en sí, así como una estimación cuantitativa del coste económico de la actuación.

La valoración de la viabilidad de las actuaciones parte de la amortización de las obras a realizar cuya finalidad es mantener el estado óptimo de los componentes de la infraestructura. La finalidad es poder operar el servicio en las mejores condiciones y en términos considerables de eficiencia. Para conseguir el estado óptimo de la infraestructura se proponen una serie de actuaciones que conllevan una serie de costes. Para el tramo en concreto de estudio se expone el presupuesto conjunto de las distintas actuaciones.

Tabla 5. Presupuesto, en euros, de las actuaciones a realizar. Elaboración propia

Actuación 1.	Corrección de drenaje ineficaz	232.566,00
Actuación 2.	Corrección cambio de estado del terraplén	2.800,00
Actuación 3.	Corrección defecto aparato de vía	51.805,00
Actuación 4.	Cambio elementos de la vía dañados	149.923,00
Presupuesto de ejecución material		437.094,00

Una vez obtenido el presupuesto de ejecución material, debe calcularse el gasto general y el beneficio industrial, así como gravarlo con la tasa de imposición material correspondiente. Con todo ello, y debido a que se trata de una estimación orientativa del coste que tendrían las actuaciones propuestas alcanzaría un montante de 635.000 euros.

Finalizado el estudio de los defectos causantes de las precauciones y su posible coste, se puede concluir, que el sobrecoste anual, en términos energéticos, es de alrededor de unos 125.000 euros, lo que se puede calificar como significativo, sobre todo teniendo en cuenta que los valores del consumo obtenidos se han visto disminuidos por la simplificación de los cálculos mediante el empleo del valor de rendimiento medio del sistema de tracción, ya que los valores de rendimiento son inferiores a bajas velocidades, con lo que en presencia de los tramos de las limitaciones temporales de velocidad el rendimiento sería menor del empleado y por tanto el consumo requerido mayor. También cabe destacar que existe una reducción considerable del coste energético en los escenarios bajo la hipótesis de la supresión de las precauciones temporales. Esta reducción es de un 30% en el coste de la energía consumida y de hasta un 55% en el valor de la energía disipada, esta última no evaluable en términos económicos. Debido a que el coste, orientativo, de la corrección de los deterioros presentes alcanza un total de 635.000 €, esta corrección equivale a los sobrecostes energéticos por la presencia de las precauciones temporales durante 5 años. Es decir, si no se realizara ninguna actuación, se invertiría el mismo dinero en sobregasto energético en un periodo igual a 5 años. Por último, la posibilidad de evaluar y desarrollar aquellas actuaciones que proporcionan un ratio coste/beneficio mayor, genera nuevas posibilidades de gestión y optimización de las infraestructuras ferroviarias.

4. Conclusión

En el presente estudio se ha planteado el sobrecoste energético producido por la presencia de precauciones temporales en la vía. Estas precauciones están provocadas por defectos en la infraestructura y condicionan de manera notable la explotación de los servicios debido a que limitan la velocidad máxima de circulación en el tramo afectado. Su influencia en el consumo energético es a considerar ya que el término de velocidad instantánea y, en mayor medida, su variación tiene un peso clave en dicho consumo.

El análisis llevado a cabo para un tramo concreto de la línea ferroviaria entre Valencia y Zaragoza se ha fundamentado en la obtención de los datos de consumo in situ del material móvil realizando un estudio comparativo con diferentes hipótesis de circulación donde han sido eliminadas las precauciones temporales. Con ello se pretende que la variación de consumo energético obtenida sea causa única y

exclusivamente de la presencia de dichas precauciones y no de otros factores fuera del foco de este estudio. Con todo ello los resultados obtenidos arrojan que la corrección de los defectos presentes en la infraestructura y consiguiente supresión de las precauciones temporales conllevaría un ahorro económico del orden del 30% del coste por consumo energético actual. Cabe añadir que la energía disipada por el sistema de frenado se vería reducida hasta en un 55% en el tramo estudiado. Por último se ha realizado una evaluación sobre las causas que han desencadenado los defectos en la infraestructura planteando unas posibles soluciones que subsanen dichos defectos. El montante al cual asciende la posible ejecución de las soluciones planteadas es un valor orientativo de alrededor de 635.000 euros.

Con toda la información recopilada y los resultados obtenidos en el estudio realizado se puede concluir que, bajo ciertos condicionantes, la rehabilitación del estado óptimo de la infraestructura es una posibilidad económicamente viable. Esto supone una mejora del servicio prestado así como un valor añadido al conjunto del sector ferroviario. En el caso de estudio el montante invertido en la ejecución de las actuaciones equivale a 5 años de circulación eficiente del material móvil sin precauciones temporales existentes en la infraestructura. Valorar si dicho periodo es aceptable es una cuestión de prioridades y objetivos del ejecutor, pero como referencia se puede comparar con periodos de amortización de obra civil de nueva construcción concluyendo que no está fuera del orden de magnitud. Por otro lado hay que tener en cuenta los beneficios intangibles generados como el caso de la energía disipada por el sistema de frenado, que tiene una influencia directa en el desgaste y mantenimiento de dichos sistemas. La disminución de consumo energético, con las últimas normativas de penalización a empresas que superen ciertos baremos de balances energéticos, supone una ventaja económica indirecta difícil de cuantificar.

Referencias

- ADIF (2012) Actualización de la declaración de la red.
- Alonso Mostaza, J.C (2005) Unidades basculantes serie 598.
- Campos Méndez, J., De Rus Mendoza, G. (2009). El transporte ferroviario de Alta velocidad: Una visión económica. *Fundación BBVA*
- Fundación CETMO (2005). El transporte en España, un sector estratégico: Informe sobre la aportación y sus retos futuros.
- Fuertes López, M. (2005). Privatización y liberación en el sector de los transportes. *Revista de derecho de la Unión Europea*
- García Álvarez, A. (2006). Gestión energética en el ferrocarril. *Máster en sistemas ferroviarios. Universidad Pontificia de Comillas.*
- García Álvarez, A. (2007). Dinámica de los trenes en alta velocidad. *Explotación técnica y económica de ferrocarriles.*
- García Álvarez, A. et Martín Cañizares, M^aP. (2007). Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles*

García Álvarez, A. et Martín Cañizares M^aP. (2008). Consumo y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril. *Monográfico 16 Enertrans*

García Álvarez, A. (2009) Energía y trazado ferroviario. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles.*

Levinson, D. et Mathieu, J.M (1997). The full cost of high speed rail: An engineering Approach. *The Annals of Regional Science*

López Pita, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. *Universidad Politécnica de Barcelona UPC.*

López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J. (2008). Consumo de energía y emisión es asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos. *Monográfico 11 Enertrans*

Martínez Aguado, T., Ruíz Rúa, A., Muro Rodríguez, A.I (2008). Modelos de consumo y emisiones en el transporte: Estado del arte. *Monográfico 3 Enertrans*

Renfe - Operadora (2009). Informe anual.