

# El transporte ferroviario como la solución de transporte más sostenible: desarrollos actuales para la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril

## *Railway Transport as the Most Energy-Efficient Solution: Current Developments to Improve Railway Energy Efficiency*

José Conrado Martínez Acevedo<sup>1</sup> y Jorge Ignacio Iglesias Díaz<sup>2\*</sup>

### Resumen

Este artículo presenta las diferentes alternativas actuales para la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril. Si bien actualmente el ferrocarril es sin ninguna duda el sistema de transporte más eficiente y que genera menos emisiones de CO<sub>2</sub>, también es una realidad que los restantes sistemas de transporte, especialmente los vehículos eléctricos, trabajan muy activamente en la reducción de sus emisiones y en la electrificación. Es por ello que el ferrocarril está desarrollando una actividad muy intensa de cara a reducir su consumo energético, también porque es la componente más alta de los costes de explotación. En el artículo se analizan los diferentes sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, así como las soluciones que se están implantando actualmente en el ferrocarril español para mejorar la eficiencia energética.

**Palabras clave:** eficiencia energética, energía de frenado, almacenamiento de energía, devolución de energía, eficiencia ferroviaria.

### Abstract

*This paper explains the different alternatives currently used to improve railway energy efficiency. Rail transport is, with no doubt, the most efficient and least CO<sub>2</sub> emitting transport mode. On the other hand, other transport means, especially electric vehicles, are increasing very rapidly their energy efficiency and reducing CO<sub>2</sub> emissions. For that reason railways are also developing an intense activity to reduce electric consumption, not only for being greener but also because electric consumption represents the highest exploitation cost at all. Furthermore, the paper analyses the different electric traction systems, as well as the solutions being implemented in the Spanish railways to improve their energy efficiency.*

**Keywords:** energy efficiency, braking energy, energy storage, rail efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tracción eléctrica ofrece ventajas, frente a la tracción diésel, como son el desarrollo de vehículos de gran potencia y velocidad, un mejor rendimiento desde el punto de vista del consumo energético y un menor impacto medioambiental.

Puede afirmarse que esta tracción es la tracción del presente y del futuro en los ferrocarriles, ocupando actualmente el primer lugar en los sistemas ferroviarios de los

países desarrollados con la única excepción importante de los Estados Unidos<sup>1</sup>.

En contra cabe destacar que la tracción eléctrica requiere grandes inversiones económicas en instalaciones propias (líneas eléctricas de alimentación, subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica para alimentación al tren entre otras), por lo que requiere de estudios económicos importantes. En cualquier caso, en líneas de elevadas velocidades de circulación y/o de tráfico intenso

\* Autor de contacto: [jorge.iglesias@cedex.es](mailto:jorge.iglesias@cedex.es)

<sup>1</sup> Ingeniero Superior Industrial por la UPM. Jefe de Área de Desarrollo de Proyectos de I+D+i de ADIF.

<sup>2</sup> Doctor Ingeniero Naval por la UPM. Director del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

<sup>1</sup> Algunos autores coinciden en señalar que un pequeño tractor construido por la empresa "Siemens & Halske" en Berlín, en 1879, fue el primer ferrocarril que funcionó con energía eléctrica. En todo caso, si bien Estados Unidos es actualmente un país que se caracteriza porque la práctica totalidad de sus ferrocarriles emplean tracción diésel, fue en él donde se efectuaron las primeras electrificaciones de importancia en el ámbito ferroviario, debiendo ser considerado como el precursor de la tecnología utilizada en dicho campo. En este sentido, las electrificaciones implantadas durante la primera década del siglo XX en la ciudad de Nueva York, fueron fundamentales para el posterior desarrollo del ferrocarril con tracción eléctrica y, además, fueron las principales electrificaciones realizadas en el mundo en aquella época todavía pionera.

como es el caso de las líneas de alta velocidad, el empleo de la tracción eléctrica es siempre imprescindible.

A diferencia de otros modos de transporte, el ferrocarril ha empleado la energía eléctrica desde hace más de un siglo. El período comprendido entre 1830 y 1940 constituye la etapa fundamental en la trayectoria tecnológica del ferrocarril. En esta etapa todos los grandes problemas fueron planteados, quedando definidas las líneas maestras de sus respectivas soluciones. Fue en esta etapa donde la electrificación ferroviaria inició su auténtico desarrollo, tanto en el campo de la corriente continua como en el campo de la corriente alterna.

El siguiente período considerado por algunos autores para analizar la trayectoria tecnológica del ferrocarril se circunscribe a los 40 años comprendidos entre 1940 y 1980. Habiendo ya dado solución a los problemas básicos planteados en la etapa anterior, durante este período se optimizan y mejoran las soluciones establecidas, ya que el FFCC continuará demandando mayores exigencias para su explotación, esto es, mayores velocidades de circulación y mayores densidades de tráfico<sup>2</sup>.

En este período se produce un avance notable en la tecnología de electrificación, tanto del material rodante como de la infraestructura. A mediados de los años 1960 se produce el inicio del primer período de la aplicación de la electrónica de potencia en la tracción, conservando aún el clásico motor de tracción con colector. Esta revolución de la tracción comienza con la aplicación del diodo de silicio, y luego, durante los años 70, continúa con la del tiristor GTO.

El tercer y último período, ya hasta nuestros días, puede considerarse como un período de optimización técnica de los sistemas existentes y la introducción de nuevas tecnologías que sin duda están revolucionando el campo de la tracción eléctrica, derivadas principalmente del extraordinario avance de los convertidores electrónicos de potencia con la introducción del IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) y de la introducción cada vez más extendida de las tecnologías de la información. Como se comentará en próximos apartados, los principales avances experimentados han venido produciéndose del lado del material rodante. Por otro lado, la infraestructura también ha evolucionado de manera notable si bien todavía dispone de un cierto margen de mejora en determinados aspectos: Interacción pantógrafo-catenaria, Perturbaciones, Protecciones, etc. Y es que debe destacarse que la mayor parte de los principios tecnológicos de esta infraestructura son los mismos que existían en el primer período referido. En la tabla que se incluye a continuación se hace un repaso histórico de dichos avances:

**Tabla 1.** Principales hitos de la electrificación ferroviaria (Fuente propia)

1879	Nace la tracción eléctrica en Berlín, con un tractor eléctrico de W. Siemens.
1888	Primera red de tranvías eléctricos urbanos en Richmond, Virginia, Estados Unidos.

<sup>2</sup> Prueba de las mejoras producidas en los diferentes subsistemas es la inauguración de la primera línea de Alta Velocidad, en Japón en el año 1964 (Tokaido Shinkansen) con una velocidad máxima de 210 km/h.

1890	Primer Metro eléctrico en Londres, <i>City and South London</i> .
1895	Primera electrificación de una línea principal ferroviaria: Túnel de la compañía "B&O" en Baltimore, Maryland, Estados Unidos. Primera red de tranvías eléctricos urbanos en Kyoto, Japón.
1898	Primera electrificación de una línea en Europa con ancho 1435 mm: Burgdorf-Thun, en Suiza, con corriente trifásica.
1900	Electrificación Austerlitz-Orsay, en París, a 600 V en corriente continua.
1902	Primera electrificación italiana con corriente trifásica: línea de La Valtellina.
1903	Primer record de velocidad por encima de los 200 Km/h, en Alemania, entre Marienfeld y Zossen, con dos automotores trifásicos.
1905	Ensayos de Oerlikon en Seebach-Wettingen, Suiza, a 15000 V y 16(2/3) Hz. Electrificación del túnel del Simplon, entonces el más largo del mundo, con tracción trifásica, realizada por Brown Boveri.
1906	Electrificación de la <i>Grand Central Terminal</i> , en Nueva York, a 660 V en corriente continua, impulsada por General Electric. Comienzo de la explotación en la línea japonesa Ochanomizu-Nakano, a 600 V en corriente continua.
1907	Electrificación del New Haven (NH) a 11000 V y 25 Hz, sistema impulsado por Westinghouse. NH se convierte en el ferrocarril con mayor densidad de tráfico del mundo con tracción eléctrica en los años 20.
1911	Primera electrificación española en vía ancha, Gergal-Santa Fe, con corriente trifásica, inspirada en la del túnel del Simplon.
1912	BLS inaugura el túnel de Lötsberg, electrificado a 15000 V y 16(2/3) Hz.
1915	Electrificación a 3000 V de la línea transcontinental de <i>Milwaukee Road</i> en Montana, Estados Unidos.
1917	Electrificación a 1500 V de la línea inglesa Shildon-Newport. Gran Bretaña comienza a impulsar electrificaciones en corriente continua en otros países.
1920	Electrificación del túnel de San Gotardo a 15000 V y 16(2/3) Hz.
1922	El <i>Midi</i> inaugura la primera línea francesa electrificada a 1500 V, que había sido elegido como sistema unificado en Francia en 1920.
1928	Primera electrificación a 3000 V en Italia, sistema que irá sustituyendo las electrificaciones trifásicas en el norte del país hasta 1976.
1935	Finalización de la electrificación Washington-Nueva York de la compañía <i>Pennsylvania</i> , que pasa a ser la principal explotación con tracción eléctrica de todo el mundo antes de la Segunda Guerra Mundial.
1951	La SNCF anuncia el éxito de sus ensayos realizados con el nuevo sistema de electrificación a 25000 V y 50 Hz, que se convertirá en el más ventajoso y extendido en todo el mundo.
1954	Valenciennes-Thionville es la primera electrificación francesa a 25000 V y 50 Hz.
1955	Récord mundial de velocidad en Francia con una locomotora BB-9004 (331 Km/h).
1964	Inauguración en Japón del <i>Tokaido Shinkansen</i> , primera línea de alta velocidad del mundo (210 Km/h).

A mediados de los años 1960 puede situarse el inicio del primer período de la aplicación de la electrónica de potencia en la tracción, conservando aún el clásico motor de tracción con colector. Aproximadamente, este período abarca dos décadas, desde 1965 hasta 1985. Esta revolución de la tracción comienza con la aplicación del diodo de silicio, y luego, durante los años 1970, continúa con la del tiristor. Los diodos de silicio permiten afianzar definitivamente el desarrollo de la tracción eléctrica a 25000 V y 50 Hz, la tracción diésel con transmisión eléctrica trifásica/continua, y la sustitución de los rectificadores de mercurio en las subestaciones de tracción. La primera aplicación experimental del diodo de silicio se registra en las últimas locomotoras BB-12000 de la SNCF, en 1960.

1967	RENFE inicia la recepción de las locomotoras 7900, primeras locomotoras japonesas en Europa. Son locomotoras universales con bogie monomotor y birreductor, tecnología que dominará la tracción eléctrica española hasta 1985.
1970	En el caso de la corriente continua, los tiristores rápidos permiten desarrollar el chopper a partir de 1970, en Japón. En RENFE, la recepción de las locomotoras de la serie 251, en 1982, marcaron la primera gran aplicación del chopper en España.
1979	Aparecen en Alemania las cinco locomotoras eléctricas prototipo de la serie E 120 de la compañía estatal DB, con motores asíncronos, y que fueron las pioneras de la tracción trifásica en Europa. En 1987, se inicia la recepción de 60 locomotoras E 120 en Alemania. Previamente, en Japón se había aplicado ya la tracción trifásica en unidades de tren.
1981	Inauguración en Francia de la primera parte de la nueva línea de alta velocidad París-Lyon, que constituye realmente el comienzo de la Alta Velocidad en Europa.
1985	A mediados de los años 1980 puede situarse el inicio del segundo período de la aplicación de la electrónica de potencia en la tracción, sustituyendo el ya clásico motor de tracción con colector por el motor trifásico, asíncrono o síncrono. Aproximadamente abarca dos décadas, a partir de 1985, y habiéndose alcanzado la estabilización en 2005. El desarrollo del tiristor GTO y del Microprocesador permitió la introducción definitiva de la tracción trifásica durante los tres últimos lustros del siglo XX. A partir del año 2000, aproximadamente, los transistores IGBT desplazan a los GTO.
1987	Récord de velocidad en España con el prototipo del electrotrén basculante 443-001 <i>Platanito</i> (206 Km/h).
1988	La SNCF comienza la recepción de las locomotoras <i>Sybic</i> , que tienen tracción trifásica síncrona y son bicorriente 25000/1500 V. Al año siguiente, 1989, llegan los trenes <i>TGV Atlantic</i> , que son los primeros TGV con motores trifásicos síncronos.
1989	Récord de velocidad en Alemania con el tren experimental 401 (407 Km/h) en la línea entre Hannover y Würzburg.
1989	Comienza la recepción de los 20 electrotrenes que constituyen el tercer lote de la serie 448, y que ha sido el último material de tracción eléctrica con motor de colector recibido por RENFE.
1990	Récord mundial de velocidad en Francia con la rama <i>TGV Atlantic</i> 325 (515,3 Km/h).
1992	Inauguración de la primera línea de alta velocidad en España, Madrid-Sevilla, con los nuevos trenes de la serie 100 (trenes AVE), dotados de motores trifásicos síncronos. Ese mismo año comienza la recepción de las locomotoras 252, con tracción trifásica asíncrona, y que han marcado un hito importante en el desarrollo europeo de la tracción trifásica.
1993	Primera aplicación en el mundo de los nuevos transistores IGBT en el Metro de Tokio, TRTA.
1993	Récord de velocidad en España con el tren AVE 100-015 (357 Km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.
1996	Récord de velocidad en Japón con el tren experimental 300X (443 Km/h) en la línea del <i>Tokaido</i> .
2001	Récord de velocidad en España con el prototipo de la serie 102 (359 Km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.
2002	Récord de velocidad en España con el prototipo de la serie 102 (362 Km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Lérida.
2003	Inauguración de la segunda línea de alta velocidad en España, Madrid-Lérida.
2005	Inicio de la explotación comercial con los nuevos trenes de la serie 102. Utilizan transistores IGBT, constituyendo el prototipo, en su momento, una de las aplicaciones más significativas a nivel mundial de este tipo de semiconductores.
2005	Récord de velocidad en España con un tren de la serie 102 (367 Km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Lérida.
2006	Récord de velocidad en España con una rama AVE de la serie 103 (402 Km/h) en la línea de alta velocidad Madrid-Lérida.
2007	Récord mundial de velocidad en Francia el 3 de abril con la rama experimental <i>V150</i> (574,8 Km/h). Este récord no ha sido superado actualmente.

## 2. CORRIENTE CONTINUA Y CORRIENTE ALTERNA

El uso de energía eléctrica en el ferrocarril ha supuesto el desarrollo de sistemas con corriente continua (C/C) y con corriente alterna (C/A). El uso de la corriente continua vino motivado principalmente por la facilidad que suponía el uso del motor de tracción de corriente continua. Por su parte, los sistemas de corriente alterna permitían incrementar las distancias entre los puntos de consumo del ferrocarril (subestaciones de tracción) al ser más reducidas las caídas de tensión por emplear tensiones eléctricas mayores. Si bien en el pasado existieron electrificaciones ferroviarias con corriente alterna trifásica<sup>3</sup>, en la actualidad sólo se emplea la corriente alterna monofásica.

La corriente continua es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica rectificadoras. Estas instalaciones son conectadas a una red de corriente alterna trifásica para después realizar una etapa de transformación (mediante un transformador que reduce la tensión de la red a otra de trabajo del rectificador) y otra de rectificación (mediante un rectificador de diodos que acondiciona la tensión a la de alimentación del tren). La tensión de salida del rectificador –por tanto la de alimentación al tren– ha sido muy diversa, llegando actualmente hasta los 3.000 V de tensión nominal. Otros valores normalizados en la actualidad son 750 y 1.500 V.

La corriente alterna monofásica es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica transformadoras que se conectan a una red de corriente alterna trifásica para después realizar un único proceso de transformación. El principal problema que plantea este hecho es el desequilibrio creado en el sistema trifásico de alta tensión que se debe mitigar conectando alternativamente a diferentes fases las subestaciones que van alimentando al tren a lo largo de su trayecto. Al igual que en los sistemas de C/C, la tensión de salida del transformador también ha sido muy diversa, siendo usualmente 15.000 o 25.000 V de tensión nominal. La frecuencia de funcionamiento también ha sido variada según la época y la explotación considerada, siendo usualmente la frecuencia industrial de la red (50 o 60 Hz) o una frecuencia especial como ocurre en gran parte de los ferrocarriles centroeuropeos.

En la actualidad algo más del 30% de la red mundial ferroviaria se encuentra electrificada. A nivel mundial, Rusia es el país que dispone de más kilómetros electrificados (más de 40.000 Km). En Europa, Alemania y Francia son los países con mayor longitud de red electrificada, sobre todo el primero, con más de 18.500 kilómetros. España ocupa el quinto lugar.

Cabe reseñar el caso especial de Japón, país de referencia en este campo y pionero en el desarrollo de diversos

<sup>3</sup> El sistema trifásico se desarrolló de manera insuficiente debido, principalmente, a los graves inconvenientes que presentaban las instalaciones, sobre todo por su complejidad, tanto en lo referido a la infraestructura como al material rodante empleado. Debe considerarse que era necesario disponer de tres instalaciones independientes de alimentación eléctrica al tren –una por fase– y vehículos motores dotados de tres pantógrafos. Como consecuencia de esta situación resultaba muy atractivo el desarrollo de un sistema de electrificación en corriente alterna monofásica con alta tensión y sección conductora reducida.

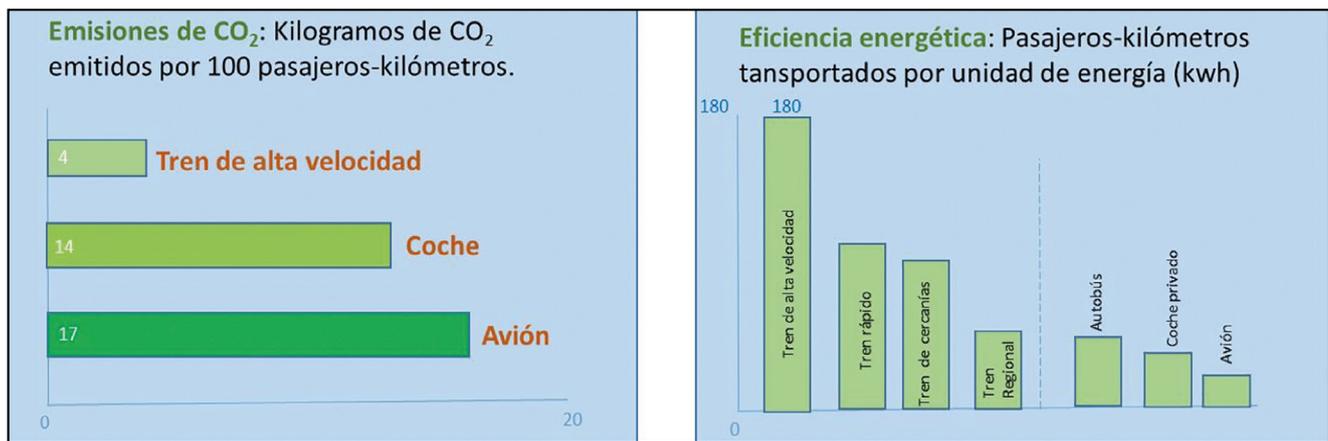


Figura 1. Eficiencia energética de los distintos modos de transporte (Fuente: UIC).

conceptos novedosos. En su red ferroviaria coexisten hasta cinco sistemas de electrificación, siendo mayoritario el empleo del sistema en corriente continua con tensiones comprendidas entre 1.500 y 3.000 V. Por otra parte destaca el empleo de distinta frecuencia en los sistemas de electrificación en corriente alterna según la línea ferroviaria considerada.

Por último, respecto a los kilómetros de líneas ferroviarias electrificadas en el mundo de acuerdo al sistema empleado, puede afirmarse que el sistema más ampliamente extendido es el de corriente alterna monofásica a 25.000 V y frecuencia industrial de 50 Hz (60 Hz en el caso de Estados Unidos y Asia). El segundo lugar lo ocupa el sistema de corriente continua con tensión de 3.000 V (caso de la red convencional española). El sistema de corriente alterna monofásica a 15.000 V y frecuencia 16,7 Hz representa el tercer tipo de sistema universalmente empleado (caso de Alemania, Suecia y Suiza entre otros países).

### 3. EL AHORRO DE ENERGÍA Y DE CO<sub>2</sub>

Para los ingenieros ferroviarios especialistas en tracción eléctrica, y en general para todos los gestores afectados por esta materia, la eficiencia energética ha sido siempre un objetivo estratégico.

En efecto, desde hace varios años las administraciones y compañías ferroviarias han establecido como una línea prioritaria de su estrategia la gestión sostenible de la energía, muy especialmente la que es destinada a la tracción de sus vehículos. Este hecho es debido en gran parte al elevado coste económico que esta energía representa, concretamente en el entorno del 20% de los costes fijos de explotación. En menor medida, la necesidad de los operadores ferroviarios de potenciar y promocionar el transporte ferroviario como “transporte ecológico”, refuerza el mensaje de que se debe reducir el consumo energético del ferrocarril.

Si bien otros modos están mejorando la eficiencia energética, existe todavía una brecha notable a favor del ferrocarril en comparación con el transporte por carretera y por avión (figura 1). Si a este hecho se une que la mayor parte del ferrocarril actual se mueve mediante tracción eléctrica, resulta que es también el sistema que menos emisiones de CO<sub>2</sub> genera, tal y como se muestra de forma comparativa con otros modos de transporte en

la figura 2. Aun así, el ferrocarril no debe descuidar en su ventaja competitiva y debe continuar innovando para reducir su consumo energético de tracción, sobre todo en el ámbito de la infraestructura pues el material rodante eléctrico ha llegado a unos niveles de eficiencia energética difícilmente mejorables. Algunos autores coinciden en afirmar que el gran ahorro de energía en este tipo de vehículos ya se ha realizado y que los nuevos desarrollos producirán sólo pequeñas mejoras, entre el 1 y el 0,5% de ahorro. No obstante, aún cabe margen en el aprovechamiento de la energía de frenado de los trenes tal y como se analizará más adelante.

En los últimos diez años, se han llevado a cabo una importante ejecución de proyectos de investigación para la reducción del consumo de energía eléctrica de tracción. La principal motivación de los operadores ferroviarios para emprender proyectos de reducción del consumo energético es eminentemente económica, tratándose de proyectos que deben venir acompañados de un retorno de la inversión. Este retorno de la inversión sólo es posible si los ahorros de kilovatios hora se ven transformados en ahorros en euros.

En términos generales, se han llevado a cabo proyectos encaminados a la implantación de procedimientos y equipos que permitan reducir las pérdidas eléctricas en los diferentes elementos de la infraestructura eléctrica ferroviaria, a la implantación de planes de conducción económica y de nuevas tecnologías que permitan aprovechar la energía eléctrica generada con el freno regenerativo de los vehículos<sup>4</sup> (freno eléctrico por recuperación). Precisamente el aprovechamiento de esta energía se ha convertido en la actualidad en una de las principales técnicas de gestión y aprovechamiento de la energía en redes con tracción eléctrica, sobre todo en corriente continua minimizando con ello el uso del freno eléctrico reostático.

<sup>4</sup> La energía que se disipa en el proceso de frenado, una parte se pierde en los frenos de fricción (frenos de accionamiento neumático), sin ningún aprovechamiento útil, y otra parte es disipada por los frenos dinámicos, que para el caso de los trenes de tracción eléctrica (o de tracción diésel eléctrica), suponen la generación de energía eléctrica. Si bien en algunos casos esta energía generada es disipada en resistencias eléctricas del propio tren (reóstato), en otras ocasiones es enviada a la línea aérea de contacto, pudiendo ser utilizada por otro tren que se encuentre acelerando o incluso enviada a la red eléctrica de suministro si no se da este hecho.

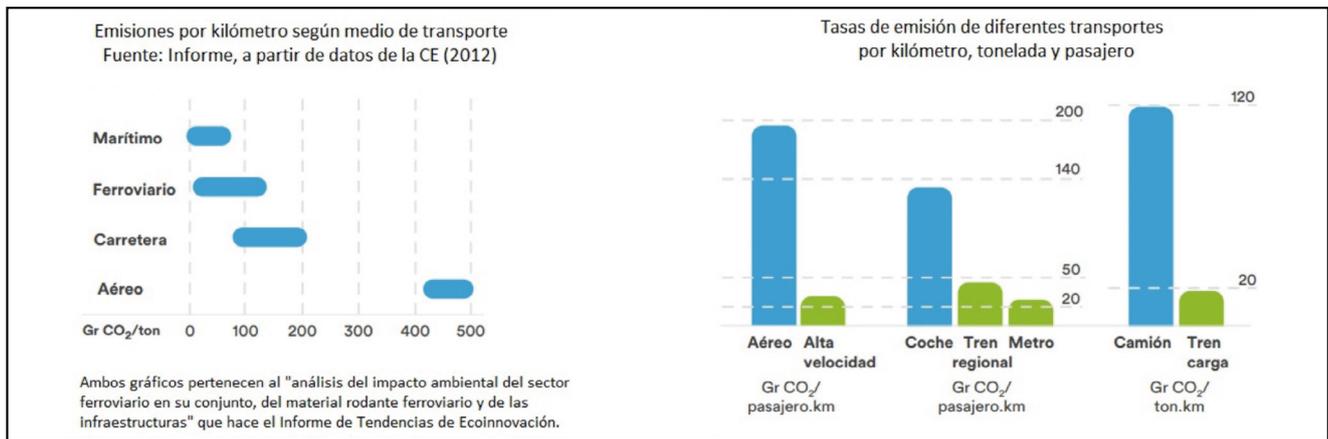


Figura 2. Emisión de CO<sub>2</sub> de los diferentes medios de transporte (Fuente: Revista *Energías renovables*, marzo 2017).

#### 4. EL MATERIAL RODANTE

El desarrollo experimentado en los últimos años por la electrónica de potencia ha permitido sin lugar a dudas mejorar la eficiencia energética de los vehículos. Así, el motor trifásico asíncrono se ha impuesto totalmente sobre el motor de colector, e incluso sobre el motor síncrono, no sólo por su robustez y sencillez, sino también por su gran eficiencia. No obstante en la actualidad se está observando que incluso la máquina de tracción asíncrona puede ser superada en eficiencia por la máquina síncrona con rotor de imanes permanentes, siendo ya el tipo de motor empleado en algunos trenes en operación. Esta máquina, al igual que la asíncrona, no tiene ningún elemento desnudo bajo tensión en su interior y tampoco precisa de elementos de conmutación o de contacto por fricción, por lo que se puede afirmar que tiene todas las ventajas que ofrecía la máquina asíncrona, con costes de mantenimiento reducidos, pero con unos rendimientos bastante superiores. Los valores de rendimiento de estas máquinas de imanes permanentes, oscilan entre el 97,2% y el 97,6%, superando incluso los valores de los transformadores de potencia.

El ondulator PWM con transistores IGBT y controlado con microprocesadores, se ha impuesto sobre los demás tipos de ondulatorios, a causa de sus mejores prestaciones y también por su menor peso y volumen. El convertidor de entrada es diferente según el tipo de tracción eléctrica. En el caso de catenarias con corriente alterna, se utiliza el convertidor 4QS debido a sus mejores prestaciones y permitir el freno eléctrico por recuperación. En el caso de catenarias con corriente continua, se ha conseguido eliminar el chopper de entrada, siendo conectado directamente el ondulator PWM a la catenaria a través del filtro de entrada, resultando así la cadena de tracción más sencilla en la actualidad (ondulator directo).

Como se ha comentado, el freno eléctrico por recuperación ha producido importantes mejoras en la eficiencia energética. Existen diversos estudios en los que se afirma que los trenes son capaces de regenerar entre el 30 y el 40% de la energía que consumen. Así por ejemplo MTR, el operador del metro y de las cercanías de Hong Kong, obtuvo una mejora de consumo del 46% cuando introdujo nuevo material dotado de este tipo de freno. Otro ejemplo podría ser las mediciones de potencia en un tren de la serie 390 ("Pendolino") de la operadora inglesa *Virgin West Coast* que muestran ahorros de entre el 16 y 18% tras la introducción de este frenado regenerativo.

Desde un punto de vista constructivo, el diseño del material también tiene importantes consecuencias en el consumo de energía. El tren *TGV Duplex* de dos pisos (figura 3), representa un ejemplo de referencia, al haber aumentado la capacidad de asientos en un 45% en comparación con el *TGV Réseau*, de un solo piso y con la misma longitud. El operador ferroviario francés SNCF afirma que esta evolución no produce apenas incremento en el consumo de energía, lo que supone que este consumo, por persona, se haya reducido en más de un 30%.



Figura 3. Superior: TGV Duplex; Inferior: TGV Réseau. Fuente SNCF.

Los trenes de alta velocidad japoneses, *Shinkansen*, son conocidos por un alto rendimiento energético. Un reciente estudio cuantifica el consumo de energía de los trenes de la serie 700 a 300 km/h en 0,029 kWh por viajero y kilómetro (figura 4), que es casi exactamente la misma energía que consumen los trenes IC 225 británicos, que circulan a 200 km/h. ¿Cómo necesitan menos energía los trenes Shinkansen, a pesar de viajar más rápido? Parte de la razón es que sus coches tienen 3,4

metros de ancho, frente a los 2,8 de los trenes británicos, que permite una configuración de “3+3” asientos en clase estándar contra “2+2” de los trenes IC 225. Los trenes son también más largos: frente a los 400 metros de longitud (16 coches) de los trenes japoneses, con capacidad para 1.323 viajeros, los trenes IC 225 británicos alojan a 524 personas en apenas la mitad de la longitud. Por lo tanto se debe a la mejora de la capacidad, ya que hay proporcionalmente menos espacio y se excluyen viajeros por motivos de seguridad.

Por otra parte, los trenes japoneses de la serie 700 han sido fabricados para minimizar el rozamiento, con un tesero aerodinámico optimizado, un pantógrafo carenado y un cuidado diseño de la zona inferior del coche. Gran parte de la mejora de la aerodinámica proviene de la necesidad de reducir el ruido de la interacción rueda-carril y la presión en la entrada de los túneles, pero también ha posibilitado importantes beneficios en el ahorro de energía. En la línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka (*Tokaido Shinkansen*), este diseño ha permitido una reducción de la energía de tracción de 42 kWh/km en los primeros tipos de trenes, a unos 30 kWh/km en las nuevas series de trenes.



**Figura 4.** Tren japonés N700. Fuente JR Central.

Adicionalmente a la mejora experimentada en los componentes de la cadena de tracción, el material rodante ferroviario se está viendo influido de manera positiva por el desarrollo de la tecnología de almacenamiento de energía a bordo (principalmente basada en tecnología de baterías y supercondensadores). La disponibilidad a bordo de un sistema capaz de absorber la potencia regenerada por el tren durante las etapas de frenado permite, en general, reducir notablemente las pérdidas por envío de potencia regenerada a los reóstatos. Se aprovecha directamente esta energía en lugar de tratar de reintroducirla en la línea aérea de contacto, evitando así el consiguiente incremento de la tensión en pantógrafo. Sin embargo, a pesar de que esta tecnología permite reducir las pérdidas por transmisión de potencia en la red, es preciso ponderar hasta qué punto afecta el incremento de la masa del tren derivado de la instalación de los almacenadores embarcados.

## 5. LA INFRAESTRUCTURA

Según se ha indicado, la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril vendrá dada por una optimización de los elementos que permiten el funcionamiento de un tren

con tracción eléctrica. A modo de repaso, estos elementos son los siguientes:

1. Central de generación de energía eléctrica trifásica.
2. Líneas eléctricas trifásicas, tanto de transporte como de distribución.
3. Subestación eléctrica trifásica.
4. Subestación eléctrica de tracción.
5. Conjunto de conductores de alimentación entre la subestación eléctrica de tracción y la línea de transmisión de energía eléctrica al tren.
6. Línea de transmisión de energía eléctrica y sistemas asociados.

En la mayor parte de las redes ferroviarias mundiales, los elementos 4, 5 y 6 son propiedad de gestores y/o empresas ferroviarias mientras que los elementos 1, 2 y 3 pertenecen a gestores eléctricos externos. Los elementos 4, 5 y 6 constituyen el denominado TPS (*Traction Power System*). De esta manera la mayor parte de los proyectos orientados a la eficiencia energética de la infraestructura son focalizados a la optimización del funcionamiento del TPS. Las principales líneas de trabajo que se están potenciando son las siguientes:

- a) Implantación de procedimientos y nuevos componentes para la reducción de pérdidas eléctricas en estos elementos.
- b) Implantación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la energía eléctrica generada con el freno regenerativo de los trenes. Cabe reseñar que, por diversos motivos, en gran parte de las líneas ferroviarias, se han observado pérdidas en reóstatos que rondan el 10-12% del consumo en contadores del tren, lo cual limita el ahorro real conseguido por el frenado regenerativo. Para ello estas tecnologías de aprovechamiento han comenzado a penetrar de manera importante en las redes ferroviarias.

Centrando el análisis en esta última línea de trabajo, a continuación se analiza de manera breve cuáles serían las principales tecnologías:

**Reaprovechamiento de la energía de frenado a través de una configuración y/u operación óptima de la red.** El objetivo es propiciar la situación en la cual un tren frena y otro acelera de manera que éste último consuma la energía eléctrica regenerada por el primero. Para propiciar que este hecho se produzca de forma frecuente, se pueden realizar distintas acciones como por ejemplo configurar el circuito eléctrico de tracción permitiendo secciones más largas y por tanto con mayor densidad de trenes en ellas. También se podría implantar una malla de explotación en la que se sincronicen los procesos de aceleración y frenado de los trenes en una misma estación.

**Inversión de corriente en líneas de C/C** (figura 5). Mientras que en las electrificaciones de C/A monofásica la devolución de energía a la red de suministro es algo que se hace por las propias características técnicas del sistema, no ocurre lo mismo en las electrificaciones de corriente continua. En este caso la existencia de rectificadores de diodos impide la circulación de corriente hacia la red exterior. Si bien la tecnología que permite la circulación de esta corriente desde la subestación de C/C a la red de distribución ha estado disponible desde hace más de una década

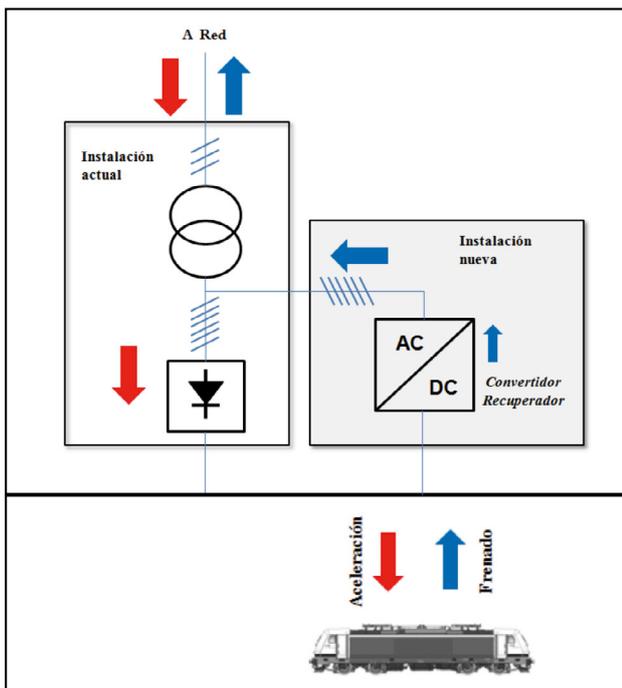


Figura 5. Inversión de corriente en líneas de C/C. (Fuente propia).

(se trata de un convertidor situado en antiparalelo con el grupo transformador/rectificador), no ha existido un marco legal y sobre todo económico, que incentivara el proceso por parte de los gestores y empresas ferroviarias. En esta situación sólo se beneficia el sistema eléctrico general, pues recibe grandes cantidades de energía procedente de las redes ferroviarias sin que éstas reciban ninguna compensación económica. La creación de este marco (en España regulado por el Real Decreto 1011/2009) ha permitido que la instalación de inversores de potencia sea cada vez mayor, posicionándose como una de las soluciones más rentables para las empresas ferroviarias.

**Almacenamiento de energía en tierra en líneas de C/C** (figura 6). El principio de funcionamiento consiste en

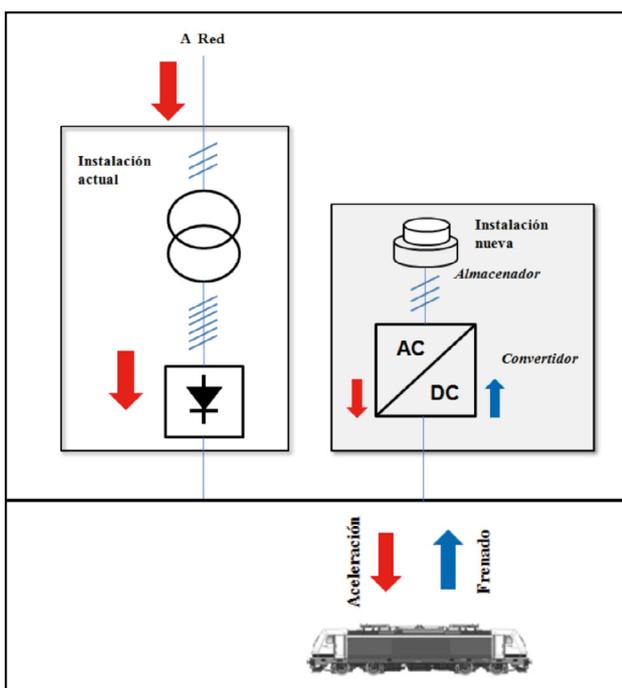


Figura 6. Almacenamiento en tierra en líneas de C/C. (Fuente propia).

almacenar la energía regenerada en plantas de almacenamiento situadas en tierra. Estas plantas, que se pueden situar en la propia subestación de tracción o a lo largo de la línea, suministrarían la energía almacenada cuando los trenes volvieran a demandarla.

## 6. BINOMIO MATERIAL RODANTE-INFRAESTRUCTURA

En este apartado se considerarían otros desarrollos que necesariamente involucran al Material Rodante y a la Infraestructura de manera conjunta:

**Conducción económica.** Este tipo de conducción, definida como aquella que permite obtener el máximo aprovechamiento de la energía de tracción, evita en lo posible la utilización de los frenos pues trata de aprovechar al máximo la marcha en deriva, es decir, la energía cinética y potencial del tren con objeto de recorrer el mayor número de kilómetros sin aplicar la tracción. Actualmente este tipo de conducción puede ser implementada de manera automática en los sistemas automáticos del tren.

**La Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente.** En la situación actual, el suministro, control y gestión de la energía ferroviaria en el TPS se realiza de una manera unidireccional. Para ello se emplean sistemas de adquisición de datos (SCADAs) que permiten monitorizar y controlar el proceso desde la conexión a la red de transporte o distribución de energía. Este aspecto no es óptimo desde el punto de vista de la gestión, pues no se toman decisiones en tiempo real que permitan ser más eficiente. Así, por ejemplo, en el consumo de energía desde la red de tracción no se considera en ningún momento posibles problemas de saturación en la red de alimentación eléctrica; tampoco establece ninguna consigna que permita establecer la conveniencia o no devolver energía eléctrica a la red (procedente del frenado eléctrico de los trenes), la cual podría ser empleada para usos internos. Por último, no existe una interacción entre los trenes (auténticos consumidores/generadores de energía eléctrica) y el control de la red eléctrica ferroviaria.

Así por ejemplo, actualmente los trenes de Alta Velocidad que circulan por la red española lo hacen con sistemas ATP/ATO, sin ningún tipo de consigna automática que optimice su consumo de energía. De esta manera, con el sistema ATO activado el tren tiende a alcanzar la velocidad máxima permitida en un determinado trayecto de la línea, acelerando de manera continua a los valores máximos establecidos. Como es de esperar, dicho proceso no constituye en sí una manera eficiente de conducción si bien sí pueden establecerse patrones homogéneos de consumo para un mismo tipo de tren en una misma sección de la línea ferroviaria.

En el caso que el tren no lleve activado el sistema ATO y sea el maquinista el que regule la velocidad del tren manualmente, la experiencia demuestra que existe una gran variabilidad en el consumo de energía, existiendo multitud de factores en el cómputo final y muy influenciado con la manera de conducir de cada maquinista. Lógicamente este proceso constituye un proceso menos eficiente que el anterior desde el punto de vista del consumo de energía. Algunos ensayos realizados dan como resultado variaciones máximas de hasta el 8%.

Enfocando la explicación al sistema eléctrico, y según se ha comentado al principio de este apartado, el TPS

tampoco dispone de ninguna regulación ni consigna de operación que permita reducir el consumo de energía de tracción: Suministra energía eléctrica según es demandada por los trenes sin atender a ningún criterio de eficiencia (por ejemplo, número de trenes existentes en un sector eléctrico determinado, optimización de las pérdidas eléctricas en el sistema, etc.). Como se ha indicado se trata de un proceso unidireccional desde la fuente (línea de alimentación eléctrica) al consumidor (tren) en el que el TPS y la línea de alimentación eléctrica se comportan como un sistema de potencia infinita.

De lo anterior puede deducirse por tanto que para reducir el consumo de energía final de tracción en una línea ferroviaria, y las emisiones de CO<sub>2</sub>, podría actuarse sobre los dos aspectos considerados:

- Tren, mediante la introducción de sistemas de control embarcados que, en función de su posición y de su misión (características de su recorrido), permitan indicar al maquinista en todo momento qué acciones debe llevar a cabo para optimizar el consumo de energía.
- TPS, mediante la introducción de sistemas de control centralizados que, en función de las condiciones de tráfico, del sistema de señalización, de las limitaciones de velocidad existentes, de las incidencias vigentes en la explotación, de la configuración eléctrica del TPS, del entorno climatológico, etc., permitan implantar estrategias de ahorro energético en la operación del tráfico ferroviario y establecer consignas de conducción eficiente en un determinado sector eléctrico.

La puesta en marcha de estas dos acciones es un proceso complementario y en ningún caso sustitutivo por lo que la adopción de ambas conllevará a una mejora final del consumo de energía en la línea ferroviaria. Así, respecto al primer aspecto indicado, el gestor del tren podría definir una marcha eficiente para un tren y un escenario dado, pero no consideraría otros posibles factores determinantes del entorno eléctrico y operativo que sí consideraría el segundo aspecto. Ambas medidas consisten como tal en la implantación de prácticas de conducción eficiente en la operación ferroviaria mediante la optimización, configuración, parametrización, etc. que permita la mejora de las funcionalidades de los sistemas automáticos de operación de los trenes y de los sistemas de programación del tráfico y de la señalización ferroviaria.

Se propondría dotar al TPS del concepto de red inteligente mediante la aplicación de las nuevas tecnologías de transformación digital, produciendo los siguientes saltos tecnológicos:

- *Comunicación bidireccional*. Permitirá que el TPS pueda establecer una comunicación bidireccional con una herramienta centralizada de gestión energética –con funciones de inteligencia– de manera que se puedan establecer acciones encaminadas a la optimización de la energía eléctrica demandada por los trenes mediante la parametrización y mejora en el diseño de las marchas ATO.
- *Incorporación y explotación de una herramienta centralizada de gestión energética inteligente* representa-

da por algoritmos que analizarán, diagnosticarán y predecirán las condiciones de la red, la demanda de energía prevista y que además generarán, en base a lo anterior, consignas para la programación eficiente de las marchas de los trenes y de la programación horaria de los mismos.

- *Incorporación en los elementos del TPS de equipos inteligentes de medida y control avanzados* que permitan realizar una gestión en tiempo real de todos esos elementos, a la vez que también permite identificar los consumos de las instalaciones ferroviarias, diferenciándolos de los consumos de los trenes, facilitando una facturación basada según el consumo real de aquéllos y que redundará en un incentivo para la mejora de las técnicas de conducción eficiente y de otras actuaciones de mejora de la eficiencia energética de la operación ferroviaria.

Además, existirá una integración con otros sistemas actualmente existentes, destacando:

- *Telemando de Energía (SCADA)*, permitiendo conocer en todo momento cuál es la topología eléctrica del TPS.
- *Planificación y Gestión de Tráfico*, en lo relativo a la información y características de los trenes que está previsto circulen y su marcha real realizada.
- *Puesto de Control ERTMS (PCE)*, de manera que se disponga de la información de las Limitaciones Temporales de Velocidad (LTV).
- *Herramientas meteorológicas* para conocer, principalmente, la variable temperatura.

Por otra parte, el desarrollo de esta nueva red inteligente podrá llevar asociado los siguientes avances tecnológicos en la infraestructura ferroviaria:

- *Producción de electricidad en la propia infraestructura*, previéndose una micro generación renovable cerca del ámbito donde va a ser consumida (edificios técnicos, instalaciones auxiliares, etcétera).
- *Penetración de los sistemas de almacenamiento* pues como se ha indicado, aportan gran flexibilidad al funcionamiento del sistema en su conjunto. Cabe destacar aquí que los sistemas de almacenamiento ofrecen otras ventajas aparte de los posibles ahorros de energía derivados de su uso. Así permiten mejorar la estabilidad eléctrica del sistema alisando la curva de carga de la subestación o por ejemplo entregando potencia al tren en puntos de la línea con problemas de subtensiones. Esta mayor penetración en el ferrocarril también permitirá desarrollar nuevas tecnologías distintas a las tradicionales (baterías, supercondensadores y volantes de inercia) como es el caso de las baterías de flujo que, por su elevada capacidad, pueden ser muy efectivas para la infraestructura eléctrica ferroviaria.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Abrahamsson, S., Schütte, T., y Östlund, S. (2012). Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies. *Energy for Sustainable Development*, 16(3): pp. 368-378.

- [2] Behmann, U., y Schütte, T. (2012). Cost effectiveness of using static converters in power supply for 50 Hz railways. *Rail Technology Review*.
- [3] Bhargava, B. (1999). Railway Electrification Systems and Configurations. *IEEE Proceedings Conference: Power Engineering Society Summer Meeting*.
- [4] Bin-Kwie, C., y Bing-Song, G. (1996). Three phase models of specially connected transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(1): pp. 323-330.
- [5] Cayón, F., Frax, E., Matilla, M.J., Muñoz, M., y Sáiz, J.P. (1998). *Vías paralelas. Invención y ferrocarril en España (1826-1936)*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE).
- [6] Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE). *Informe de proyecto de investigación ElecRail 2011*. Madrid: FFE.
- [7] Kemps, R. (2008). Los cambios en el sector energético impulsarán la transformación de la tracción ferroviaria (traducido). Artículo publicado en *Railway Gazette*.
- [8] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., y Schneider, E. (2007). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance* (Second edition). Múnich: Publicis.
- [9] Krastev, I., Tricoli, P., Hillmansen, S., y Chen, M. (2016). Advanced electrification systems with static converters for ac railways. *IEEE Electrification Magazine*, 4(3): pp. 6-14.
- [10] Laury, J., Abrahamsson, L., y Östlund, S. (2013). OPF for an HVDC feeder solution for railway power supply systems. Estocolmo: KTH, Royal Institute of Technology.
- [11] Linhofer, G., Maibach, P., y Umbricht, N. (2010). *Static converters, dynamic performance*. *ABB Review*.
- [12] Martínez Acevedo, J.C., Berrios Villalba, A., Iglesias Díaz, J., y Tobajas Guerra, C. (2008). Devolución de energía eléctrica desde el sistema ferroviario a la red de suministro y reaprovechamiento previo. *II Seminario sobre estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario*. Sitges.
- [13] Martínez Acevedo, J.C. (2015). Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I). *Vía Libre Técnica e Investigación Ferroviaria*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE).
- [14] Martínez Acevedo, J.C. (2014). Análisis de las perturbaciones producidas por el sistema eléctrico de potencia de ferrocarriles de alta velocidad alimentados a frecuencia industrial. *Vía Libre Técnica e Investigación Ferroviaria*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE).
- [15] Mingli, W., Chengshan, X., Fan, Y., y Zheng, T.Q. (2006). Performance and mathematical model of three-phase three-winding transformer used in 225kV electric railway. *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, 153(2): pp. 271-281.
- [16] Mochinaga, Y. (2000). Recent Trend of Power Feeding Technique for Electric Railways. *Quarterly Report of RTRI*, 41(4): pp. 144-47.
- [17] Olofsson, M. (1996). *Optimal operation of the Swedish Railway Electrical System. An application of Optimal Power Flow*. Electric Power Systems, Department of Electric Power Engineering. Estocolmo: KTH, Royal Institute of Technology.
- [18] Oura, Y., Mochinaga, Y., y Nagasawa, H. (1998). Railway Electric Power Feeding Systems – Japan Railways. *Transport Review*.
- [19] Pilo de la Fuente, E. (2005). *Optimization of the electrification of railways in alternating current*. Madrid: ICAI.
- [20] Pilo de la Fuente, E., Mazumder, S., y González-Franco, I. (2015). Smart Electrical Infrastructure for AC-Fed Railways with Neutral Zones. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2): pp. 642-652.
- [21] Plakhova, M. (2015). *Development and implementation of a 2x25kV AC bivoltage traction system simulator for high speed railways*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- [22] Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española (PTFE) (2016). *Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE).
- [23] Qunzhan, L. (2014). New generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway. *Journal of Southwest Jiaotong University*.
- [24] Usuka, T., y Nagasawa, H. (2009). *AC Power Supply system for railways in Japan*. Tokio: Railway Technical Research Institute.
- [25] White, R.D. (2007). *AC Electrification Supply Design*. IEE REIS AC.