



**Álvaro López López**

Ingeniero Técnico Industrial en Electrónica Industrial del ICAI (2004). Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial del ICAI (2006). Investigador en formación del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.



**Ramón Rodríguez Pecharromás**

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (2000), promoción 1992. Director del Dpto. de Electrónica y Automática e Investigador del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.



**Paloma Cucala García**

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (2003), promoción 1995. Profesora del Dpto. de Sistemas Informáticos, Coordinadora del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT y Coordinadora del Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.



**Antonio Fernández Cardador**

Licenciado en CC. Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1991) y Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (1997). Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica, Investigador del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT y Director del Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.



# Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos

**Palabras clave:** Transporte, ferrocarril, electrificación ferroviaria, eficiencia energética, frenado regenerativo.

**Key words:** Transportation, railway, railway electrification, energy efficiency, regenerative braking.

## Resumen

Los sistemas eléctricos ferroviarios juegan un papel protagonista en los sistemas de transporte de los países desarrollados. La eficiencia energética de estos sistemas es elevada en comparación con otros modos de transporte. Además, el frenado regenerativo de los trenes permite devolver energía a la red, con lo que se puede reducir notablemente el consumo energético de los mismos. Sin embargo, en los sistemas electrificados en corriente continua (CC) se pueden dar situaciones en las que se no se aproveche todo el potencial del frenado regenerativo. En este artículo se revisan los aspectos fundamentales relacionados con la eficiencia energética de un sistema ferroviario CC, prestando especial atención al aprovechamiento de la energía del frenado. A continuación, se exponen las diferentes técnicas aplicables a la infraestructura de dichos sistemas que permiten mejorarlos. Por último, las técnicas principales (subestaciones reversibles y almacenamiento de energía) se aplican a un caso ejemplo en el que se muestran las características de su funcionamiento y su potencial para el ahorro de energía.

## Abstract:

Electric railway systems are key stones in the transport systems of developed countries. Those systems exhibit high energy efficiency ratios in comparison with other modes. Furthermore, train regenerative braking allows kinetic energy to be returned into the electrical grid, which may lead to significant reductions in energy consumption. However, situations in which it is not possible to make the most of regenerative braking may take place in direct current (DC) systems. In this article, a review of the fundamentals of energy efficiency in a DC railway system is carried out, focusing on the use of regenerative braking energy. Then, different techniques which may be applied to the electrical infrastructure of those systems in order to improve them are listed. Finally, the most common techniques (reversible substations and energy-storage systems) are applied to a case study and their main features and energy saving potential is shown.

## Introducción

En España, el Informe Anual de Consumo Energético del IDAE correspondiente al año 2011 [1] muestra que el sector del transporte representó más del 26% del consumo energético total del país con 35656 ktep (miles de toneladas equivalentes de petróleo), siendo la partida más importante por encima del sector de la industria. El consumo de energía dentro del sector del transporte está acaparado por el transporte por carretera, que representa aproximadamente el 80% del total, mientras que sólo el 2.2% de este consumo total está relacionado con el ferrocarril. Por otra parte, el ferrocarril representa el 1.3% de la energía eléctrica total consumida, siendo responsable del 95% de la energía eléctrica consumida para el transporte. Todo ello le otorga un enorme potencial para llevar a cabo el necesario cambio de energías de origen fósil a otras fuentes de energía.

Los sistemas ferroviarios tienen, por tanto, una importancia notable en los sistemas de transporte de los países desarrollados. Su alta eficiencia energética hace que el ferrocarril presente ventajas significativas con respecto a otros medios, tanto en el transporte de mercancías como en el transporte de pasajeros. En el caso del transporte de pasajeros en las ciudades, su capacidad para transportar a gran cantidad de personas sin emisiones locales le otorga además un gran potencial para reducir los niveles de polución. Las líneas ferroviarias electrificadas añaden también las ventajas asociadas a la energía eléctrica, como la posibilidad de utilizar energías renovables.

Esta alta eficiencia se debe en gran medida a la baja deformación de las ruedas y los raíles (ambos de acero), que conlleva una resistencia al avance por rodadura significativamente menor que en el resto de medios terrestres. Además, la longitud del tren compuesto por un elevado número de coches permite repartir entre más elementos la resistencia aerodinámica al avance, que depende en mayor medida de la superficie de ataque y de cola [2].

A pesar de ello, son continuos los avances en la reducción del consumo de energía en el ferrocarril eléctrico, debido principalmente a la creciente preocupación por el medio ambiente y al hecho de que el gasto energético en tracción representa una de las partidas más importantes del presupuesto de las empresas que gestionan estos sistemas: en el caso del ferrocarril metropolitano de una gran ciudad puede alcanzar valores en torno a los 40 M€. Dicha reducción del consumo de tracción se aborda desde múltiples puntos de vista, dentro de los que se pueden destacar:

- El vehículo: reducción de masa, mejoras aerodinámicas, almacenamiento embarcado de energía, configuración y uso de los servicios auxiliares, etc.
- La infraestructura: trazado de la línea y electrificación: sistema y tensión de alimentación, zonas eléctricamente aisladas, sección de conductores, devolución de energía, almacenamiento no embarcado, etc.
- La operación: diseño de horarios, conducción económica o *eco-driving*, etc.

En el Área de Sistemas Ferroviarios (ASF, <http://www.iit.upcomillas.es/organizacion/asf/>) del Instituto de Investigación Tecnológica (ICAL, Universidad Pontificia Comillas) se han diseñado marchas eficientes para los metros de Barcelona, Bilbao y Madrid. Tras la implementación de dichas marchas en trenes reales, se han medido ahorros en el consumo energético del 13%. Todo el proceso de diseño óptimo de marchas para ferrocarril metropolitano ha quedado recogido en una tesis de reciente publicación en la Universidad [3].

Además, el ASF desempeñó un papel protagonista en el proyecto Elecrail, financiado por el CEDEX y el Ministerio de Fomento y dedicado al análisis sistemático del consumo energético en líneas de ferrocarril metropolitano, de cercanías y de alta velocidad. En el marco de dicho proyecto, en el IIT se desarrollaron los modelos de simulación tanto de los perfiles de consumo de los trenes en sus marchas entre estaciones como del comportamiento de la propia infraestructura eléctrica del sistema.

Una de las conclusiones principales del proyecto Elecrail fue la importante reducción del consumo energético de las líneas de ferrocarril asociada a la devolución de energía a la red durante el frenado regenerativo de los trenes. Sin embargo, como se detallará más adelante, son varios los problemas para la reutilización de la energía regenerada durante el frenado que pueden darse en sistemas alimentados en corriente continua (CC). Debido a la gran cantidad de sistemas CC existentes y a su importancia (metropolitano, cercanías, etc.), este artículo se va a centrar en estos sistemas.

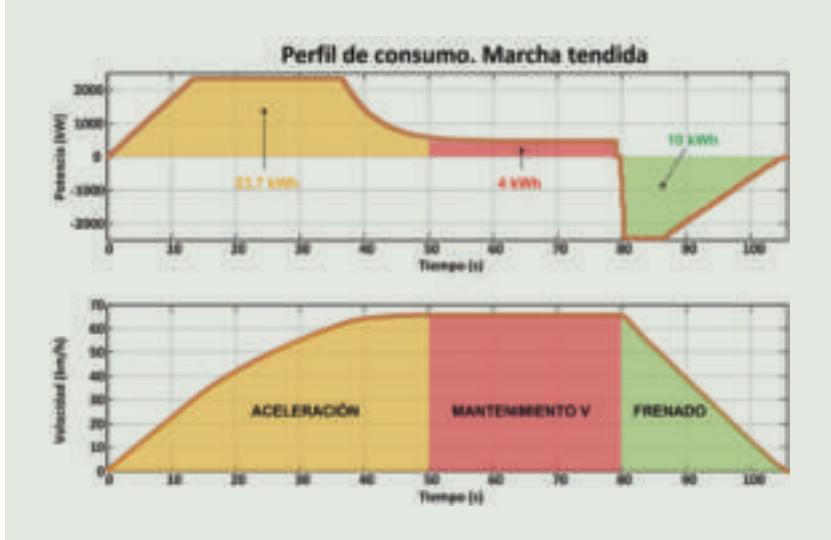
En la actualidad, la mayoría de los vehículos ferroviarios permite, durante el proceso de frenado, volver a convertir la energía cinética almacenada en los mismos en energía eléctrica. Es decir, incluyen entre los distintos sistemas de frenado el freno eléctrico. El sistema de freno eléctrico puede:

1) enviar la energía del frenado a resistencias que el tren incorpora para tal efecto, lo que se conoce como freno reostático.

2) Posibilitar la reutilización de esta energía para otros fines siempre que sea posible (**frenado regenerativo**). En el caso particular de sistemas ferroviarios electrificados, la interconexión entre los diferentes vehículos en la red permite que otros trenes que se encuentren en fase de tracción (consumiendo potencia) empleen la energía devuelta durante los frenados, pudiendo obtenerse reducciones importantes del consumo en subestaciones.

La Figura 1 permite obtener una idea del potencial del frenado regenerativo para la reducción del consumo en sistemas eléctricos ferroviarios. En ella se muestra la potencia en pantógrafo y el perfil de velocidad de un tren de tipo metropolitano que recorre el trayecto entre dos estaciones separadas 1.4km sin ningún desnivel y empleando el mínimo tiempo posible (marcha tendida). Se han distinguido tres fases distintas en la marcha del tren: una primera en la que, con un determinado rendimiento, la potencia consumida se emplea en acelerar el vehículo; una segunda fase en la que

Figura 1. Consumo y regeneración de un tren de tipo metropolitano en su marcha entre dos estaciones



el consumo se emplea en mantener la velocidad; y la última fase en la que se frena el tren y en la que se podría devolver una determinada fracción de la energía cinética almacenada en el mismo.

Los consumos durante las tres fases mencionadas en el ejemplo son de 23.7kWh, 4kWh y -10kW respectivamente. La energía devuelta durante la fase de frenado representa el 44% de la energía consumida para acelerar al tren y el 38% de la empleada en las dos fases en las que el tren es consumidor de potencia.

Si otro tren en el mismo cantón eléctrico que el analizado realizara una marcha con el mismo perfil de consumo y en la que la tracción coincidiera con el frenado de éste, no tendría que consumir toda la potencia de las subestaciones del sistema. De hecho, despreciando pérdidas, el consumo de subestaciones para suministrarle la potencia requerida podría llegar a ser un 38% menor gracias al frenado regenerativo. Estos resultados muestran el enorme potencial de ahorro que representa este tipo de frenado en el consumo de sistemas eléctricos ferroviarios.

En la práctica, una reducción tan elevada del consumo no es alcanzable debido a muchos factores, como las pérdidas por efecto Joule en los conductores de la red ferroviaria y el rendimiento de las conversiones. Además,

la normativa aplicable a estas redes (UIC-600) prohíbe que la tensión en cualquier punto de la red alcance valores superiores al 20% de la tensión estandarizada (salvo para las redes a 750V, en las que este requisito se relajó a 1000V (33%) para mejorar su funcionamiento). Debido a que la regeneración de potencia conlleva una elevación de la tensión en pantógrafo, se hace necesario que los trenes con frenado regenerativo también incorporen reóstatos para disipar el exceso de potencia regenerada y evitar así eventos de sobretensión.

Como se verá en la siguiente sección, estos eventos son bastante recurrentes en redes electrificadas en corriente continua (CC), lo que puede hacer que en determinadas situaciones no se aproveche todo el potencial del frenado regenerativo.

En este artículo se mencionan diferentes técnicas para incrementar la eficiencia energética de las redes ferroviarias electrificadas en CC, poniendo especial interés en aquéllas en las que este objetivo se alcanza a través de la mejora de la infraestructura eléctrica. El beneficio será mayor en la medida en que se facilite un mayor aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo. Además, se revisan las principales propiedades de este tipo de sistemas, así como las técnicas empleadas para el análisis de los mismos.

## Receptividad a la energía regenerada

Los sistemas eléctricos ferroviarios pueden ser de corriente alterna (CA) o de corriente continua. En los primeros, la tensión nominal de alimentación de los trenes puede alcanzar valores de hasta 25kV, mientras que en los segundos la máxima tensión estandarizada es de 3kV. Por lo tanto, las pérdidas de transmisión serán mucho mayores en sistemas CC para la misma potencia útil.

Además, en los sistemas CA la conexión de la red ferroviaria con la red eléctrica exterior se lleva a cabo mediante transformadores, que permiten el intercambio de potencia entre los dos sistemas en ambos sentidos. En el caso de los sistemas CC, el enlace con la red de compañía se lleva a cabo mediante convertidores CA/CC (rectificadores). En la inmensa mayoría de los casos, estos convertidores están formados por diodos y sólo permiten flujos de potencia de la red de compañía hacia la red ferroviaria. Como consecuencia, los intervalos de tiempo en los que la regeneración de potencia es mayor que el consumo en el sistema CC son problemáticos, debido al excedente de potencia generada sin consumidor. En general, estos excedentes de potencia serán enviados a reóstatos, y por lo tanto desaprovechados.

Se puede definir el concepto de **receptividad** como la capacidad de un determinado sistema ferroviario para aceptar la energía devuelta por los trenes durante el frenado. Desafortunadamente, existen situaciones o prácticas que pueden deteriorar la receptividad de una red ferroviaria, de entre las que cabe destacar las siguientes:

- Potencia regenerada mayor que la potencia consumida: En los instantes en los que la potencia que devuelven los trenes frenando es mayor que la que consumen el resto de trenes, la tensión en la red tenderá a subir. En sistemas CA el exceso de potencia será enviado a la red externa sin provocar cambios significativos en la misma, por lo que por regla general la tensión máxima en la red ferroviaria

ria se mantendrá por debajo de la máxima permitida. Por el contrario, en sistemas CC con subestaciones unidireccionales el exceso de potencia provocará en general que se alcance la tensión máxima autorizada en algún tren, por lo que será necesario enviar parte de la potencia a reóstatos. Aunque las situaciones en las que la regeneración supera al consumo son poco probables en escenarios de hora punta, sí que se dan de forma recurrente cuando el intervalo entre trenes crece. Por lo tanto, puede decirse que los **sistemas ferroviarios CC** son susceptibles de presentar **problemas de receptividad**, especialmente en las franjas horarias en las que se opera con intervalos entre trenes amplios (hora valle).

- Distancia elevada entre regeneración y consumo: Para que se transmita potencia de un tren a otro, tendrá que haber una diferencia de tensión entre los mismos debidos a la caída en los conductores que los conectan. Evidentemente, cuanto mayor sea la distancia entre el punto de regeneración y el de consumo, mayor será la caída en los cables y por tanto mayor probabilidad habrá de que se alcance la tensión máxima permitida.

- Tensión media de red elevada: En redes ferroviarias débiles es frecuente que se eleve de forma intencionada el nivel de la tensión de vacío en subestaciones para evitar posibles problemas de caída de tensión. Esta práctica, además de dificultar la aparición de tensiones excesivamente bajas, reduce las pérdidas de conducción. Sin embargo, también reduce el margen de tensiones para regenerar, con el consecuente deterioro de la receptividad.

Aunque presentan los problemas expuestos, los sistemas ferroviarios alimentados en CC son muy numerosos, especialmente en el ámbito metropolitano y de cercanías. Estos sistemas son, como se ha visto, susceptibles de ser mejorados desde el punto de vista energético. A continuación se describe su funcionamiento con mayor grado de detalle y se muestran diversas estrategias con las que se puede mejorar su eficiencia energética.

## Factores que influyen en el consumo en sistemas CC

En los sistemas ferroviarios CC la energía que se consume en subestaciones de tracción será, evidentemente, un reflejo de la potencia útil que se demande. Puede entenderse como potencia útil en estos sistemas la suma de la potencia empleada para tracción y la empleada para alimentar a los servicios auxiliares del tren (aire acondicionado, iluminación, información al viajero, etc.)

La Figura 2 representa el *diagrama de Sankey* de un sistema eléctrico ferroviario alimentado en CC. En ella puede observarse cómo la energía útil, compuesta por la energía empleada tanto para tracción como para servicios auxiliares, se obtiene de la catenaria, salvo una fracción de auxiliares que se alimenta directamente de la propia energía del frenado sin salir del propio tren.

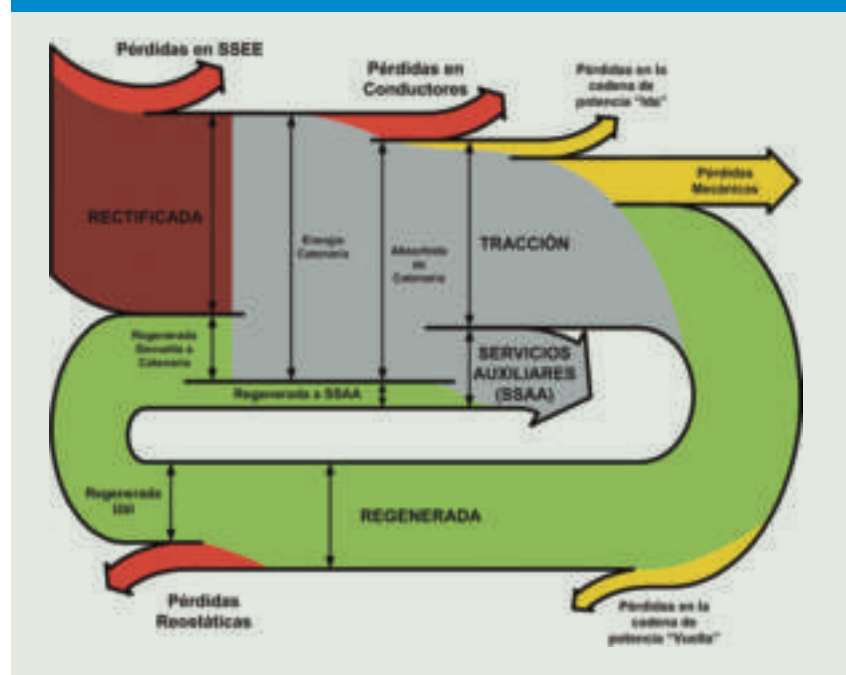
La energía consumida para tracción se convertirá en energía cinética, descontando las pérdidas en los elementos presentes en la cadena de potencia del tren, las pérdidas mecánicas por resistencia al avance, la variación de energía potencial del tren y la alimentación de los equipos auxiliares. Cuando los trenes incorporan frena-

do regenerativo, parte de esa energía cinética puede ser devuelta al sistema a través de la cadena de potencia en sentido inverso, tras descontar las pérdidas de resistencia al avance, la variación de energía potencial y las pérdidas por el empleo de otros sistemas de frenado que se combinan con el eléctrico (agrupadas como “pérdidas mecánicas”). Las tres fuentes de pérdidas mencionadas, en color amarillo en la Figura 2, se pueden ver reducidas mejorando el diseño del tren.

Hay otras tres fuentes de pérdidas, representadas en rojo en la Figura 2, que dependen de la propia infraestructura del sistema:

- Pérdidas en subestaciones: Representan las pérdidas en los transformadores y en los rectificadores de las subestaciones. Su magnitud estará relacionada con el dimensionamiento de la potencia de las mismas. Como se verá más adelante, si se emplean almacenadores de energía para la mejora de la infraestructura eléctrica, estas pérdidas pueden verse reducidas por el efecto de suavizado del perfil de carga de las subestaciones asociado a estos dispositivos.
- Pérdidas en conductores: Dependen de la sección y están relacionadas de forma directa con el cuadrado de la

Figura 2. Flujos de energía en una red ferroviaria CC



corriente en los conductores. Por lo tanto, acciones como la elevación de la tensión de las subestaciones pueden tener efectos apreciables sobre las mismas. Otras acciones como la inclusión de elementos que disminuyan de forma efectiva la distancia promedio entre los centros de generación y consumo pueden tener también efectos beneficiosos sobre las pérdidas en conductores, aunque en menor medida.

- Pérdidas en reóstatos: Tienen su origen en la falta de receptividad momentánea del sistema, lo cual en gran medida se deberá a excesos puntuales de energía regenerada. Estas situaciones, poco probables en momentos de tráfico denso en la red, son bastante recurrentes cuando el número de trenes en circulación en el sistema disminuye. Sistemas como subestaciones reversibles o almacenadores de energía pueden ayudar a reducirlas de forma notable, como se verá en la siguiente sección.

Como puede apreciarse en la Figura 2, la magnitud de las pérdidas en reóstatos afecta de forma directa al consumo en subestaciones. En estas condiciones, se puede desperdiciar en parte el tremendo potencial de ahorro del frenado regenerativo, que algunos estudios han estimado superior al 30% sobre la energía consumida en subestaciones sin la presencia de este sistema de frenado [4].

Parece pues importante propiciar que el sistema sea siempre receptivo a la energía regenerada. Aunque para ello pueden diseñarse los horarios de operación del sistema tratando de maximizar la sincronización de los frenados y las aceleraciones en la red [5], en la práctica esta sincronización es difícil de llevar a cabo.

Este artículo se centra entonces en otra estrategia, consistente en implementar las mejoras oportunas en la infraestructura eléctrica del sistema, para evitar que las situaciones de baja receptividad tengan lugar. En la siguiente sección se muestra una breve revisión de las diferentes técnicas que se emplean en la actualidad, así como un breve ejemplo de aplicación de las mismas a un sistema concreto.



## Elementos avanzados para el ahorro de energía

Las principales tendencias actuales para el ahorro de energía en sistemas ferroviarios CC orientadas a incrementar la receptividad se resumen en dos estrategias:

- Subestaciones reversibles, que permiten devolver a la red de compañía los excesos puntuales de potencia en el sistema. En España, cambios recientes de la legislación aplicable han hecho que se remunere la energía devuelta a la red eléctrica de la compañía, lo cual resulta un incentivo más para la aplicación de estos sistemas. Así, la línea 1 de Metro de Bilbao incorpora actualmente algunas subestaciones reversibles.

- Almacenadores de energía, que permiten acumular temporalmente los excesos de energía en el sistema para devolverlos posteriormente cuando la red ferroviaria vuelva a ser consumidora de potencia. Los almacenadores de energía pueden disponerse en puestos fijos o embarcados en los trenes. En sistemas como el tranvía de Sevilla o Zaragoza se emplea almacenamiento embarcado para permitir circular por tramos no electrificados, mientras que Metro de Madrid emplea el almacenamiento en puestos fijos para mejorar la eficiencia energética de la red.

Además, pueden encontrarse estudios sobre la viabilidad de la aplicación de técnicas novedosas para conseguir incrementar la receptividad. En concreto, [6] introduce la posibilidad de emplear una línea superconductora para la alimentación de los trenes. Los resultados parecen indicar que esta

tecnología podría ser viable a medio plazo.

Las subestaciones reversibles pueden construirse como un solo convertidor bidireccional, o bien empleando un convertidor en paralelo con otro unidireccional. La primera solución parece óptima cuando se plantea el diseño de la subestación para una infraestructura nueva. La segunda representa en muchos casos la opción más adecuada en sistemas ya en funcionamiento que plantean problemas de receptividad [7], pues permite conservar el rectificador original y además dimensionar razonablemente el convertidor inversor (la potencia en dirección inversa es menor que en la dirección habitual). Existen diversos enfoques para el diseño de este convertidor adicional llevados a cabo recientemente en España y Europa [8, 9]. En cualquier caso, las tecnologías empleadas son tecnologías tremendamente maduras.

En el caso de los dispositivos almacenadores de energía, la tecnología está en continuo desarrollo, tanto en lo que respecta al elemento empleado para el almacenamiento de energía como en las técnicas para el control óptimo de la carga y descarga de estos dispositivos. Se pueden distinguir dos usos principales de estos equipos: apoyo al mantenimiento de la tensión y ahorro de energía. El control del dispositivo varía en cierta medida según cuál de los dos sea el objetivo prioritario en una instalación determinada.

Las tecnologías de almacenamiento se caracterizan fundamentalmente por exhibir unas determinadas densidades de energía y de potencia. La pri-

mera magnitud determina la energía almacenable por unidad de volumen, mientras que la segunda se refiere a la rapidez con que puede almacenarse o devolverse dicha energía. En sistemas ferroviarios, las principales tecnologías empleadas en la actualidad son:

- Condensadores de doble capa o supercondensadores: A día de hoy, se caracterizan por altas densidades de potencia. Este hecho los hace ideales para su empleo como estabilizadores de tensión en redes con problemas de caída (e.g. subestaciones demasiado alejadas de puntos de fuerte consumo), y algo menos para su empleo como elementos para incrementar la receptividad. Sin embargo, estudios recientes parecen indicar que la densidad de energía de estos dispositivos puede incrementarse notablemente [10].
- Volantes de inercia: Presentan mayores densidad de energía que los supercondensadores. Existen ejemplos de aplicación de esta tecnología al ámbito ferroviario en España [11].
- Baterías: Dentro de las mismas, la tecnología de Lítio-Ion presenta las mejores características de densidad de energía sin efecto memoria y con un coste de mantenimiento bajo. No obstante, se esperan mejoras en otras tecnologías como el níquel-hidruro metálico [12].

En cuanto a las curvas de control de estos dispositivos, se diseñan para inducir su carga cuando la tensión en el punto donde se conectan es alta y descargarse cuando es baja. En apli-

caciones orientadas al incremento de la receptividad (con el consecuente ahorro de energía) se fomenta que estos dispositivos sean, en la medida de lo posible, receptivos. Es decir, interesa devolver la energía almacenada cuanto antes para evitar eventos en los que no se pueda realizar una nueva carga con energía regenerada por encontrarse el almacenador lleno.

### Ejemplo de aplicación

A continuación se muestra un ejemplo de los resultados en el consumo en una subestación y en las pérdidas en reóstatos, cuando se utiliza un convertidor inversor en paralelo con el rectificador previo y de un almacenador de energía.

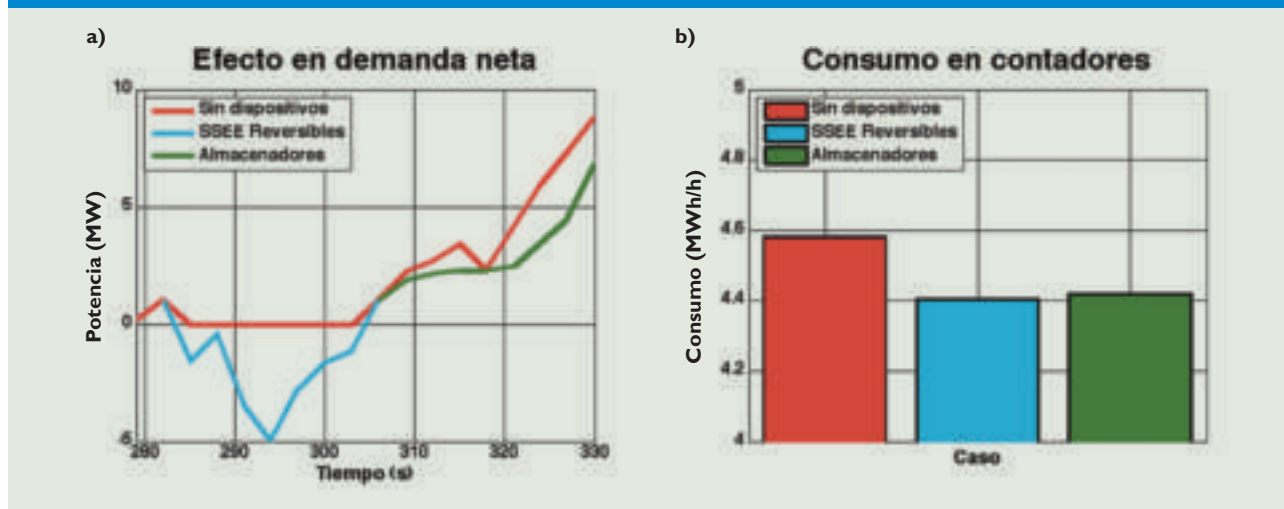
La topología de los circuitos eléctricos a estudiar en cada momento varía debido al movimiento de los trenes. Por ello, en la inmensa mayoría de los casos los estudios sobre la infraestructura eléctrica ferroviaria se desarrollan por medio de herramientas de simulación multi-tren. Para obtener los resultados mostrados en este ejemplo se ha utilizado un simulador desarrollado en el Instituto de Investigación Tecnológica (ICAI, Universidad Pontificia Comillas). Este simulador está orientado a la realización de estudios energéticos y combina una herramienta flexible de generación de escenarios de tráfico con un algoritmo específico para la resolución de los flujos de cargas tanto en sistemas CA como CC [13].

La red simulada representa una red típica de ferrocarril metropolitano. Los resultados de la simulación para diferentes intervalos entre trenes muestran que dicha red presenta problemas de receptividad, entre otros, para un intervalo de 5 minutos y medio entre trenes. Este hecho implica que la inclusión de dispositivos como subestaciones reversibles y almacenadores de energía llevará a un determinado ahorro en contadores de subestación.

La Figura 3 muestra los resultados de una simulación en la línea de ferrocarril metropolitano, en términos de energía, tras la inclusión de subestaciones reversibles por un lado y de almacenadores de energía por otro. En ambos casos dichos dispositivos se han localizado en todas las subestaciones del sistema.

En la Figura 3.a se observa un detalle de los efectos principales de uno y otro dispositivo sobre la demanda de potencia neta del sistema (en contadores de las subestaciones). En el primer tramo (290 a 300s) la potencia neta del sistema es negativa, "sobra energía". Si no hay dispositivos, la potencia en subestaciones es cero y el excedente se consumirá en los reóstatos. Si hay subestaciones reversibles la potencia es negativa, absorbiendo el exceso para entregarlo a la red de la compañía eléctrica. Se produce un ahorro de energía que se traduce en ahorro económico si la legislación permite descontar esa energía de la factura del operador ferroviario, como ocurre en España desde no

Figura 3. Efectos de la inclusión de subestaciones reversibles y almacenadores



hace mucho tiempo. Si hay almacena-  
dores, durante este periodo se cargan.  
En el segundo tramo la potencia neta es  
positiva, que es la situación más habitual.  
Si hay subestaciones reversibles, su fun-  
cionamiento en este tramo es el mismo  
que si fueran normales. Si hay acumu-  
ladores, entregarán parte de la energía  
que tenía acumulada según la evolución  
de la tensión de catenaria, produciendo  
un efecto beneficioso de suavizado de  
las curvas de carga de las subestaciones.  
Con ambos dispositivos se ha evitado, al  
menos en parte, que la energía sobran-  
te se desperdicie en los reóstatos.

La Figura 3.b muestra la reducción  
en el consumo total en contadores de  
subestación. El ahorro obtenido es algo  
mayor en el caso de las subestaciones  
reversibles, debido principalmente a que  
el almacenador se ha simulado con un  
límite realista de potencia y de energía.  
La subestación reversible, por el contra-  
rio, no tiene límite de energía (ya que la  
entrega a la red de compañía) y se ha  
simulado sin límite de potencia (cerca-  
no a la realidad dependiendo de su dimen-  
sionamiento). Además, el rendimiento  
del acumulador es menor que el de la  
subestación reversible. De cualquier  
manera, en ambos casos el ahorro obte-  
nido se sitúa en torno a 200kWh/h, lo  
que supone algo más del 4% del consu-  
mo total en subestaciones si no cuentan  
con ningún dispositivo.

Es importante notar que para extraer  
conclusiones sobre la rentabilidad de la  
inversión en cualquiera de los dispositi-  
vos se requiere un estudio detallado  
para todos los intervalos entre trenes  
a los que se opere la red. Además, se  
precisa ponderar adecuadamente los  
resultados obtenidos para cada inter-  
valo (número de horas al día de hora  
punta, valle, etc.), teniendo en cuenta las  
estacionalidades tanto semanales como  
anuales del tráfico en dicha red. Sólo  
así se puede obtener un resultado de  
ahorro energético válido que, una vez  
traducido a ahorro económico, pueda  
ponerse en relación con los costes de  
inversión y mantenimiento asociados a  
los elementos que se contemple incluir.

## Conclusiones

En el artículo se presenta una revisión  
de las características de los sistemas

eléctricos ferroviarios. De la misma se  
concluye que los sistemas alimentados  
en corriente continua (CC) pueden  
presentar en ocasiones un deterioro  
significativo de su receptividad a la ener-  
gía regenerada durante el frenado, lo  
que puede limitar el aprovechamiento  
del enorme potencial de ahorro de esta  
técnica.

Existen numerosos sistemas ferrovia-  
rios alimentados en CC, especialmente  
en el ámbito del ferrocarril metropoli-  
tano y de cercanías, que son por tanto  
susceptibles de mejora desde el punto  
de vista de la eficiencia energética.

Entre las distintas estrategias para re-  
ducir el consumo, existe la posibilidad  
de implementar mejoras en la infraes-  
trutura para aprovechar la energía del  
frenado. En la actualidad, se dispone de  
tecnologías que lo permiten, como las  
subestaciones reversibles o los dispositi-  
vos almacenadores de energía. Además,  
en el caso de estos últimos, la tecnología  
está evolucionando notablemente.

Aunque ambas técnicas llevan a re-  
sultados de ahorro parecidos, existen  
ciertos matices en el funcionamiento de  
una y otra. Aunque los almacenadores  
de energía pueden adolecer de ciertas  
limitaciones de potencia y presentan en  
la actualidad costes de mantenimiento  
elevados, su efecto de suavizado de las  
curvas de carga en las subestaciones tie-  
ne efectos beneficiosos para la red.

La evaluación del potencial de ahorro  
de estas redes requiere de un estudio  
particularizado para el sistema suscep-  
tible de mejora en el que se quieran  
aplicar. Conviene notar que para poder  
extraer conclusiones adecuadas desde  
el punto de vista económico (inversión),  
es necesario que este estudio refleje  
adecuadamente las condiciones de ex-  
plotación de la red. Para ello, las situacio-  
nes de tráfico analizadas deben reflejar  
adecuadamente las situaciones reales y  
los estudios deben realizarse teniendo  
en cuenta las estacionalidades, tanto se-  
manales como anuales de la red.

## Agradecimientos

La tesis doctoral de Álvaro López  
López, en la línea de investigación en la  
que se enmarca este artículo, está par-  
cialmente financiada por la Asociación  
de Ingenieros del ICAI. ■

## Referencias

- [1] IDAE, "Informe anual de consumos energé-  
ticos. Año 2011," Marzo, 2013.
- [2] A. García, E. Pilo, A. Fernández-Cardador  
and A. P. Cucala, "Planteamientos energé-  
ticos en el transporte" in *El Ingeniero del  
ICAI y el Desarrollo Sostenible*, Editores  
Sancha Gonzalo, J.L. et al. Ed. Asociación  
Nacional de Ingenieros del ICAI. Madrid,  
2009.
- [3] M. Domínguez, "Conducción eficiente de  
trenes metropolitanos con ATO". Tesis  
doctoral. Universidad Pontificia Comillas.  
Madrid, 2013.
- [4] W. Günselmann, "Technologies for increa-  
sed energy efficiency in railway systems" in  
2005 IEEE 11th European Conference on  
Power Electronics and Applications, 2005.
- [5] M. Peña, A. Fernández, P. Cucala, A. Ramos  
and R. R. Pecharromán, "Optimal under-  
ground timetable design based on power  
flow for maximizing the use of regenera-  
tive-braking energy" *Proceedings of the  
Institution of Mechanical Engineers, Part F:  
Journal of Rail and Rapid Transit*. vol. 226, pp.  
397-408, Julio 2012.
- [6] R. Takagi, "Preliminary evaluation of the  
energy-saving effects of the introduction of  
superconducting cables in the power feed-  
ing network for DC electric railways using  
the multi-train power network simulator" *IET  
Electrical Systems in Transportation*,  
vol. 2, pp. 103-109, 09/01, 2012.
- [7] R. Takagi, "Energy Saving Techniques for the  
Power Feeding Network of Electric Rai-  
lways" *IEEE Transactions on Electrical and  
Electronic Engineering*, vol. 5, pp. 312-316,  
05, 2010.
- [8] H. Ibaiondo and A. Romo, "Kinetic energy  
recovery on railway systems with feedback  
to the grid" *WCRR 2011*, 22-26 May, 2011.  
Lille, France.
- [9] D. Cornic, "Efficient recovery of braking  
energy through a reversible dc substation"  
in *2010 Electrical Systems for Aircraft, Rai-  
lway and Ship Propulsion (ESARS 2010)*,  
2010.
- [10] R. Signorelli, D. C. Ku, J. G. Kassakian and J. E.  
Schindall, "Electrochemical double-layer  
capacitors using carbon nanotube electrode  
structures" *Proceedings of the IEEE*, vol. 97,  
pp. 1837-1847, 11/01, 2009.
- [11] M. Lafoz, D. Ugena, C. Vazquez, F. Toral, L.  
García-Tabares and J. Lucas, "A 200 kVA  
prototype of kinetic energy storage system  
based on switched reluctance machine tech-  
nology" in 2005.
- [12] T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara and M.  
Tsutakawa, "Fixed Energy Storage Techno-  
logy Applied for DC Electrified Railway"  
*IEEE Transactions on Electrical and Electro-  
nic Engineering*, vol. 5, pp. 270-277, 05, 2010.
- [13] A. J. López López, R. R. Pecharromán, E. Pilo,  
A. P. Cucala and A. Fernández-Cardador,  
"Analysis of energy-saving strategies in  
railway power supply systems" *9th World  
Congress on Railway Research - WCRR  
2011*, 22-26 May, 2011. Lille, France.