Aplicación de volantes de inercia para la mejora de la eficiencia en el transporte ferroviario

MARCOS LAFOZ PASTOR (*), LUIS GARCÍA-TABARÉS RODRÍGUEZ (**) y CRISTINA VAZQUEZ VÉLEZ (***)

RESUMEN El incremento del consumo energético del transporte ferroviario supone la necesidad de un continuo desarrollo tecnológico para mejorar la eficiencia energética de los trenes. Una de las medidas que se pueden tomar es la utilización de almacenamiento de energía. Dentro de las posibles alternativas que tiene sentido utilizar se analiza el almacenamiento cinético de energía basado en volantes de inercia. El artículo explica las bases de funcionamiento de estos dispositivos, los tipos de volantes de inercia y cuáles son sus figuras de mérito. Después de comentar algunas soluciones comerciales existentes se hace un recorrido por los desarrollos que han resultado de la colaboración durante los últimos años de los grupos de investigación del CEDEX y el CIEMAT y concretamente de las aplicaciones a transporte ferroviario. En concreto se explica en detalle la aplicación de un volante de inercia para el aprovechamiento de la energía del frenado y estabilización de la catenaria ferroviaria en una subestación de ADIF. Se describe la instalación, la operación del sistema y se muestran resultados experimentales así como un análisis de la eficiencia del sistema.

THE APPLICATION OF FLYWHEELS TO IMPROVE THE EFFICIENCY IN RAILWAY TRANSPORTATION

ABSTRACT *The increase of the energy consumption in railway transportation forces a continuous development of the technology in order to improve the efficiency of trains. One of the ways would be the application of energy storage. Among the different solutions, the use of kinetic energy storage based on flywheels is analyzed. The paper explains the basics of these devices, the types of flywheels and the important figures of merit. After mentioning some commercial appliances, a run through the developments resulting from the collaboration between CEDEX and CIEMAT research groups is carried out, focussing on railway transportation applications. In particular, it is detailed the use of a flywheel for the recuperation of the breaking energy and railway feeder line stabilization in a substation from ADIF (Railway Infrastructures Manager). The testing facility, the system operation and the experimental results are described, as well as an analysis of the system efficiency.*

Palabras clave: Eficiencia energética, Transporte ferroviario, Almacenamiento de energía, Volantes de inercia.

Keywords: Energy efficiency, Railway transportation, Energy storage, Flywheels.

1. INTRODUCCIÓN

En España, el consumo eléctrico del transporte ferroviario ha aumentado un 6% anualmente desde 2002, debido principalmente a las líneas de alta velocidad que se han ido poniendo en operación durante los últimos años. Aunque uno de los argumentos para defender este desarrollo es que es el medio de transporte que consume menos energía por pasajero, supone un coste de energía enorme por lo que exige una continua mejora, principalmente en términos de seguridad y ahorro energético.

El ahorro de energía, la calidad del suministro, la fiabilidad, la reducción de picos de potencia, la capacidad de aceleración en el arranque y las caídas de tensión en la catenaria son algunos de los temas a considerar cuando se habla de investigación en transporte ferroviario. Estos aspectos resultan especialmente problemáticos cuando se trata de catenarias de corriente continua, es decir, en trenes de cercanías, trenes ligeros y metro. En estos casos, debido a la tecnología de rectificadores de diodos en las subestaciones eléctricas, sólo se permite el flujo de potencia desde la red hacia la catenaria y no en sentido contrario. Esto, que por un lado simplifica la subestación eléctrica y su conexión a la red de transporte eléctrico, por otro lado supone la imposibilidad de realizar un frenado regenerativo (con devolución de energía eléctrica), con la consecuente pérdida de energía que ADIF ha estimado que puede llegar hasta un 20% de la energía consumida.

La primera alternativa a este problema es la revisión de la tecnología de las subestaciones, convirtiéndolas en subestaciones reversibles que sean capaces de inyectar potencia a la red desde la catenaria cuando se disponga de una cantidad de energía procedente del frenado, con lo que se reducirían los problemas de seguridad eléctrica en el sistema. La segunda alternativa interesante es el almacenamiento de energía la cual permite un escenario de utilización de la energía mucho más amplio [1], pudiendo llegar a entender la subestación ferroviaria como una microrred. De esta segunda solución es de la que se hablará más detalladamente en este artículo.

(*) Director de Programa en la Unidad de Ingeniería Eléctrica del CIEMAT. Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. E-mail: marcos.lafoz@ciemat.es

(**) Jefe de la Unidad de Ingeniería Eléctrica del CIEMAT. Dr. Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid. E-mail: luis.garcia@ciemat.es

(***) Investigadora Titular en la Unidad de Ingeniería Eléctrica del CIEMAT. Doctora en Ingeniería Electrónica por la Universidad Complutense de Madrid. E-mail: cristina.vazquez@ciemat.es

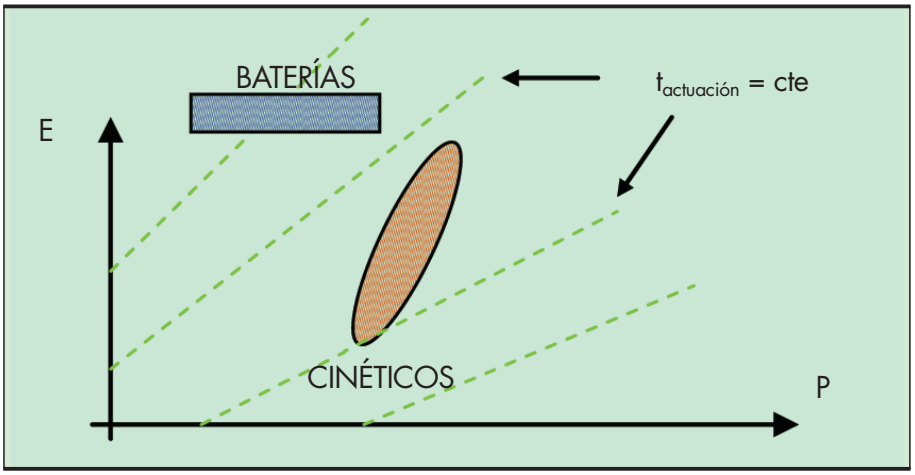

FIGURA 1. Diagrama de Ragone de un Almacenador de Energía.

2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Independientemente de la tecnología de almacenamiento utilizada [2][3], cualquier sistema puede especificarse por tres variables genéricas que, a su vez, están relacionadas entre sí. Estas variables son: la *Energía* (*E*) o capacidad, la *Potencia* (*P*) o tasa de transferencia de energía y finalmente el *tiempo de actuación* (*t*) durante el cual el sistema puede estar almacenando o liberando energía. Mientras que las dos primeras variables son independientes, la segunda no es más que el cociente entre ambas, aunque suele ser conveniente indicarla de forma explícita.

Una forma muy corriente de visualizar las posibilidades de un sistema de almacenamiento es mediante su diagrama de Energía-Potencia o diagrama de Ragone (Figura 1) que resulta ser una herramienta útil para comparar diferentes tecnologías de almacenamiento [4]. Consiste, simplemente, en definir un almacenador por sus dos coordenadas: *potencia* y *energía* y en representar el punto correspondiente en el plano. En la misma gráfica se suelen añadir rectas de diferente pendiente, es decir diferentes cocientes E/P correspondientes a distintos tiempos de actuación. Los almacenadores cinéticos (también denominados volantes de inercia), por ejemplo, se encuentran en una posición intermedia en estos diagramas (alrededor de la bisectriz), mientras que un sistema basado en baterías se sitúa más a la izquierda en el diagrama, como indica en la misma figura.

El tiempo de actuación de un almacenador de energía permite dividir los diferentes sistemas existentes en Sistemas de Corto Plazo (con tiempos del orden de las decenas de segundos) y los de Largo Plazo, con tiempos que pueden llegar a varios minutos o incluso horas.

La siguiente decisión a tomar es: ¿qué tipo de almacenamiento de energía es más apropiado para una determinada aplicación? No tiene una respuesta fácil puesto que depende del problema concreto que se quiera abordar. La mayoría de los trabajos publicados e investigaciones en los últimos años están basadas en las tecnologías de baterías [5], ultracondensadores (condensadores con capacidad del orden de miles de faradios) pero se pueden considerar otras opciones interesantes como volantes de inercia.

Centrándonos en la aplicación de transporte ferroviario, las opciones de almacenamiento a bordo del vehículo suelen ser más eficientes teniendo en cuenta que actúan muy cerca del consumo y se pierde menor cantidad de potencia en la transmisión. Por otro lado suponen un peso añadido y un requerimiento de espacio del que a veces no se puede disponer, por lo que las aplicaciones de almacenamiento no embarcadas, conectadas a la catenaria ferroviaria, pueden ser una opción casi necesaria. De entre este grupo de soluciones, el almacenamiento cinético de energía basado en volantes de inercia (FESS) resulta una solución atractiva por tres razones principales: que se pueden conseguir elevados niveles de densidad de potencia y energía, que el coste total no crece linealmente con el nivel de potencia y energía como ocurre, por ejemplo, en el caso de las baterías; y que la instalación en una localización estática, cercana a la subestación de suministro de la catenaria puede reducir el impacto en la red eléctrica de suministro.

3. ALMACENAMIENTO CINÉTICO DE ENERGÍA

Este tipo de sistemas está basado en el almacenamiento energía cinética en un volante de inercia accionado por una máquina eléctrica que trabaja como motor para acelerarlo cuando se quiere acumular energía y como generador para frenarlo cuando se quiere liberar energía [5]. La cuestión relevante en un sistema de almacenamiento es cuánta energía se puede almacenar por unidad de masa o de volumen (incluso a veces se prefiere por unidad de coste). En el caso particular de un volante de inercia se puede almacenar teóricamente toda la energía que se quiera con tal de hacer el volante suficientemente grande. La cuestión es hacerlo de forma eficaz y dentro de los límites que permita la tecnología. La resistencia de materiales proporciona dos expresiones muy sencillas y potentes derivadas del cálculo de los esfuerzos centrífugos en un volante en rotación [6]. Estas expresiones para la energía por unidad de masa (e_M) y para la energía por unidad de volumen (e_V) son:

$$e_M = \zeta \cdot \sigma / \rho \qquad (1.a)$$

$$e_V = \zeta \cdot \sigma \qquad (1.b)$$

En estas ecuaciones σ es la carga de rotura del material del volante, ρ su densidad y ζ un factor geométrico que depende de la forma del mismo (un disco macizo tiene, por ejemplo, un factor de 0.61 mientras que un anillo lo tiene de 0.30. En el mejor caso se consigue un factor de 0.87). Las fórmulas (1.a) y (1.b) permiten establecer un criterio sencillo para conocer cuáles son los materiales óptimos para su utilización en volantes de inercia: aquellos con una elevada carga de rotura y baja densidad serán los más adecuados para conseguir mayores densidades másicas de energía, mientras que una ele-

MATERIAL	σ (Mpa)	ρ (Kg/m³)	e_M (kJ/Kg)
ACERO (AISI 4340)	1.800	7.800	140
ALEACIÓN (AlMnMg)	600	2.700	135
TITANIO (TiAl62r5)	1.200	4.500	162
FIBRA VIDRIO (60%)	1.600	2.000	485
FIBRA CARBONO (60%)	2.400	1.500	970

TABLA 1. Materiales para Almacenamiento de Energía.

vada carga de rotura permite conseguir elevadas densidades volumétricas de energía. La tabla 1 recoge una lista de los mejores materiales para su utilización en volantes junto con sus características, incluyendo su densidad de almacenamiento ideal para una geometría en disco [3].

Como puede verse, las mayores densidades por unidad de masa se consiguen con materiales compuestos (idealmente fibra de carbono). Si la preocupación es conseguir energía por unidad de volumen, metales como el acero pueden ser tan buenos como la fibra pero más económicos.

4. TIPOS DE ALMACENADORES CINÉTICOS DE ENERGÍA

Existen dos familias de almacenadores cinéticos [7] según la velocidad de giro. Los primeros son los relativamente lentos (por debajo de las 10.000 rpm). En ellos el volante es metálico y por lo tanto pesado y suele tener sistemas de levitación magnética para aliviado de peso. La primera imagen a la izquierda en la Figura 2 muestra una realización comercial muy conocida de volante metálico (Piller), en la que pueden identificarse todos los elementos característicos (excluidos los de electrónica de potencia), tales como el volante, la máquina eléctrica o el sistema de levitación en la parte superior. Los almacenadores lentos son, en principio, más simples tecnológicamente hablando y su principal utilización es en aplicaciones estacionarias, donde el peso no es un inconveniente. Existe otra familia de almacenadores, los rápidos cuya velocidad de giro suele superar las 10.000 rpm y que utilizan volantes con materiales composites de fibra de carbono, con muy alta resistencia mecánica y baja densidad [7]. El alto precio del volante y la dificultad de su fabricación hacen que su utilización se restrinja, en general, a aplicaciones de energía limitada y en las que el precio del sistema no sea crítico. La Figura 2 muestra un esquema de dos almacenadores rápidos con volantes de fibra.

El material del que está constituido el volante trabaja a un cierto nivel de esfuerzo mecánico máximo y esto determina automáticamente la velocidad como una función de la densidad. Así, los materiales ligeros girarán más rápido mientras que los más pesados lo harán más lentamente [18].

Otro aspecto crucial cuando se diseña un volante de inercia es el comportamiento rotodinámico. De hecho, la diferencia más importante de los volantes de inercia frente a otros sistemas de almacenamiento, y algunas veces la razón para ser rechazados, es la complejidad mecánica. El eje, los rodamientos y la carcasa constituyen una estructura elástica que tiende a oscilar en dos modos: modo cónico y modo cilíndrico. Habrá que considerar los efectos giroscópicos derivados de la dependencia de la frecuencia natural en los dos modos con la velocidad de rotación del volante. Resulta conveniente disponer sensores de temperatura en los rodamientos y acelerómetros para vigilar posibles problemas de este tipo.

La Tabla 2 recoge algunas aplicaciones de estos sistemas de almacenamiento. Están clasificadas por sectores y subsectores y en la columna de la derecha se relacionan con algunas realizaciones prácticas en funcionamiento.

El primer grupo corresponde a las aplicaciones del transporte, especialmente transporte ferroviario con objeto de estabilizar los consumos de las subestaciones, recuperar energía de frenado y aumentar su autonomía en zonas no electrificadas. También se incluye la aplicación en automóviles eléctricos e híbridos. El segundo incluye las de interés en el sector eléctrico y consisten en sistemas de estabilización de redes en tensión y frecuencia [8][9][10]. El problema esencial de estas aplicaciones es el alto nivel de energía almacenada requerido, por lo que dado los límites actuales no queda más remedio que la utilización de varios de estos sistemas en paralelo (matrices de almacenadores).

FIGURA 2. Almacenador Cinético de Energía lento (Piller) y almacenados rápidos (Urenco, Becon Power y Vycon).

TRANSPORTE	TRENES PESADOS	Urenco (N.York), Piller (Hannover), CIEMAT (ADIF), Univ Texas
	TRENES LIGEROS	Urenco (Lyon)
	TRANVÍAS, TROLEBUSES	CCM (Holanda), AFS Trinity (USA), Magnet-Motor(Alemania)
	AUTOMÓVILES	AFS Trinity (USA)
POTENCIA	ESTABILIZACIÓN DE FRECUENCIA	Beacon Power (DOE)
	RENOVABLES	Urenco (Fuji), CIEMAT
UPS	Bancos, Aeropuertos, Hospitales, Instalaciones Militares, Cargas Críticas	Urenco, Pentadyne, Active Power, Piller, Liebert, Vycon

TABLA 2. Aplicaciones de los volantes de inercia.

5. LA EXPERIENCIA RESULTADO DE LA COLABORACIÓN ENTRE EL CIEMAT Y EL CEDEX

Desde 1999 los centros de investigación CIEMAT y CEDEX han venido colaborando en el desarrollado de la tecnología de sistemas de almacenamiento cinético de energía lento (7.000 rpm), incluyendo la electrónica de potencia, el control y la integración en red. Tanto para su aplicación para renovables, como es el caso del proyecto SEDUCTOR [11], como más tarde para el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) con aplicaciones a la gestión de la energía consumida en la líneas de Alta Velocidad (Proyecto ACE2) [12]. La Figura 3 presenta la evolución de los prototipos con los que ha trabajado desde el año 1999, cuando se comenzó con un pequeño prototipo de máquina de alta velocidad y su electrónica de potencia, hasta el sistema desarrollado en CIEMAT recientemente para aplicaciones relacionadas con energías renovables.

Aunque con el proyecto ACE[2], antes mencionado, estos sistemas fueron concebidos inicialmente para alisar el consumo eléctrico en las subestaciones de Alta Velocidad, finalmente se decidió que era más conveniente utilizarlos para la recuperación de la energía de frenado de los trenes en líneas de cercanías con catenaria de continua, donde no es posible la inyección de potencia en la red. Este trabajo se comenzó en 2006 dentro de un Proyecto Singular Estratégico (PSE) del entonces Ministerio de Ciencia e Innovación, denominado SA2VE y más concretamente dentro de uno de sus subproyectos, el FERRO_SA2VE, titulado *Sistemas Avanzados de Almacena-*

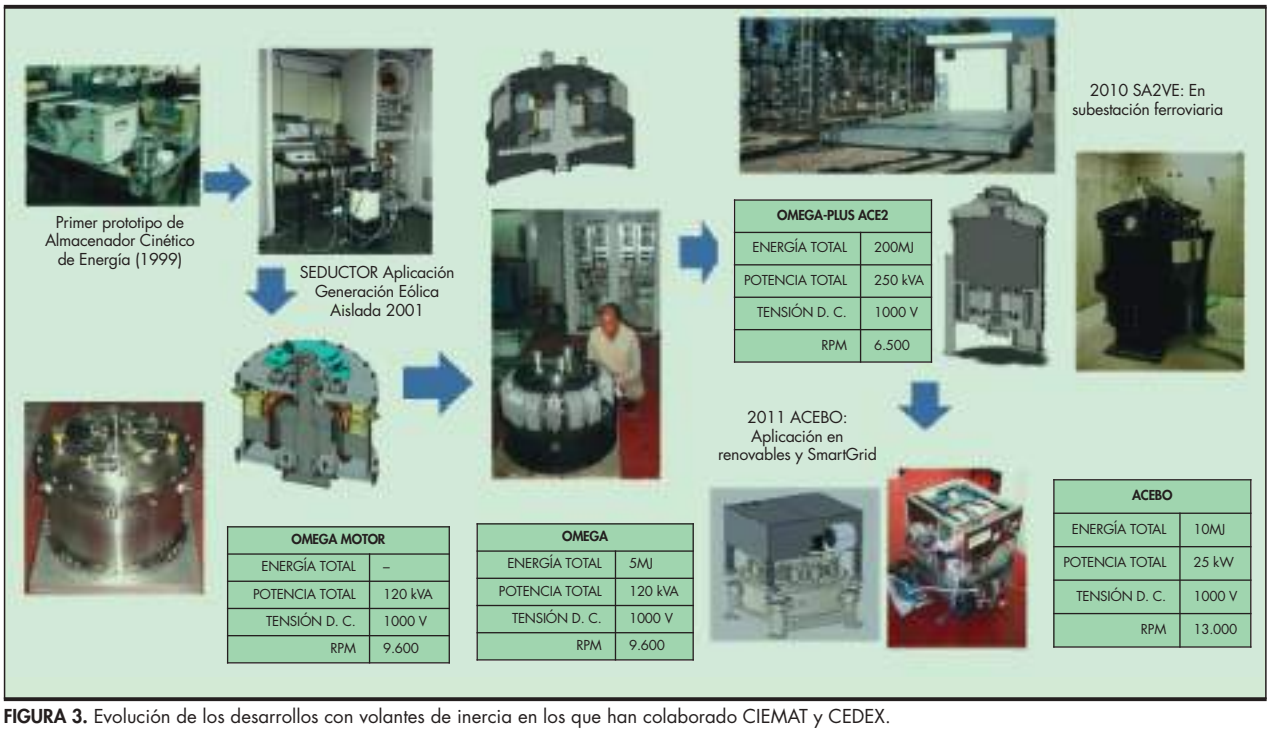

FIGURA 3. Evolución de los desarrollos con volantes de inercia en los que han colaborado CIEMAT y CEDEX.

miento de Energía: Aplicaciones al Transporte Ferroviario. El objetivo del subproyecto [13] era la instalación de un almacenador cinético de energía en una subestación ferroviaria de corriente continua para estabilizar la tensión de catenaria y aprovechar la energía procedente del frenado de los trenes. Este proyecto ha reunido a centros tecnológicos de prestigio como el CEDEX y el CIEMAT, al entorno universitario (Universidad de Sevilla) y a empresas nacionales del sector eléctrico y energético (Elytt Energy, GreenPower e Inabensa).

6. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA UTILIZADA

La solución desarrollada para ADIF está basada en un volante de inercia de acero forjado de alta resistencia, de 6 ton de peso, capaz de girar a una velocidad de 6500 rpm, con una capacidad de almacenamiento de energía de 200 MJ (55 kWh). La parte mecánica está formada por cojinetes cerámicos convencionales, aunque dada la carga axial y velocidad de rotación tan elevadas se ha dispuesto un sistema de levitación magnética mediante imanes permanentes y un electroimán adicional para dar capacidad de regulación, reduciendo de esta forma el esfuerzo axial del volante y por tanto el dimensionado de los rodamientos. La máquina eléctrica que sirve para acelerarlo o frenarlo (dependiendo de si se quiere almacenar energía o liberarla) es una máquina de reluctancia conmutada [14] de 350 kW que gira a la misma velocidad que el volante. Esta máquina se une con la red eléctrica mediante una serie de equipos de electrónica de potencia que se encargan de adaptar los niveles de tensión y frecuencia adecuadas entre la alimentación de la máquina [15] y la red a la que se conecta el sistema. Un hardware de control desarrollado de forma específica en CIEMAT para esta aplicación y basado en microprocesadores se encarga de controlar todos los dispositivos electrónicos [16] y comunicar con el centro de mando de ADIF desde donde se puede comandar el sistema.

El sistema desarrollado para esta aplicación presenta una serie de ventajas frente a otros dispositivos comerciales, como son la simplicidad y la robustez, y se ha concebido con el objetivo de ser una tecnología competitiva frente a otras tecnologías como son las baterías químicas y los ultracondensadores. La tecnología es completamente propia (la máquina eléctrica, el volante de inercia, la electrónica de potencia y el control), siendo los materiales utilizados para la fabricación materiales convencionales.

7. ETAPA DE PRUEBAS DEL PROYECTO FERRO_SA2VE EN LABORATORIOS CEDEX

La primera parte del desarrollo experimental del proyecto se llevó a cabo en los laboratorios del CEDEX, concretamente en el Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), donde se desarrolló un emulador de catenaria ferroviaria con las mismas condiciones de tensión que la catenaria ferroviaria (3600 V de tensión continua) donde se instalaría el sistema de forma definitiva. Para ello se utilizó un transformador de potencia y un rectificador de 12 pulsos. De esa forma, los equipos que conectarían el volante a la catenaria se podrían probar en condiciones nominales.

La Figura 4 presenta un esquema de los equipos que se han utilizado para las pruebas. Así, un convertidor DC/DC conecta con el emulador de catenaria y absorbe potencia que es almacenada en el volante de inercia. Un segundo convertidor (CLM) es el encargado de alimentar la máquina eléctrica de forma adecuada para conseguir los modos de operación deseados, de forma que su funcionamiento sea óptimo. Para la liberación de la energía del volante, y dado que el emulador de catenaria no es capaz de trabajar en los dos sentidos, se dispuso un convertidor auxiliar (CLR) que conectaba con la red alterna para poder liberar la potencia a través de él. También sirve este dispositivo como camino alternativo de descarga de energía cuando no esté accesible el convertidor de catenaria y

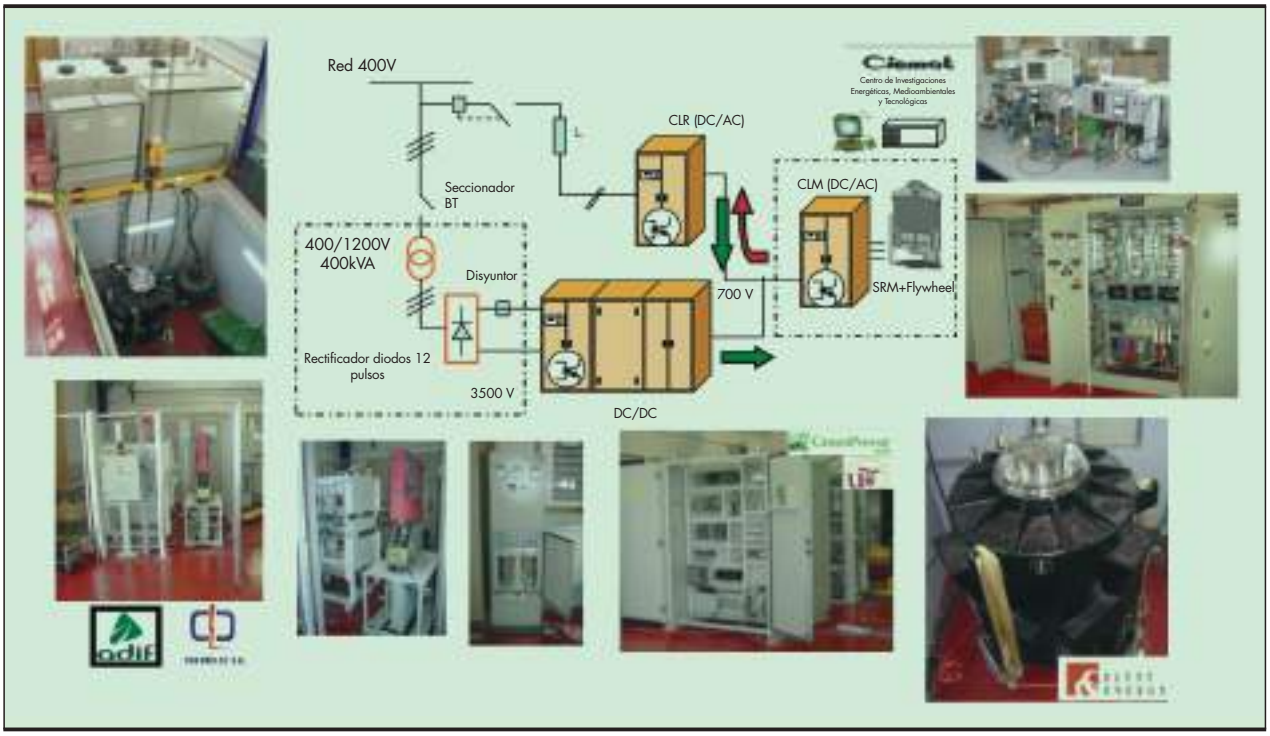

FIGURA 4. Esquema de pruebas del sistema completo en el laboratorio del CEDEX.

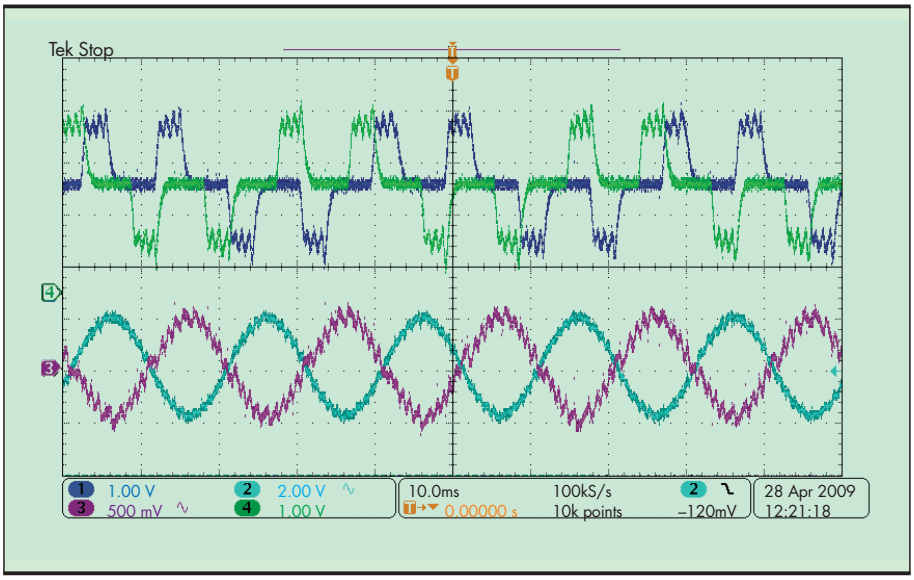

FIGURA 5. Formas de onda de corriente en la máquina y tensión y corriente en la red.

sea necesario frenar el volante. Adicionalmente se vio utilidad a este convertidor para comunicar la catenaria directamente con la red, pudiendo hacer una transferencia directa de potencia hacia la misma, con vistas a la alimentación de cargas en alterna a partir de la disponibilidad de potencia en catenaria o de la potencia almacenada en el volante.

Como resultados experimentales de las pruebas en el laboratorio del CEDEX, la Figura 5 presenta las formas de onda de dos de las fases de la máquina eléctrica (parte superior) en modo generador (liberando energía) sobre la red de alterna a través del convertidor auxiliar, aprovechando la energía acumulada para atender un determinado consumo eléctrico en la red por ejemplo. En la parte inferior de la Figura 5 se muestran las formas de onda de tensión y corriente en la red.

8. DEFINICIÓN DE LA EFICIENCIA COMO FIGURA DE MÉRITO DE UN ALMACENADOR CINÉTICO

Uno de los puntos más importantes y demandados cuando se plantean este tipo de tecnologías es: ¿cuál es su eficiencia? Para ello, hay que considerar que la energía liberada hay que almacenarla, luego se mantendrá un tiempo almacenada y finalmente será liberada. En estos tres procesos intervienen una serie de pérdidas: en los rodamientos, por efecto aerodinámico, en el cobre de las bobinas de la máquina, en la chapa magnética de la máquina, en el resto de conductores del sistema y en la electrónica de potencia. Después de analizar la contribución de todas ellas (por ejemplo, las pérdidas en el cobre son menores del 1% al ser la co-

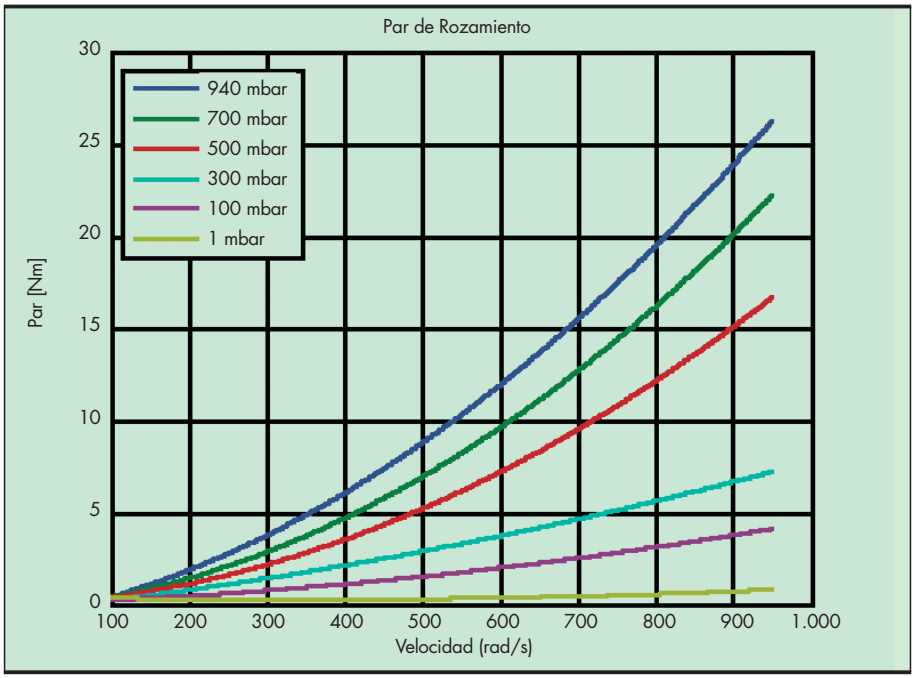

FIGURA 6. Ensayos de par de rozamiento aerodinámico a distintas presiones.

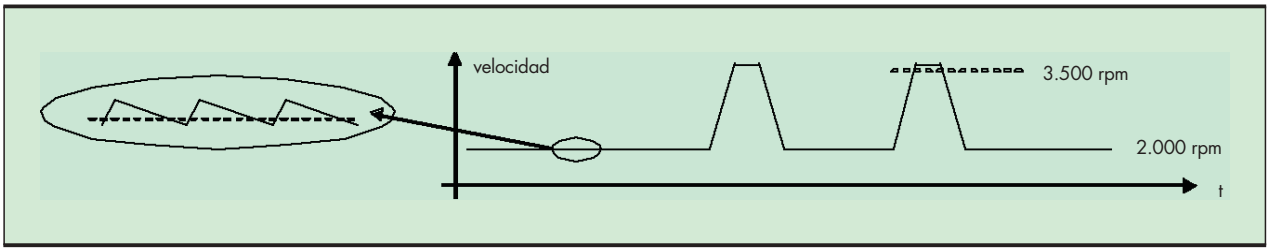

FIGURA 7. Perfil de funcionamiento velocidad-tiempo.

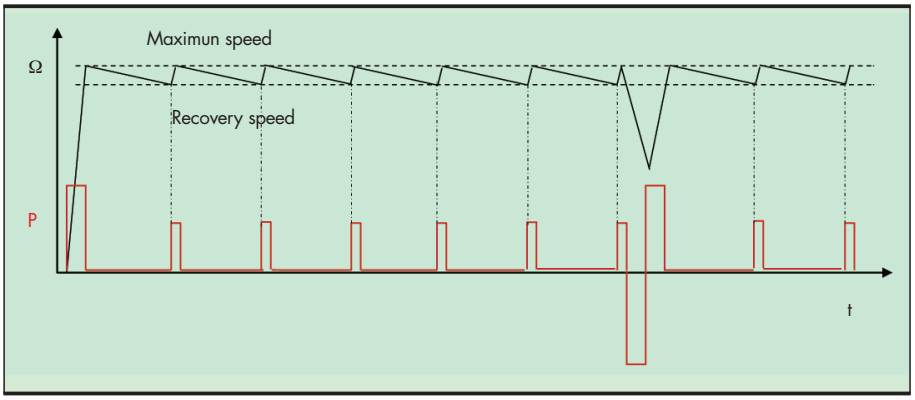

FIGURA 8. Mantenimiento de la velocidad alrededor de la velocidad en espera y consumos de potencia asociados.

rriente de 600 A y la resistencia por fase de 5.2 mΩ) se ha llegado a la conclusión de que las pérdidas más importantes son las pérdidas mecánicas (cojinetes y aerodinámicas). Para minimizar estas pérdidas se han considerado dos medidas importantes. La primera es la utilización de levitación magnética para aliviar la carga axial de los cojinetes, lo cual reduce en cierta medida las pérdidas en los mismos. Aún así, las pérdidas más apreciables son las debidas al rozamiento aerodinámico del volante con el aire. La forma de reducir estas pérdidas es evitando turbulencias en el volante y reduciendo la presión del aire circundante. La curva de la Figura 6 presenta la reducción que se consigue en las pérdidas aerodinámicas al disminuir la presión del aire en el interior del almacenador. Por desgracia, la capacidad de reducir la presión no es únicamente un problema de una bomba de vacío más costosa y de tolerancias de fabricación del dispositivo sino principalmente un problema de aislamiento eléctrico. Debido a que las bobinas de la máquina están en la misma carcasa que el volante, están sometidas a la misma presión. Según la Ley de Paschen [17] al reducirse la presión se reduce también la tensión de ruptura dieléctrica, lo cual exige que para la tensión de operación de 800 V utilizada en la máquina se aumente el aislamiento eléctrico que rodea las bobinas, para lo cual hay que disponer de tecnologías más costosas y no convencionales. Otro problema derivado de trabajar a presiones bajas es la reducción de la capacidad de evacuación de calor por convección. Esto supone un problema para la refrigeración de la máquina eléctrica, lo cual puede llegar a limitar el número de ciclos de carga-descarga continuos que puede ofrecer el sistema.

Para el prototipo desarrollado en esta aplicación se ha definido un nivel de presión interna de 100 mbar, que consigue un compromiso entre unas pérdidas aerodinámicas bajas y la seguridad de que no se produzca ruptura dieléctrica en las bobinas de la máquina. No obstante, en las situaciones en las que se prevé que el volante no va a intercambiar potencia (por ejemplo por las noches, cuando no hay circulación de trenes) se reduce la presión hasta 1 mbar con lo que se consigue reducir al máximo las pérdidas del sistema.

El almacenador mantendrá una velocidad o estado de consigna que dependerá de los criterios de operación o funcionalidad que se le quiera dar. En el caso que nos ocupa, el volante se encuentra a la velocidad más baja del rango de operación (2000 rpm) a la espera de que llegue un tren y frene. En ese caso absorbería la energía del frenado y aumentaría con ello su velocidad para seguidamente devolverla, un cierto instante después, con lo que la velocidad vuelve a reducirse. Dicha operación se muestra en la Figura 7.

Para conseguir que la velocidad permanezca en torno a un determinado valor, dado que tenderá a caer pasado un tiempo, por pérdidas de energía, habrá que recuperar la velocidad mediante un pequeño aporte de potencia. La Figura 8 presenta la evolución de las velocidades en el tiempo junto con los aportes de potencia.

La expresión (2) sirve para calcular la potencia media consumida por el almacenador para mantenerse a la espera en torno a un valor constante de velocidad a lo largo del tiempo. Se miden los consumos de potencia durante los tiempos en que se acelera dividiendo entre los tiempos totales de cada ciclo. Por ejemplo, para mantener el volante girando a la velocidad mínima de 2000 rpm se necesita una potencia media de 4 kW, lo cual supone un rendimiento del 98% a una presión de 150 mbar.

$$P_{losses} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{m(cycles)} \left(\frac{\int_{t_{k+1}}^{t_k} (u \cdot i) dt}{t_{k+2} - t_k} \right) \qquad (2)$$

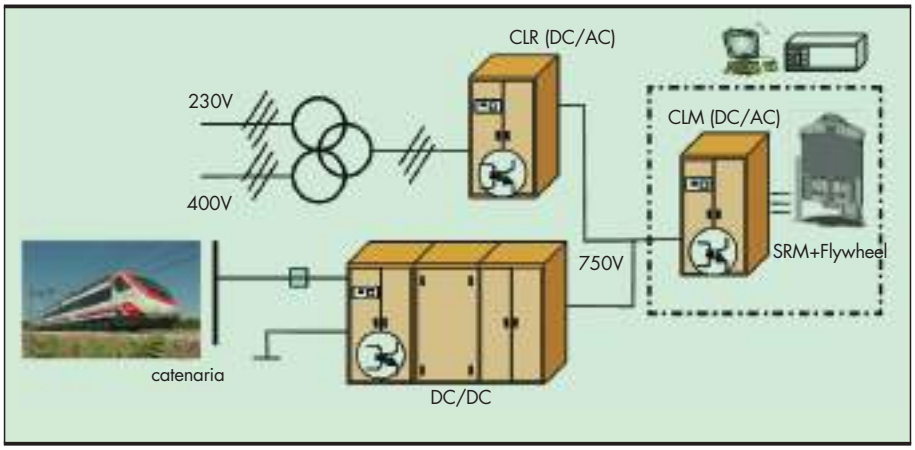

FIGURA 9. Esquema de conexión de los equipos en la subestación de ADIF de Cerro Negro (Madrid).

9. PUESTA EN MARCHA EN LA SUBESTACIÓN DE CERRO NEGRO DE ADIF

La puesta en marcha del sistema se realizó en la subestación ferroviaria de Cerro Negro, en Madrid, propiedad de ADIF. Se instalaron los sistemas de la misma forma que se habían probado en el laboratorio del CEDEX, siguiendo el esquema que presenta la Figura 9.

El volante de inercia, por cuestiones de seguridad, se instaló en un foso de protección situado en el parque de alta tensión de la subestación. Los equipos de electrónica de potencia y control se situaron en el edificio de la subestación, donde está el puesto de control del sistema, aunque no es necesario operarlo desde allí sino que se puede acceder mediante una conexión remota desde el centro de control de subestaciones de ADIF. Las Figura 10 muestra algunas imágenes de los equipos instalados en la subestación.

El modo de operación automático del sistema considera como variables de control la corriente consumida por la catenaria desde una subestación y la tensión de la catenaria y en función de ellas se definen los modos de funcionamiento del almacenador, según se muestra en la Figura 11.

Si la corriente consumida desde la subestación es nula y la tensión de catenaria supera un cierto límite superior es señal de que un tren está devolviendo energía a catenaria por lo que sube la tensión de la misma al no poderse drenar a la red. En este caso el volante debe almacenar dicha energía. Si la tensión está por debajo de un cierto límite y se mide un cierto consumo de corriente desde la subestación es señal de que un tren está demandando un aporte de potencia. En este caso, y si el almacenador está disponible (nivel de carga suficiente), le aportará energía con lo que se reducirá el consumo desde la red. El resto de situaciones harán que el volante quede a la espera de utilizarse.

Las Figuras 12 y 13 presentan resultados obtenidos con el almacenador en sus pruebas en la subestación. La Figura 12 presenta el entorno de control y monitorización desde el que se realiza el seguimiento de las condiciones de operación del sistema de almacenamiento cinético (izq.) y un muestreo de la tensión de catenaria y la corriente inyectada por el sistema de almacenamiento en una serie de pruebas de absorción e inyección de potencia (dcha.). La Figura 13 presenta resultados de las corrientes que maneja la máquina eléctrica trabajando en modo motor (modo almacenamiento), en modo generador (modo recuperación) y una transición entre un estado de espera y una absorción de potencia, la cual se produce en unos pocos milisegundos, siendo la variación de la tensión en la

FIGURA 10. Esquema de conexión de los equipos en la subestación de ADIF de Cerro Negro (Madrid).

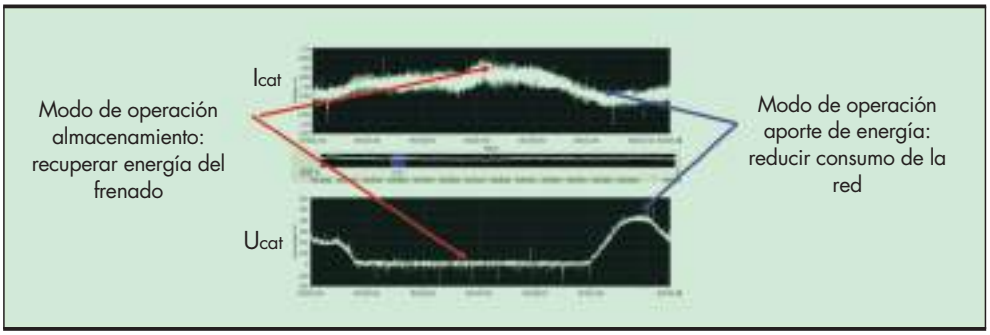

FIGURA 11. Evolución de la tensión de catenaria y corriente consumida para determinar modos de operación.

FIGURA 12. Entorno de monitorización y registro de la tensión de catenaria y corriente intercambiada por el almacenador con la catenaria ferroviaria.

etapa de continua menor del 10%, lo cual es un valor totalmente aceptable para la dinámica eléctrica del sistema.

En el escenario actual, la potencia que maneja el volante de inercia no es suficiente para realizar ninguna compensación de los valores de tensión de catenaria de forma apreciable porque los niveles de potencia necesarios serían mucho mayores. Se ha instalado esta primera máquina a nivel demostrativo y para validar el sistema de almacenamiento considerado como tal como todos los subsistemas que lo componen (mecánicos, eléctricos, electrónicos, de control, de instrumentación y de comunicaciones).

10. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Dado el interés creciente de la tecnología de los volantes de inercia, no sólo en el sector del transporte sino también en el sector de la generación de energía, y teniendo en cuenta el amplio recorrido que tiene por delante para la mejora tecnológica y la identificación de aplicaciones donde resulten una solución interesante, el CIEMAT ha apostado por continuar con la investigación en este tipo de dispositivos. Se han identificado las siguientes líneas de trabajo: posibilidad de situar la máquina a presión atmosférica y el volante a presión reducida, reducir el coste de los materiales y de fabricación, integrar la electrónica de potencia y el control en el propio dispositivo y buscar el concepto de modularidad que permita dar la dimensión adecuada para cada aplicación, dependiendo de sus niveles de potencia y energía; y en este sentido ya se está desarrollando la siguiente generación de volantes de inercia que se ha denominado ACEBO (almacenador cinético de energía de bajo coste) que cumple con los requisitos anteriores.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Hentschel, F.; Müller, K.; Steiner, M.; "Energy Storage on Urban Railway Vehicles". Proceedings of the UIC Energy Efficiency Conference, Paris, 2000.

[2] Ribeiro, P.F.; Johnson, B.K.; Crow, M.L.; Arsoy, A.; Liu,Y.; "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications". Proc. of the IEEE, Dec 2001, Vol 89, pp. 1744-1756.

[3] Ruddel A. Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: evaluation and recommended R&D strategy. Storage Technology Report. ST6: Flywheels. 2003.

[4] Ter-Gazarian, A. Energy Storage for Power Systems. Peter Pergrinus .London 1994.

[5] David Linden, Thomas B. Reddy Handbook of Batteries. MacGraw-Hill Handbooks.

[6] Genta, G. Kinetic Energy Storage. Butterworths. 1985.

[7] Hebnert, R; Beno, J.; Walls, A. Flywheel Batteries Come Around Again. IEEE Spectrum, p. 46-51. April 2002.

[8] Kirby, B. Frequency Regulation Basics and Trends. Power

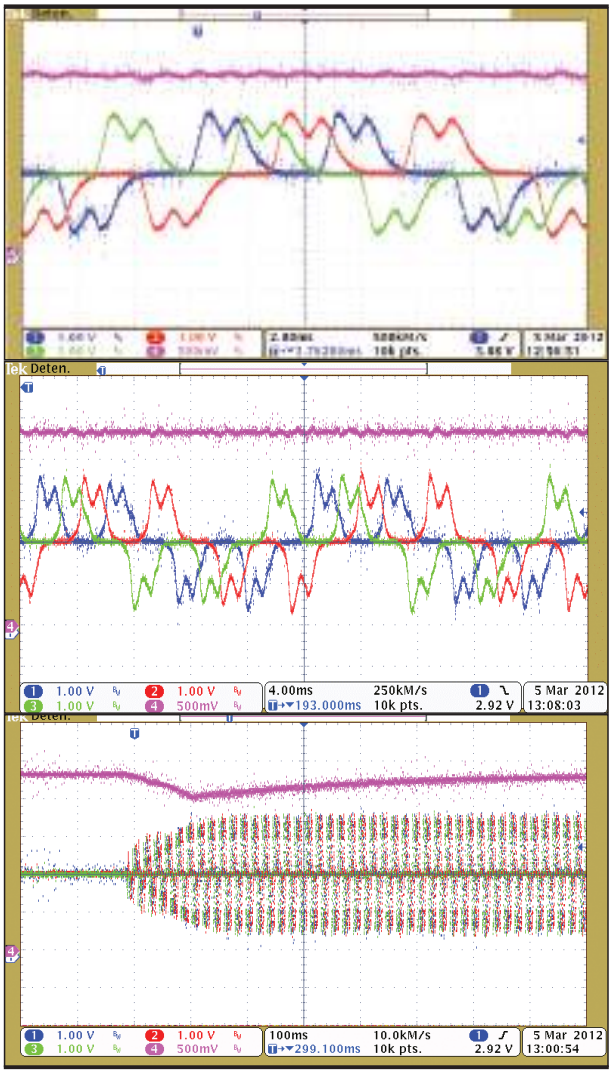

FIGURA 13. Corrientes en la máquina eléctrica del almacenador: modo motor, modo generador y transición de espera a modo motor.

System Research Program. Oak Ridge National Laboratory. Julio 2004.

[9] Rojas, A. Integrating Flywheel Energy Storage Systems in Wind Power Applications Beacon Power Corp. WindPower 2003.

[10] Federal Energy Management Program. Flywheel Energy Storage: An Alternative to batteries for uninterruptible Power Supply Systems. DOE/EE-0286.

[11] Iglesias, I.J.; García-Tabarés, L.; Agudo, A.; Cruz,I.; Arribas,L.; Design and Simulation of a Stand-Alone Wind-Diesel Generator with a Flywheel Energy Storage System to Supply the Required Active and Reactive Power. Power Electronics Specialists Conference, 2000.

[12] Lafoz, M., Vázquez, C., "The ACE2 System: A Kinetic Energy Storage for Railway Substations". Procs. Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT). 2007.

[13] M. Lafoz, C. Vázquez, J.I. Iglesias. DC railway catenary regulation based on KESS. Proceedings of the Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT) Seattle (EE.UU). 4-7 October 2009.

[14] Miller, T.J.E.; "Switched Reluctance Motors and their Control". Magna Physics Publishing and Clarendon Press. Oxford 1993.

[15] Barnes, M.; Pollock, Ch.; "Power Electronics Converters for Switched Reluctance Drives". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, Nº 6, pp. 1100-1111, November 1998.

[16] Vázquez, C.; Lafoz, M.; Ugena, D.; García-Tabarés, L.; "Control System for the Switched Reluctance Drive of a Flywheel Energy-Storage System". European Transactions on Electrical Power. Wiley-Interscience. 2007.

[17] Paschen, F.; "Uber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaüre bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferen"z. Ann. Phys. Chem, Ser. 37, 69-96. 1889. F. Paschen, Wied. Ann., 37, 69.

[18] [(2008) Understanding Flywheel Energy Storage: Does High Speed Really Imply a Better Design?. White Paper 112. Active Power. www.activepower.com.

Otros enlaces de interés

http://www.sa2ve.es/home.asp

http://www.ciemat.es/portal.do?IDM=9&NM=2

http://www.activepower.com

http://www.afstrinity.com

http://www.beacopower.com

http://www.magnet-motor.de

http://www.pentadyne.com

http://www.piller.com

http://www.vyconenergy.com