

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes



Pedro Estévez Irizar

Maidier Varela Cuadrado

Egoitz Iturritxa Zubiri

*Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles
S.A.*

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcada en los trenes

Pedro Estévez Irizar

Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A.

Maidier Varela Cuadrado

Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A.

Egoitz Iturritxa Zubiri

Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A.



Con la subvención del Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2007-038-20IAPM.

© Pedro Estévez, Maidier Varela, Egoitz Iturritxa

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2008

ISBN: 978-84-89649-88-0

Depósito Legal: M-12058-2012

ÍNDICE

ÍNDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Volantes de inercia	5
2.2. Ultracapacidades.....	6
2.3. Baterías.....	8
2.3.1 Ácido Plomo.....	9
2.3.2 Baterías de Níquel Cadmio	10
2.3.3 NiMH.....	11
2.3.4 Litio-ion.....	13
2.3.5 Na-NiCl ₂ (Zebra)	14
2.4. Comparativa entre los diferentes sistemas de acumulación	15
2.5. Otras líneas de investigación.....	17
2.5.1 Resorte radioidal	17
2.5.2 Nanotubos de Carbono	18
3. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE ACUMULACIÓN EMBARCADOS.....	22
3.1. Vehículos eléctricos	22
3.2. Vehículos Diesel-Eléctricos híbridos	22
3.3. Combinación de sistemas de acumulación	22
4. PROYECTOS DESARROLLADOS CON SISTEMAS DE ACUMULACIÓN	24
4.1. Autotram	25
4.2. Sitras ® SES (Siemens Transportation).....	25
4.3. Sitras ® MES (Siemens Transportation).....	26
4.4. Sitras ® HES (Siemens Transportation)	27
4.5. MITRAC Energy Saver (Bombardier Transportation)	29
4.6. PRIMOVE (Bombardier Transportation)	30
4.7. Tranvía de Niza (CITADIS de ALSTOM)	31
4.8. Tranvía de París (ALSTOM)	32
4.9. KAWASAKI SWIMO-X en SAPPORO (JAPÓN)	33
4.10. Sistema ACR (Trainelec)	34
4.11. Sistema de almacenamiento en subestaciones de energía basado en ultracapacidades para la compensación de tensión en redes débiles de transporte ferroviario	36
4.12. Proyectos Europeos LIFE	37
4.13. Proyecto Europeo EVENT	37
4.14. Proyecto europeo CUTE.....	38
BIBLIOGRAFÍA	40
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	42

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos que deben perseguir los vehículos ferroviarios es la optimización de su consumo energético. Teniendo en cuenta que el equipo de tracción es la mayor fuente de consumo parece lógico incidir en él para lograr una buena parte del ahorro energético.

Los equipos de tracción actuales son reversibles, por lo que en principio pueden realizar un frenado regenerativo devolviendo la energía cinética o potencial del vehículo a la red a través de la catenaria.

Cuando la catenaria es de corriente alterna no hay problema en devolver esta energía a la red; sin embargo, en las redes dotadas de catenarias de corriente continua en las que las subestaciones no son reversibles, la energía solamente puede ser reutilizada si existe un tren circulando con demanda de potencia en la misma sección en la que circula un vehículo que está frenando.

Para tratar de reutilizar la mayor parte de energía existen diferentes alternativas: subestaciones regenerativas, equipos de acumulación de energía en tierra y equipos de acumulación de energía embarcados.

Optar por una u otra solución dependerá de diferentes parámetros: tipo de red, tipo de vehículos, orografía, si se va a crear una nueva infraestructura, tipo de explotación...

Esta *Monografía* se centrará en los sistemas de acumulación que pueden embarcarse en los vehículos ferroviarios, tratando de dar una idea general de su funcionamiento, ventajas e inconvenientes de cada una de las tecnologías y las diferentes utilidades que se pueden obtener de éstas.

2. ESTADO DEL ARTE

El campo de los sistemas de acumulación está en constante evolución, lo que hace que a las tecnologías ya existentes se le vayan sumando, poco a poco, nuevas soluciones que se adaptan a las necesidades de los trenes o mejoran algunas de las prestaciones ya ofrecidas.

En cualquier caso, estos sistemas pueden clasificarse según su ubicación en fijos (aquellos que forman parte de la infraestructura) y embarcados (incluidos entre los propios equipos del tren). Como es lógico, en función de las ventajas e inconvenientes de cada una de las soluciones, éstas son más propensas a ser utilizadas en una o en otra de las ubicaciones mencionadas.

En la actualidad existen diversos sistemas de acumulación de energía: almacenamiento de aire comprimido, volantes de inercia, ultracapacidades, baterías, sistemas de bombeo hidráulico, etc., aunque, debido a sus características, no todas ellas son aptas para ser utilizadas en aplicaciones ferroviarias. Entre las que lo son las más utilizadas hoy en día como sistemas embarcados son las baterías y las ultracapacidades, bien combinadas en sistemas híbridos, o bien utilizadas de manera independiente.

A continuación, se describen el funcionamiento y las características de algunos de estos sistemas, como son los volantes de inercia, ultracapacidades y baterías, ampliando la información con los últimos avances en el caso de las baterías. Además, se incluyen dos nuevas líneas de investigación: los resortes radioidales y los nanotubos de carbono.

2.1. Volantes de inercia

La mayoría de los sistemas “flywheel” o volantes de inercia consisten en una masa cilíndrica rotativa (compuesta por una llanta acoplada a un eje) que es soportada en un estator mediante cojinetes en levitación magnética que eliminan el desgaste de los cojinetes e incrementan la vida del sistema.

Con el fin de mantener la eficiencia, el sistema “flywheel” funciona en un entorno de vacío que permite reducir la resistencia aerodinámica. El volante de inercia se conecta a un motor-generador montado sobre el estator que, a través de la electrónica de potencia, interacciona con la red eléctrica.

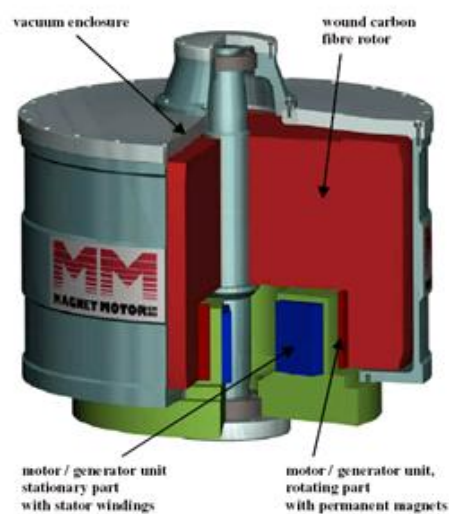
Algunos de los aspectos clave de estos sistemas son la alta densidad de energía, el bajo mantenimiento, la larga vida (20 años o decenas de miles de ciclos) y que emplean materiales medioambientalmente inertes.

Sus inconvenientes, sin embargo, son la limitación de la potencia de pico por la energía almacenada en cada instante en el volante y la rápida velocidad de autodescarga. Además, precisa de un sistema de control complejo y de muchos auxiliares (convertidores AC/DC, refrigeración líquida, bomba de vacío, etc.), lo que aumenta el peso de los equipos y, en consecuencia, hace que la densidad de energía real no sea tan alta.

En función de las prestaciones del sistema, el coste, el peso y el tamaño, se usan llantas de acero (200 a 375 m/s de velocidad punta) o de composite (600 a 1000 m/s de velocidad punta), más ligeras que las anteriores. La energía almacenada se puede aproximar por la siguiente expresión:

donde, ω es la velocidad angular (rad/s) de la masa cilíndrica, I es su momento de inercia rotativa, m es su masa y v es su velocidad lineal. En la Figura 1 se muestra como ejemplo un sistema flywheel Magnet Motor en el que pueden observarse sus diferentes partes.

Figura 1. Volante de Inercia



Fuente: Magnet Motor

Los volantes de inercia no son muy recomendables como sistemas de acumulación embarcados debido a su tamaño y a motivos de seguridad, y prácticamente no se utilizan en nuevos sistemas de acumulación.

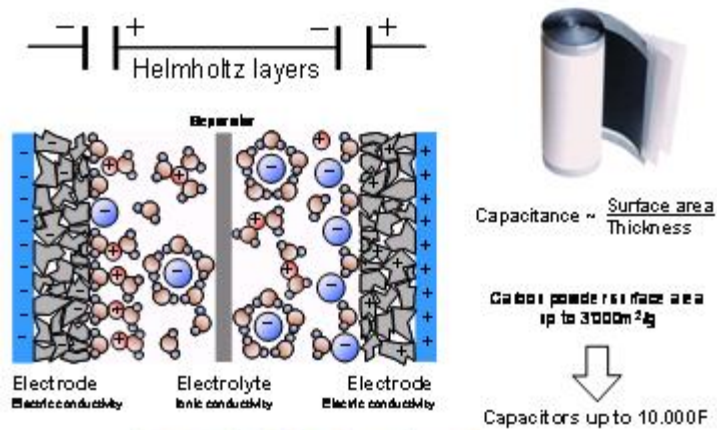
Como principales fabricantes pueden citarse: Beacon Power, Active Power Inc., AFS Trinity Power, Piller Gmb, Elytt Energy, Urenco Power Technologies Limited.

2.2. Ultracapacidades

Las ultracapacidades, súper condensadores, o condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC, Electrochemical Double Layer Capacitor), son condensadores de doble capa que almacenan energía electrostática cuando existe un potencial entre dos electrodos sumergidos en un electrolito. Aunque sea un elemento electroquímico, no existe reacción química en el almacenamiento de energía. Su mecanismo es totalmente reversible y se puede cargar y descargar cientos de miles de veces. La capacidad y densidad de energía de estos dispositivos es de miles de veces mayor que las de los condensadores electrolíticos.

Los electrodos se suelen construir con materiales de carbono poroso. El electrolito puede ser tanto acuoso como orgánico. Los acuosos tienen menor densidad de energía debido a su menor tensión, pero son más baratos y funcionan en un rango de temperatura mayor. Las ultracapacidades asimétricas, que usan un metal en uno de los electrodos, tienen una densidad de energía significativamente mayor que las simétricas, y además una menor corriente de fugas.

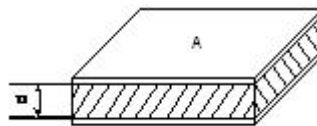
Figura 2. Detalle gráfico de una ultracapacidad



Fuente: Maxwell

En una capacidad, cuanto más área tenga para almacenar cargas y cuanto menos distancia haya entre las cargas, mayor es la capacidad, ya que se rige por la siguiente ecuación:

Figura 3. Ecuación de capacidad



Donde ϵ_0 es la permeabilidad del espacio libre ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m), ϵ_r la permeabilidad relativa del electrolito, A el área de superficie de las placas y d la distancia de separación de las placas.

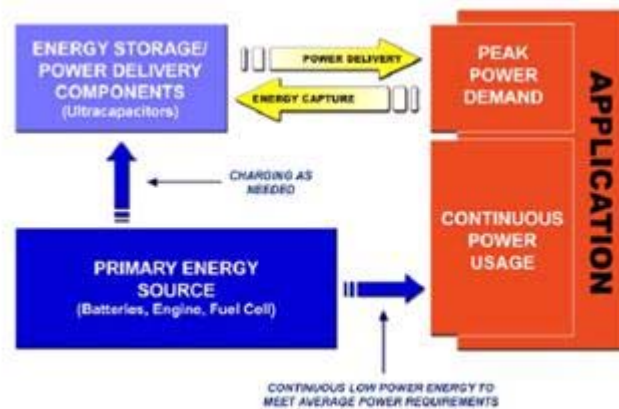
Comparadas con las baterías, las ultracapacidades tienen menor densidad de energía, pero proporcionan mayor potencia (capacidad de realizar cargas y descargas rápidas) y tienen una larga vida útil, ya que al no depender de reacciones químicas no tienen efecto memoria y pueden realizar decenas de miles de ciclos.

Cuando se diseña un sistema parece lógico diseñarlo para que la fuente de energía primaria proporcione toda la energía demandada por la aplicación, incluso los picos, aunque estos ocurran solamente durante unos segundos. Sin embargo, dimensionar la necesidad de esta fuente para proporcionar estos picos suele ser costoso e ineficiente. Estos sistemas pueden ser significativamente mejorados almacenando la energía de la fuente primaria en un sistema de almacenamiento secundario y proporcionando los picos desde este segundo sistema, mientras que la energía media se proporciona desde el primario.

En este rol, las ultracapacidades proporcionan una solución simple, segura y duradera, ya que es el elemento ideal para proporcionar picos de energía durante

cortos periodos de tiempo. La Figura 4 muestra esquemáticamente este concepto de funcionamiento.

Figura 4. Sistema con fuente primaria y ultracapacidades



Fuente: Maxwell

Como se verá más adelante, en el campo de las ultracapacidades se está trabajando en la nanotecnología con el objetivo de fabricar células de ultracapacidades basadas en nanotubos de carbono. Con esta tecnología se espera llegar a densidades de energía similares a las de las baterías pero con las prestaciones de las ultracapacidades.

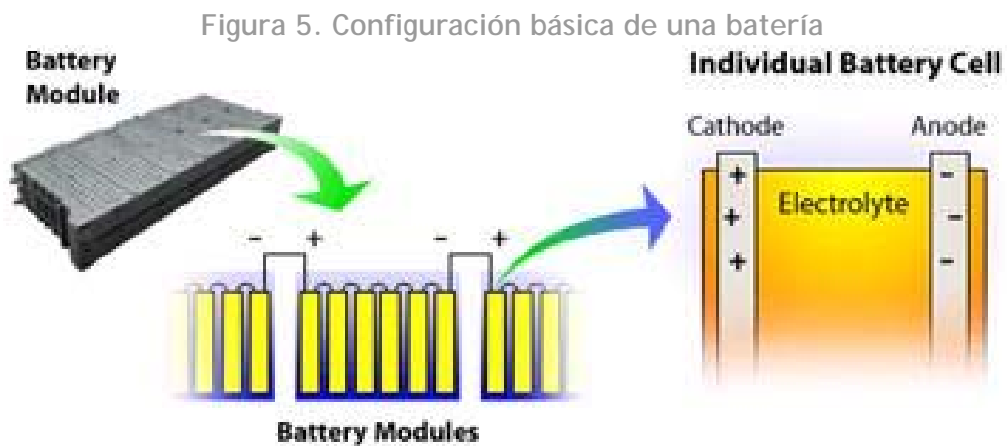
Como principales fabricantes se pueden citar a Maxwell y Nesscap.

2.3. Baterías

Se llama *Batería (electroquímica)* a un dispositivo que almacena energía eléctrica por procedimientos electroquímicos y que, en función de la tecnología empleada, la devuelve posteriormente casi en su totalidad. Este ciclo puede repetirse un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, de un generador que no puede funcionar a no ser que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina *proceso de carga*.

El funcionamiento de una batería está basado esencialmente en un proceso químico reversible, es decir, un proceso en que idealmente sus componentes no resultan consumidos ni se pierden, sino que meramente se transforman químicamente en otros, que a su vez puedan retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de las baterías, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante el de carga.

La batería consta de tres elementos básicos; el *ánodo* (terminal negativo); el *cátodo* (terminal positivo); y el electrolito, el cual permite el paso de los electrones de un terminal a otro. A medida que la corriente se extrae de la batería, los electrones comienzan a circular desde el ánodo a través del electrolito hacia el cátodo.



Existen varios tipos de baterías en el mercado, las cuales tienen diferentes propiedades y campos de aplicación: baterías de Ácido Plomo, NiCd, NiMH, Litio-ion, Zebra, etc.

Las baterías son, de los sistemas aquí mencionados, los que tienen una mayor densidad de energía. Sin embargo, su densidad de potencia, en comparación con la de las ultracapacidades, resulta bastante baja.

Otro de los inconvenientes generales de las baterías es que el número de ciclos de carga y descarga que puede soportar es menor que el de las ultracapacidades. Además, su vida útil depende mucho de la profundidad de descarga de los ciclos (energía consumida en cada ciclo), por lo que un aumento de ésta provoca una reducción en la vida de la batería.

En las siguientes líneas se hace un repaso de los diferentes tipos de baterías que existen en la actualidad.

2.3.1 Ácido Plomo

Las baterías Ácido Plomo constituyen el tipo de batería más antiguo que se conoce. Su funcionamiento se basa en las reacciones existentes entre un electrodo positivo compuesto de dióxido de plomo (PbO_2), un electrodo negativo compuesto de plomo esponjoso y un electrolito compuesto de una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua.

Sobre esta misma base, dependiendo de la forma en que se construyen o interconectan los distintos componentes de la batería, se han desarrollado diversas tecnologías: baterías ventiladas, baterías selladas o VRL, baterías con electrolito-gel y baterías con matriz de absorción o AGM.

Las baterías de Ácido Plomo se pueden diseñar para que proporcionen una elevada potencia siendo baratas, robustas y fiables. Sin embargo, algunas de las desventajas o limitaciones que presentan estas baterías son las siguientes:

- Ambientalmente poco amigables debido a la toxicidad del plomo.
- Baja energía específica.
- Limitada vida útil (unos 500 ciclos completos de carga y descarga).

- Rango de temperaturas limitado.
- Requieren de sistema de ventilación.
- Sulfatación de los terminales a bajos niveles de carga.

Debido a estos inconvenientes, las baterías de Ácido Plomo no resultan adecuadas para su utilización en los sistemas de almacenamiento de energía en vehículos ferroviarios.

En la siguiente tabla se exponen los valores típicos de una batería AGM de uso industrial:

Tabla 1. Valores típicos de batería AGM de uso industrial

Parámetro	Valor
Tensión nominal celda	2V
Corriente máxima de descarga	20C
Corriente máxima de carga	1C / (3 horas)
Densidad de energía	40Wh/kg
Densidad volumétrica de energía	800(Wh/l)
Densidad de potencia	180 W/kg
Rango de Temperatura (Carga)	-40°C a 60°C
Rango de Temperatura (Descarga)	-40°C a 60°C
Vida Útil	300-500 ciclos

Su principal campo de aplicación lo constituyen aquellos sistemas en los que el peso no es un criterio fundamental. De este modo, estas baterías son la principal tecnología en uso en el mundo del automóvil de cara a aplicaciones SLI (Starting-Arranque, Lightning-Illuminación, Ignition-Encendido). Una de las principales razones por las que esta tecnología sigue en auge es su bajo coste en comparación con otras tecnologías.

Existe, no obstante, una infraestructura de reciclado de estas baterías para separar el plomo y el ácido sulfúrico.

2.3.2 Baterías de Níquel Cadmio

Aunque las baterías de Níquel Cadmio disponen de una densidad energética mucho mayor y una vida útil más larga que las baterías de Ácido Plomo, no entregan suficiente potencia y por lo tanto no se consideran aptos para su aplicación en

vehículos eléctricos o ferroviarios. El cadmio, además, es un elemento tóxico que incrementa la falta de interés por dicha tecnología.

2.3.3 NiMH

Las baterías de NiMH son la evolución natural de las baterías de NiCd, cuya utilización se prohibió en Septiembre de 2008 por la directiva europea (salvo para aplicaciones específicamente autorizadas). Las baterías de NiMH son mejores que sus predecesoras en lo que respecta a la densidad de energía y al efecto memoria y, además, no emplean materiales tóxicos.

Internamente estas baterías están compuestas por un electrodo positivo de Nickel-Oxi-Hidróxido (NiOOH) y un electrodo negativo compuesto de una aleación metálica que permite la absorción de hidrogeno (la aleación utilizada suele variar en función del fabricante). Como electrolito utiliza, al igual que sus antecesoras, una solución de hidróxido de potasio.

Las principales ventajas de esta tipo de baterías son:

- Ambientalmente amigables: En la actualidad es la tecnología más respetuosa con el medio ambiente.
- Elevada densidad de energía.
- Larga vida: Convenientemente tratada, se considera que se pueden tener una vida útil superior a los 1000 ciclos.
- Gran capacidad de ciclado.
- Alta velocidad de carga: Pueden ser cargadas en periodos de tiempo tan cortos como 15 minutos (4C) si se utilizan los algoritmos de carga adecuados.

De igual manera, respecto a otras tecnologías presenta las siguientes desventajas:

- Bajo voltaje nominal: 1,2 V frente a los 2 V de la tecnología Ácido Plomo o los más de 3 V de las tecnologías basadas en litio.
- Auto descarga elevada: La hace poco conveniente para aquellas aplicaciones en las que deba ser almacenada por largos periodos de tiempo.
- Algoritmo de detección de fin de carga complejo: Se requiere de un hardware específico para determinar el final del proceso de carga.

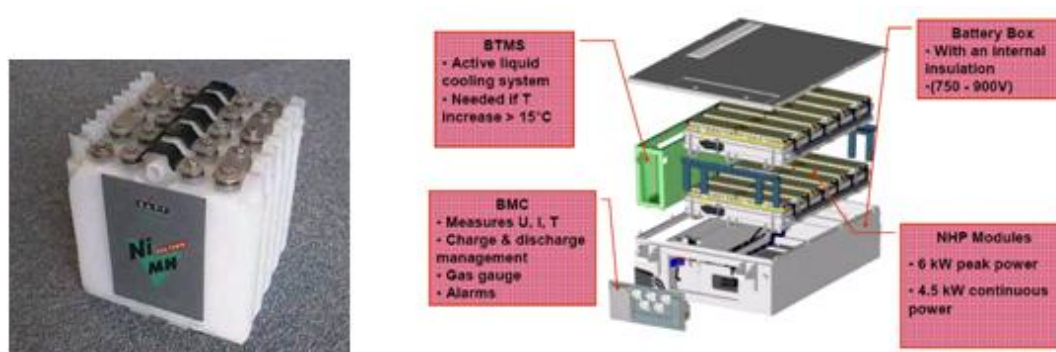
En la siguiente tabla se expresan los valores típicos de esta tecnología:

Tabla 2. Valores típicos de baterías de NiMH

Parámetro	Valor
Tensión nominal celda	1.2V
Corriente máxima de descarga	20C
Corriente máxima de carga	1C / (1 horas)
Densidad de energía	80Wh/kg
Densidad volumétrica de energía	300(Wh/l)
Densidad de potencia	1800 W/kg
Rango de Temperatura (Carga)	-20°C a 60°C
Rango de Temperatura (Descarga)	-20°C a 60°C
Vida Útil	600-1000 ciclos

Este tipo de baterías han sido usadas satisfactoriamente para su aplicación en los vehículos eléctricos así como en vehículos híbridos y en aplicaciones ferroviarias como el tranvía de Niza realizado por Alstom (2007).

Figura 6. Batería de NiMH de Saft para aplicaciones de tranvía



Fuente: Saft

Aunque estas baterías no son tóxicas no existe en la actualidad una infraestructura para el reciclado de sus componentes.

Los principales fabricantes de baterías de NiMH son: Saft, Cobasys, Panasonic, EV Energy.

2.3.4 Litio-ion

Esta tecnología está considerada como una de las más prometedoras para su utilización los sistemas de almacenamiento de vehículos ferroviarios, gracias a su gran densidad de energía, su buena eficiencia, su buen comportamiento ante la temperatura y su baja autodescarga. En comparación con las tecnologías previamente mencionadas, las baterías de litio podrían alcanzar en un futuro el nivel de densidad de potencia de las ultracapacidades. Otra mejora importante respecto a otras tecnologías de baterías es el aumento de la vida útil, siempre y cuando opere dentro de un estrecho rango de temperaturas.

No obstante, aún cuando esta tecnología presente beneficios sustanciales respecto a los otros sistemas mencionados, también presenta algunas desventajas que deben ser tenidas en cuenta, como lo son inestabilidad ante situaciones de sobrecarga, los problemas de seguridad debido a su inflamabilidad y su insuficiente capacidad de ciclado. Además, su coste en la actualidad es elevado, aunque se prevé un abaratamiento de esta tecnología impulsada por el desarrollo de automóviles híbridos y eléctricos.

Algunos de estos problemas pueden acotarse mediante la utilización de un sistema electrónico de Gestión de la Batería o BMS (Battery Management System). Este sistema es el encargado de verificar en todo momento que la operación de la batería tanto en sus ciclos de carga como de descarga se realiza dentro la ventana de operación que el fabricante ha definido para ella.

En general las baterías de litio están compuestas por los siguientes elementos:

- **Cátodo o Electrodo Positivo:** Generalmente está formado de un compuesto no metálico a base de litio. El más utilizado es el LiCoO_2 pero actualmente se están explorando otras alternativas.
- **Ánodo o Electrodo Negativo:** Los compuestos a base de carbono tales como el grafito o el Coke han sido predominantes, pero actualmente se están experimentando nuevos titanatos de litio cuyos resultados hasta el momento están siendo positivos.
- **Electrolito:** El funcionamiento de las baterías de litio se basa en el transporte de los iones de litio (de ahí el nombre de Litio-ion) entre el cátodo y el ánodo. En este sentido el electrolito sirve a modo de medio de transporte. A día de hoy existen dos tipos fundamentales de electrolitos, las sales carbonadas y los electrolitos poliméricos (éstos últimos son los que dan nombre a las llamadas baterías Litio-Polímero).

Debido a que en la construcción de la batería existen diversas posibilidades, sobre todo a nivel de ánodo y cátodo, estas baterías presentan diferentes características de funcionamiento (tensión nominal, capacidad, etc.).

A continuación se muestra, a nivel orientativo, una tabla con las características de una batería de Litio-ion:

Tabla 3. Valores típicos de una batería de Litio-ion.

Parámetro	Valor
Tensión nominal	3.6/3.7 V
Energía específica	150-250 Wh/kg
Potencia específica	300-1500 W/kg
Densidad volumétrica de energía	250-530 Wh/l
Rango de temperatura (Carga)	0-45°C
Rango de temperatura (Descarga)	-20-60°C
Vida útil	400-1200 ciclos

2.3.5 Na-NiCl₂ (Zebra)

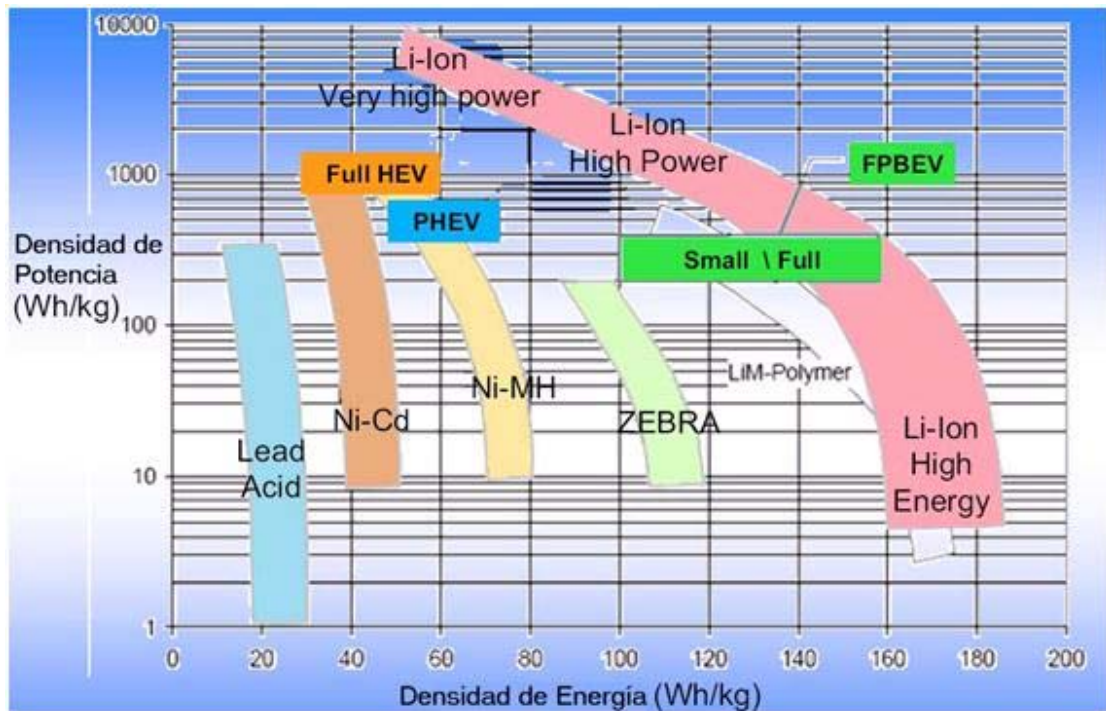
A diferencia del resto de baterías esta tecnología está caracterizada por las altas temperaturas a las que la batería necesita estar sometida para su correcto funcionamiento. El hecho de necesitar operar a temperaturas entre los 270°C y los 350°C dificulta de gran manera la utilización de esta tecnología para el almacenamiento de energía, debido a la necesidad de alojar las baterías en un contenedor adecuado que provea al conjunto de un mecanismo de calentamiento y del aislamiento térmico correspondiente. Asimismo, al requerir altas temperaturas de funcionamiento, necesita de largos periodos de calentamiento antes de su puesta en marcha.

Por ello, estas baterías sólo son adecuadas para su utilización en sistemas en los que deban estar constantemente en funcionamiento tales como en aplicaciones de soporte (UPS, etc.) o en sistemas en los que mientras el vehículo no está en utilización, sus baterías se encuentran en proceso de carga.

Hoy en día, las baterías más utilizadas en los sistemas de acumulación de los equipos de tracción ferroviarios son las de tecnología NiMH. A pesar de que las propiedades de las baterías de Litio-ion son mejores y de que en un futuro se pretenda que éstas sean las más utilizadas, todavía son muy caras y tienen problemas de seguridad que es necesario solventar.

En la siguiente imagen se muestra una tabla que representa la relación entre la densidad de potencia y la densidad de energía según el tipo de batería.

Figura 7. Relación densidad de potencia/densidad de energía para diferentes tipos de batería



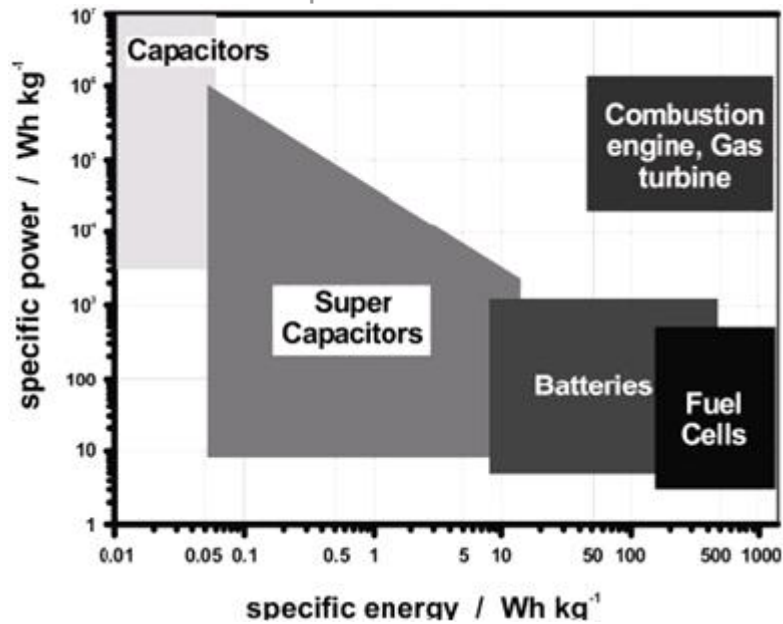
2.4. Comparativa entre los diferentes sistemas de acumulación

Es evidente que cada sistema de almacenamiento de energía tiene su aplicación bien definida en cuanto a densidades de energía, densidades de potencia, ciclado y vida del componente.

El coste, la seguridad y el tamaño son también factores a tener en cuenta en cada aplicación.

La Figura 8 sitúa los sistemas de almacenamiento en la aplicación ferroviaria teniendo en cuenta la densidad de potencia y densidad de energía de cada uno de ellos.

Figura 8. Relación densidad de potencia / densidad de energía para diferentes tipos de batería



La Tabla 4 resume las principales ventajas e inconvenientes de las tecnologías consideradas en esta monografía y la Tabla 5 resume las prestaciones de las diferentes tecnologías.

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías

	Baterías	FlyWheel	Ultracapacidades
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidad de energía - Auto descarga larga 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidad de energía - Alto N° de ciclos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Media densidad de energía - Alta potencia - Alto N° de ciclos - Auto descarga media - Control sencillo
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo N° de ciclos - Potencia baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema complejo - Potencia pico limitada, dependiente del nivel de energía. - Auto descarga rápida, depende de auxiliares - Control complejo 	<ul style="list-style-type: none"> - T de trabajo < 60°C. - T de almac. < 70°C.

Tabla 5. Comparativa de prestaciones de las diferentes tecnologías

	Baterías	FlyWheel	Ultracapacidades
T carga	1 a 5 horas	1 minuto	0.3 a 30 segundos
T descarga	0.3 a 3 horas	1 minuto	0.3 a 30 segundos
Energía (Wh/kg)	10 a 100	5 a 15	1 a 5
Potencia (W/kg)	<1000	>1000	10000
Ciclos	1000	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$
Eficiencia Carga/Descarga	0.7 a 0.85	0.85 a 0.92	0.85 a 0.98
Vida máxima	<5 años	>15 años	>5-10 años
Refrigeración	Agua	Agua	Forzada, Aire

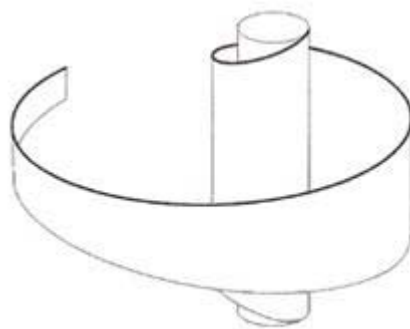
2.5. Otras líneas de investigación

2.5.1 Resorte radioidal

Recientemente se ha comenzado a investigar la posibilidad de desarrollar un nuevo sistema de acumulación basado en el uso de resortes radioidales. El sistema está formado por unas láminas capaces de enrollarse sobre sí mismas en forma de espiral al aplicar un par torsor variable, absorbiendo la energía mecánica que devolverán al sistema posteriormente en forma de par constante. Desde el punto de vista del diseño, es necesario que la curvatura de las láminas sea creciente o decreciente a lo largo de la espiral para que éstas sean capaces de absorber o aportar el par. El espesor de la lámina también debe variar a lo largo de la espiral.

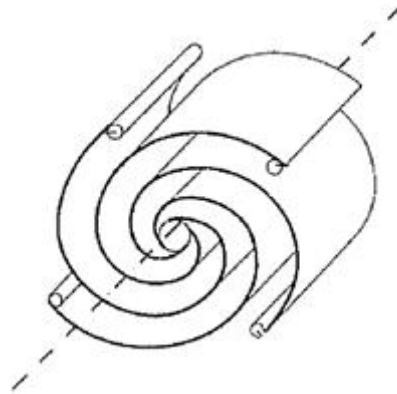
Los materiales que se consideran más ideales para éste sistema son aquellos composites formados por una mezcla de resinas y fibras, colocados en capas con el objetivo de obtener la mayor elasticidad posible.

Figura 9. Resorte radioidal



Desde el punto de vista de la disposición de estos resortes, pueden conectarse varias láminas en serie o en paralelo. Se conectan en serie cuando se quiere absorber una potencia de pico, ya que el par de carga y descarga será la suma del par de todas las láminas. Sin embargo, si se trata de absorber una mayor cantidad de energía, se conectan en paralelo. De esta forma, la energía total acumulada es la suma de la energía de cada lámina.

Figura 10. Resortes radioidales con láminas en paralelo



Este sistema es capaz de acumular una gran cantidad de energía en un espacio reducido. Además, se trata de un regulador energético, puesto que es capaz de acumular energía en momentos en los que haya exceso de ésta y aportarla en momentos de escasez.

Uno de los principales inconvenientes que presenta esta tecnología en aplicaciones de sistemas de acumulación embarcados es la necesidad de reaccionar el gran par torsor generado en el proceso tanto de carga como de descarga. Por este motivo, en la actualidad, parece más factible que se emplee como sistema de acumulación fijo en la propia infraestructura ferroviaria.

Este acumulador de energía elastodinámico tiene aplicaciones potenciales en el ámbito de la producción de energías renovables, en el transporte, en sistemas de suministro de energía ininterrumpidos, etc.

2.5.2 Nanotubos de Carbono

Los nanotubos de carbono (CNT), descubiertos en 1991 por el ingeniero japonés Sumio Iijima, están constituidos por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica, de tal forma que su estructura es la misma que si se enrollara sobre sí misma una lámina de grafito. Pueden estar tanto cerrados en los extremos por media esfera de fullereno como abiertos, y pueden ser de dos tipos: de pared simple (SWCNT-Single Wall Carbon Nanotubes), si están constituidos por una sola lámina enrollada; o de pared múltiple (MWCNT-Multiple Wall Carbon Nanotubes), si están formados por varias láminas concéntricas enrolladas con diferentes diámetros.

Figura 11. CNT de pared simple

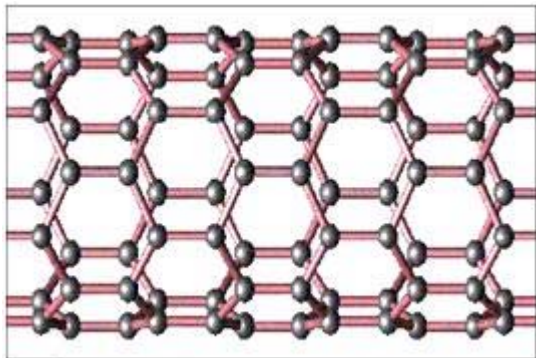
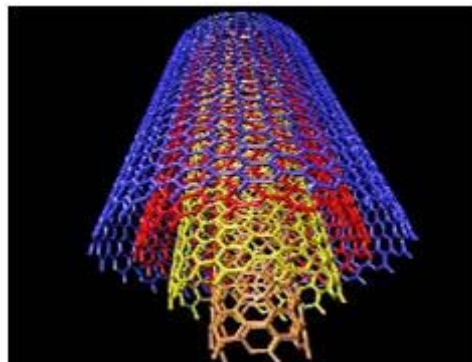


Figura 12. CNT de pared múltiple



En ambos casos, su principal característica es que tiene una elevada relación longitud/diámetro, puesto que, mientras la longitud puede variar desde unas micras hasta milímetros e incluso algunos centímetros, el diámetro es del orden de los nanómetros. Esto da lugar a interesantes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.

Los CNT pueden aportar mejoras en el campo del almacenamiento de energía debido, por un lado, a su elevada superficie específica, la cual, puede garantizar sistemas de almacenamiento ligeros y, por otro lado, a que sus propiedades mecánicas los hacen más resistentes.

A continuación se exponen algunas de las posibles aplicaciones de los nanotubos de carbono en el área del almacenamiento de energía.

Almacenamiento de Hidrógeno

La investigación sobre el almacenamiento de hidrógeno está despertando mucho interés debido a que es una fuente de energía que podría sustituir a la actualmente predominante basada en combustible fósil. Existen varias alternativas posibles para almacenar el hidrógeno, pero el uso de los nanotubos de carbono se aplicaría a la fisisorción (almacenamiento en el que sólo intervienen las fuerzas de Van Der Waals).

La razón de que los CNT sean candidatos a ser utilizados para almacenamiento de gases, hidrógeno en particular, es que gracias a su curvatura y hueco interior, los campos generados por las paredes se solapan para dar una mayor interacción con las moléculas del gas que la que se tendría en el caso de una superficie de carbono plana.

Sin embargo, si comparamos los nanotubos de carbono con materiales metalorgánicos, debido a su mayor área específica por unidad de volumen, éstos últimos resultan ser más apropiados.

Por tanto, se deduce que el uso de CNT en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno puede ser un paso intermedio, pero no parece ser un paso definitivo ya que hay otros materiales con, a priori, mejores prestaciones.

Ultracapacidades

Un condensador es un dispositivo formado por dos placas conductoras o armaduras, separadas por un material dieléctrico. Dispuesto en un circuito eléctrico, al

someterlo a una diferencia de potencial, este dispositivo almacena carga en las armaduras.

Los condensadores tienen en general poca capacidad de almacenamiento y su característica principal es el suministro de una elevada potencia puntual que puede ser requerida en un momento muy concreto del funcionamiento de un dispositivo, un flash por ejemplo. Se puede decir, por tanto, que los condensadores son más acumuladores de potencia que de energía.

Como ya se ha comentado al comienzo del documento, una ultracapacidad es un condensador que tiene una alta capacidad para almacenamiento de carga. La capacidad para almacenar energía depende del material y la superficie de las placas conductoras, lo que hace que se utilicen materiales de muy alta porosidad, con lo que se dispone de más espacio para almacenar carga que en un condensador normal.

En la actualidad, estas placas conductoras se están desarrollando con carbón activo debido a la alta porosidad que presenta este material. La utilización de CNT en esta aplicación permite cambiar el material poroso e irregular del carbón activo por una estructura de nanotubos alineados de pocos nanómetros de diámetro cada uno, con lo que se aumenta la capacidad de carga al tener mayor superficie específica.

Pilas de combustible

Una célula o pila de combustible tiene un funcionamiento electroquímico similar a una pila pero con la diferencia de que los reactivos se reabastecen en todo momento de manera que tiene vida ilimitada.

Uno de los elementos esenciales para el buen funcionamiento de la pila es el electrocatalizador, normalmente un material precioso como el platino o el rutenio y, por tanto, caro. Éste debe estar en el electrodo, el cual debe ser un material poroso, de elevada superficie específica, inerte y buen conductor, características cumplidas por los CNT y que los hacen candidatos a ser utilizados.

Baterías de Litio-ion

El litio es el elemento conocido que tiene un mayor potencial electroquímico, lo que, teóricamente, hace de él el mejor candidato para almacenar energía.

En las baterías de Litio-ion se produce el tránsito, en función de un potencial externo aplicado, de iones entre el cátodo (normalmente de LiCoO_2) y el ánodo de carbono (y a la inversa cuando se carga). La aplicación de los CNT en este caso, se produce en el ánodo de la pila, debido a su elevada superficie específica, lo que permite aumentar la reacción con el electrolito y a su elevada conductividad. El ánodo se puede construir únicamente con CNT pero lo habitual es usar los CNT como aditivos en grafito. Se han realizado estudios con diferentes valores de % en peso de CNT y se obtiene una correlación entre el aumento del % y la mejora de la eficiencia de la batería en función del número de ciclos de carga. En estudios recientes se muestra una eficiencia del 100% de la batería tras 50 ciclos de carga con un % en peso de nanotubos del 10%.

Se cree que las mejoras que introducen los nanotubos en esta aplicación son debidas a la mayor superficie de contacto que ofrecen los nanotubos con el electrolito y al aumento de la conductividad que ofrece la presencia de los nanotubos en el ánodo.

Existen además otras ventajas como una mayor vida de la pila y unos electrodos mecánicamente más robustos.

3. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE ACUMULACIÓN EMBARCADOS

3.1. Vehículos eléctricos

Algunas aplicaciones se pueden resolver en las propias subestaciones. Sin embargo, en función del tipo de red, explotación o vehículo, puede ser más recomendable instalar el sistema de acumulación embarcado obteniendo los siguientes beneficios:

- Regeneración de energía: Se puede regenerar hasta el 40% de la energía consumida.
- Vehículo sin catenaria: Bajo impacto ambiental e infraestructura más económica. Es una aplicación orientada a tranvías.
- Reducción de picos de potencia hasta un 50%.
- Estabilización del voltaje y menores pérdidas de conducción: Menos subestaciones, más vehículos por subestación, más prestaciones si la subestación es la limitante.

3.2. Vehículos Diesel-Eléctricos híbridos

En otro tipo de vehículos se pueden lograr:

- Reducciones de consumo entre un 25 y un 40%.
- Reducción de ruido en estaciones: Se puede apagar el vehículo de forma temporal.
- Reducción de emisiones en túneles.
- Utilización para arranque de motores.

3.3. Combinación de sistemas de acumulación

No se deben descartar, en ningún caso, los vehículos híbridos, que pueden estar basados en tecnologías asentadas (como puede ser el diesel o gas) o las posibilidades que puede dar la tecnología basada en el hidrógeno, unidos a algún tipo de sistema de acumulación, con el doble objetivo de mejorar las prestaciones del vehículo y optimizar el rendimiento energético del sistema.

De esta manera, la fuente primaria de energía puede aportar el valor medio de la potencia mediante un sistema de alta densidad de energía y la fuente secundaria (el sistema de acumulación) aportaría los picos y se encargaría de acumular la energía

sobranante de los procesos de frenado regenerativo aumentando la eficiencia del sistema.

Existe otra posibilidad en la que podría analizarse la viabilidad de combinar dos sistemas de acumulación, utilizando de la mejor manera posible las ventajas de cada una de las tecnologías buscando el mejor rendimiento energético, máxima densidad de energía compatible con la aplicación y mínimo coste del ciclo de vida del producto.

Este tipo de combinaciones puede tener potencial en los vehículos ligeros (tranvías y metros ligeros) en los que pueden plantearse trayectos más o menos largos sin catenaria con el objeto de limitar al máximo el impacto visual.

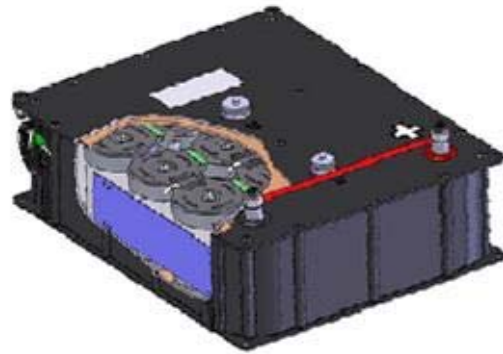
Como posibles opciones estarían las siguientes:

- **Baterías y ultracapacidades:** Las baterías serían la fuente primaria de energía por su alta densidad de energía y las ultracapacidades darían la dinámica al sistema garantizando la regeneración de energía con altos niveles de potencia. Una ventaja adicional de esta combinación es que solventa los imprevistos por paradas de emergencia que harían aumentar en exceso el tamaño del sistema de acumulación de menor densidad de energía específica. Se dispone de este modo de una reserva de seguridad utilizable con una potencia media o baja en casos de emergencia o puntuales (zona de mucho gradiente).
- **Baterías y volante de inercia:** Este caso es similar al anterior y podría tener su aplicación en vehículos algo más pesados, en los que las frenadas son más largas al tener el volante de inercia mayor densidad de energía que las ultracapacidades.
- **Volante de inercia y ultracapacidades:** En este caso el volante de inercia haría la función de fuente primaria de energía (potencia media de tracción más auxiliares) mientras que las ultracapacidades se encargarían de aportar la dinámica propia del equipo de tracción garantizando la acumulación de energía.

4. PROYECTOS DESARROLLADOS CON SISTEMAS DE ACUMULACIÓN

Los sistemas de acumulación que se han mencionado en el apartado anterior no se emplean de manera independiente y dispersa en los vehículos ferroviarios, sino que se agrupan en módulos de forma compacta. Un módulo de acumulación está formado por un conjunto de celdas interconectadas entre sí, tanto en serie como en paralelo. El número de celdas y el tipo de conexión dependen del funcionamiento posterior y de las especificaciones que deba cumplir el conjunto.

Figura 13. Módulo basado en ultracapacidades



Es necesario definir una estrategia de gestión adecuada para que el módulo cumpla con las especificaciones funcionales. Una estrategia tiene las siguientes funciones:

- Medir la energía almacenada en cualquier momento
- Estimar el deterioro de las celdas (disminución de la capacidad de almacenamiento y aumento de la impedancia interna de la celda)
- Equilibrado de celdas: Para compensar las diferencias internas y evitar que unas se deterioren más que otras.
- Gestión térmica de forma que todas las celdas estén dentro de la ventana de temperatura deseada.
- Gestión de carga y descarga: Asegurar que la carga / descarga se hace respetando los niveles de tensión y corriente definidos.
- Protección: Los sistemas electroquímicos de almacenamiento no deben funcionar fuera de las condiciones preestablecidas de voltaje, corriente, temperatura, etc. El funcionar en condiciones inapropiadas puede derivar en problemas como avalanchas térmicas, por ejemplo. Por ello, cada celda está dotada de mecanismos para evitar situaciones peligrosas, como válvulas de seguridad.
- Almacenamiento de datos.

A continuación se muestran algunos de los sistemas de acumulación que existen en la actualidad en su contexto de aplicación, así como algunos proyectos Europeos orientados al ahorro y a la eficiencia energética.

4.1. Autotram

El instituto de transporte e infraestructuras Fraunhofer (IVI) de Alemania ha desarrollado un vehículo híbrido que es traccionado mediante una "fuel cell" y un sistema de apoyo desarrollado con un volante de inercia.

Se trata de dos coches propulsados por 80 kW de pila de combustible (fuente de energía principal) y tres motores eléctricos. El hidrógeno se almacena con una presión de 200 bares en los tanques de 10 kg montados en el techo del vehículo.

Como sistema de apoyo para proporcionar energía en los picos de potencia durante la tracción, el vehículo utiliza un volante de inercia de 325 kW de CCM con una capacidad energética de 4 kWh, la cual se puede recargar en las frenadas, mediante la pila de combustible o en las estaciones.

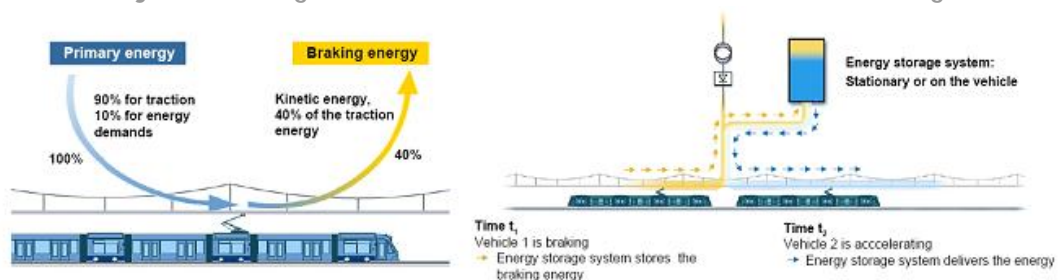
Figura 14. Prototipo Autotram del Instituto de Fraunhofer



4.2. Sitras[®] SES (Siemens Transportation)

El Sitras SES (Stationary Energy Storage System) es un sistema de almacenamiento de energía basado en ultracapacidades e instalado en tierra que almacena la energía de las frenadas de los vehículos que se alimentan de la catenaria conectada al Sitras y aporta los picos de potencia cuando lo requiere cualquier vehículo.

Figura 15. Flujos de energía en un sistema con almacenamiento de energía Sitras



Fuente: Siemens

Esto supone una combinación económica y ecológica, ya que reduce el consumo de la energía de la catenaria hasta un 30% y reduce las emisiones de CO₂. Por otro lado, estabiliza la catenaria y minimiza su coste de mantenimiento.

Se trata de un banco de ultracapacidades con las siguientes características:

- Número de ultracapacidades: 1152.

- Capacidad total: 94 F.
- Energía utilizable: 2.5 kWh.
- Ahorro energético por hora: 80 kWh/h.
- Máxima potencia: 0.7 MW.
- Rango operable de tensión: 600-750 V.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2 cubos de 1.4x0.7x2.6 m³ + 2 cubos de 1.3x1x2.6 m³.
- Peso: 4.3 Tn

Temperatura de funcionamiento: -20 a 40°C

Este sistema se está aplicando en varias ciudades Europeas como Colonia y Madrid, y en EEUU como por ejemplo en Portland y Oregon.

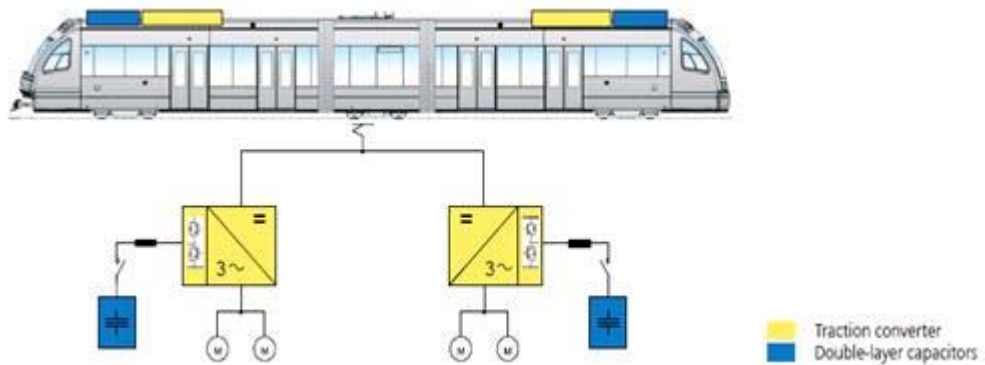
4.3. Sitras ® MES (Siemens Transpotation)

El Sitras MES (Mobil Energy Storage system) es un sistema de almacenamiento de energía basado en el uso de ultracapacidades. El banco de ultracapacidades está instalado a bordo del vehículo, en el techo de éste, por lo que se clasifica dentro de los sistemas embarcados, y ayuda a la recuperación de parte de la energía generada en las frenadas.

El ahorro energético obtenido es similar al caso en el que el sistema estuviera instalado en tierra (como sucede en el Sitras SES), con la diferencia de que se dan menores pérdidas energéticas ya que la energía recorre una menor distancia. De esta manera, tiene valores de reducción del consumo en catenaria de hasta un 30% y una reducción en las emisiones de CO₂ de hasta 80 Tn por año. Además, este sistema ayuda a la estabilización de la tensión de la catenaria, lo cual, aumenta la disponibilidad de circulación de vehículos ferroviarios.

El banco de ultracapacidades se conecta eléctricamente al punto de alimentación mediante un chopper, el cual, permite tanto integrarlo en vehículos nuevos (Integrated Concept) como instalarlo en vehículos ya existentes (Independent Concept). Ambos sistemas están aprobados por "BOStrab" (German Construction and Operating Code for Tramways).

Figura 16. Esquema de Sitras MES integrated Concept



Fuente: Siemens

A continuación se muestran los datos técnicos de las ultracapacidades empleadas en este sistema:

- Energía utilizable: 0.85 kWh.
- Máxima potencia: 2x144 kW.
- Rango operable de tensión: 190-480 V.
- Refrigeración: forzada.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2000x1520x630 mm³.
- Peso: 820 kg.

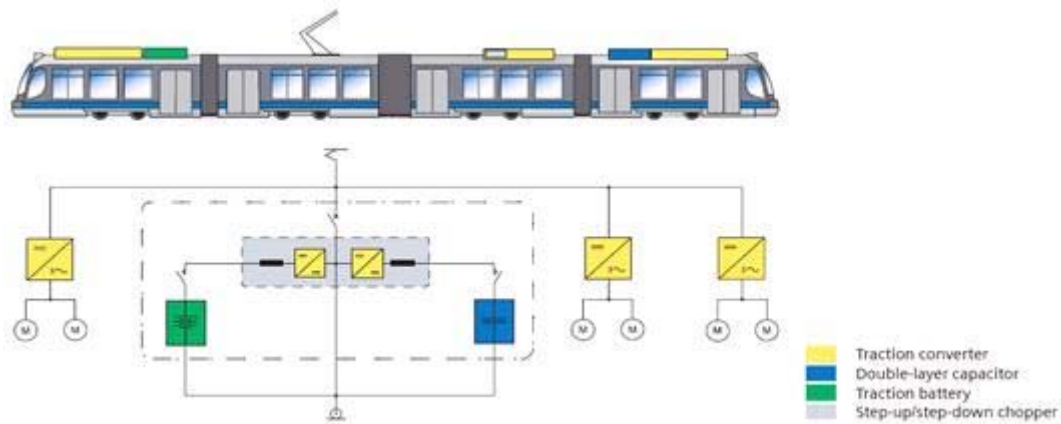
4.4. Sitras[®] HES (Siemens Transportation)

Sitras HES (Hybrid Energy Storage system) es un sistema híbrido que combina dos unidades de almacenamiento: el banco de ultracapacidades del Sitras MES y un sistema de tracción formado por baterías de NiMH.

El sistema, instalado en el techo del tren y conectado al punto de alimentación mediante un chopper, se carga en los tramos provistos de catenaria, en las paradas o con la energía que se regenera durante la frenada. Esta reserva de energía proporciona al vehículo autonomía suficiente para recorrer tramos de hasta 2500m.

Al igual que el Sitras MES, el Sitras HES obtiene una reducción en la demanda de energía de hasta un 30%, emite 80 Tn menos de CO₂ al año y estabiliza la tensión de la línea. Asimismo, este sistema puede integrarse en vehículos nuevos o en sistemas ya existentes.

Figura 17. Esquema de Sitras HES Independent Concept



Fuente: Siemens

Características del banco de ultracapacidades:

- Energía utilizable: 0.85 kWh.
- Máxima potencia: 2x144 kW.
- Rango operable de tensión: 190-480 V.
- Refrigeración: forzada.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2000x1520x630 mm³.
- Peso: 820 kg.

Características del sistema de baterías (normalmente, 44 bloques de celdas de NPH10-340 conectadas en serie):

- Energía utilizable: 18 kWh.
- Máxima potencia: 105 kW.
- Tensión nominal: 528 V.
- Refrigeración: agua.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 1670x1025x517 mm³.
- Peso: 826 kg.

El primer tren con el sistema Sitras HES lleva ya más de un año en servicio en el sur de Portugal, realizando con éxito trayectos entre Almada y Seixal.

Figura 18. Sitras HES en Lisboa

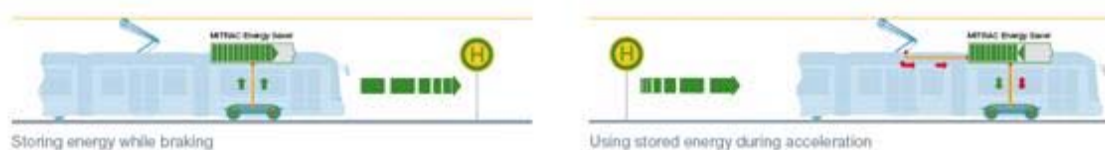


4.5. MITRAC Energy Saver (Bombardier Transportation)

El concepto de MITRAC Energy Saver es el mismo que el del Sitras MES, es decir, almacena la energía recuperada en la frenada en un banco de ultracapacidades para su posterior uso durante la aceleración.

La ventaja de almacenar la energía en un sistema móvil, en lugar de en subestaciones fijas, es que se evitan las pérdidas que se producirían al llevar la energía al sistema a través de la catenaria.

Figura 19. Esquema de MITRAC Energy Saver



Fuente: Bombardier

Con este sistema se reducen el consumo de la catenaria en un 30% y los picos de potencia hasta un 50%. Al reducir la potencia de pico, se reduce la demanda de corriente, por lo que son necesarias menos subestaciones que estarán más alejadas entre sí. De esta manera, disminuye el coste de la infraestructura.

En el caso de vehículos DMU (Diesel Multiple Units), el sistema MITRAC reduce el consumo energético en un 35%.

Además de durante la aceleración, la energía almacenada puede utilizarse en momentos en los que hay una demanda extra de energía, o cuando se producen caídas de tensión en la red. También permite recorrer tramos cortos sin catenaria de manera que, en caso de fallo en ésta, el tranvía pueda llegar a la siguiente estación (500m).

Las características del banco de ultracapacidades son:

- Aplicación: Light Rail Vehicle
- Energía instalada: 1 kWh.
- Máxima potencia de salida: 300 kW.
- Refrigeración: Aire forzado.
- Peso: 428 kg.
- Dimensiones: 1700x680x450 mm³.
- Aplicación típica: 2 cajas/30m, 2kWh, 600kW.
- Aplicación: DMU
- Energía instalada: 1.17 kWh.
- Máxima potencia de salida: 100 kW.
- Refrigeración: convección natural.
- Peso: 466 kg.
- Dimensiones: 1800x1500x250 mm³.
- Aplicación típica: 6 cajas/4 coches, 7kWh, 600kW.

El banco de ultracapacidades se conecta con el bus DC mediante un convertidor Buck-boost bidireccional, cuyos componentes se acoplan al sistema de almacenamiento.

El prototipo MITRAC Energy Saver está en funcionamiento desde Septiembre de 2003 en Mannheim, Alemania, donde completó un período de prueba de 4 años con un ahorro energético del 30%.

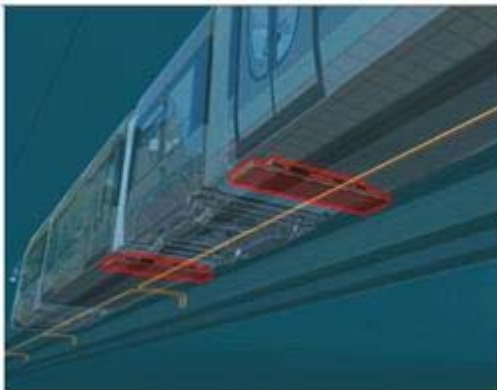
Otro beneficio del sistema de almacenamiento de energía basado en ultracapacidades realizado por Bombardier, es la reducción del tamaño de los motores diesel. En los casos en que no exista ningún sistema de almacenamiento, el motor diesel debe ser dimensionado para proporcionar los picos de potencia. Si esos picos pueden ser proporcionados por las ultracapacidades, el tamaño del motor diesel se reduce considerablemente, ya que sólo deberá dar la energía media. Por otro lado, se reduce el coste energético y las emisiones de CO₂ entre un 25 y 30% y se da la posibilidad de apagar los motores en las estaciones y túneles.

4.6. PRIMOVE (Bombardier Transportation)

Este sistema se caracteriza porque la transferencia de energía no se realiza entre pantógrafo y catenaria, sino que ésta se da por inducción. Los componentes del suministro eléctrico están escondidos bajo el suelo a lo largo del recorrido y no hay contacto físico entre ellos y el vehículo.

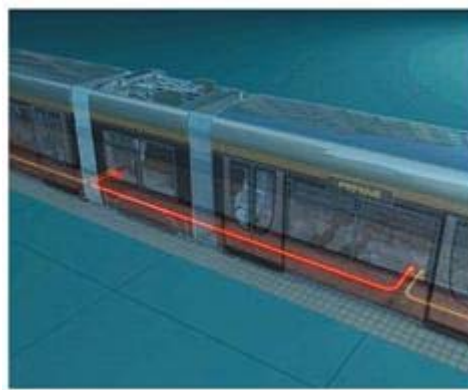
Los cables extendidos bajo el suelo están conectados al suministro eléctrico, y son energizados únicamente cuando el vehículo los cubre completamente, lo cual, garantiza una operación segura. Bobinas colectoras situadas bajo el vehículo convierten el campo magnético creado por los cables en la corriente que alimenta al sistema eléctrico del vehículo.

Figura 20. Bobinas colectoras de PRIMOVE



Fuente: Bombardier

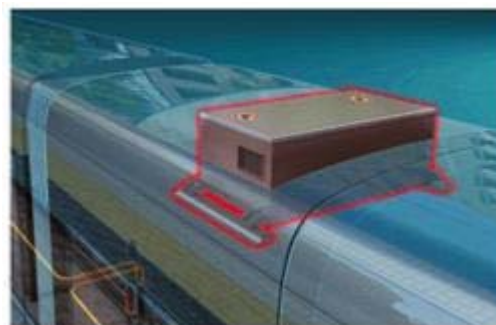
Figura 21. Cables subterráneos de PRIMOVE



Fuente: Bombardier

El sistema PRIMOVE está conectado al MITRAC, el cual almacena la energía eléctrica recuperada durante la frenada y está continuamente cargado durante el servicio, tomando la energía del sistema subterráneo.

Figura 22. MITRAC Energy Saver



Fuente: Bombardier

4.7. Tranvía de Niza (CITADIS de ALSTOM)

La característica principal del tranvía de Niza, en servicio desde el año 2007, es su Sistema de Autonomía de Tracción embarcada (SAT). El SAT está compuesto por un cargador de baterías, disyuntor y aparellaje de conmutación, un sistema de refrigeración, elementos de aislamiento de seguridad y mando y un cofre de baterías de tecnología NiMH.

Este sistema permite al tranvía operar sin cables distancias menores de 1km a velocidad máxima de 30km/hora. Para ello, el conductor inicia el modo de autonomía bajando el pantógrafo, por lo que el tranvía circulará apoyado en la energía que obtiene de las baterías. Al llegar de nuevo a la zona con catenaria, se finaliza el modo de autonomía levantando el pantógrafo, con lo que el vehículo funciona nuevamente con energía procedente de la catenaria. Las baterías se recargan durante la operación con cable. Para evitar errores, el tranvía dispone de un sistema de alarmas sonoras y visuales que indica al conductor el momento en el que el tramo a recorrer exige un cambio de alimentación.

Las características de las baterías son las siguientes:

- Citadis 302:
- Fabricante: SAFT.
- Tecnología: NiMH.
- Tipo: NHP10-340.
- Tensión nominal: 12V.
- Cantidad: 68.
- Capacidad: 34 Ah.
- Potencia Máxima: 200kW.
- Refrigerante: Agua glicolada.
- Temperatura de funcionamiento: 25°C.
- Citadis 402:
- Fabricante: SAFT.
- Tecnología: NiMH.
- Tipo: NHP5-680.
- Tensión nominal: 6V.
- Número: 68+32.
- Capacidad: 68 Ah.
- Potencia Máxima: 280kW.
- Refrigerante: Agua glicolada.
- Temperatura de funcionamiento: 25°C.

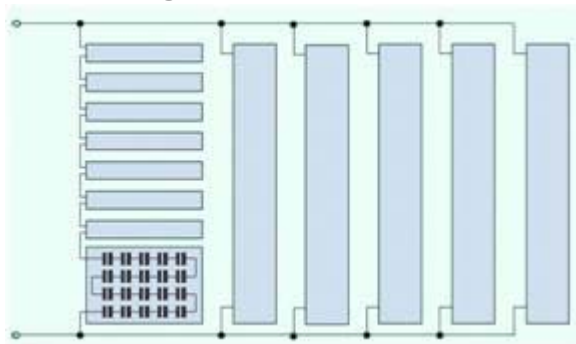
Entre todas las ventajas de este sistema destaca la alta densidad de energía, 13.6 kWh. Además, dispone de reserva de energía para modos degradados y las baterías son reciclables por el proveedor.

Algunos de los inconvenientes son que la profundidad de descarga y la potencia son limitadas. La velocidad de recarga es lenta y la vida útil es corta (5-7 años). Además, es susceptible a las inclemencias ambientales.

4.8. Tranvía de París (ALSTOM)

El sistema de almacenamiento de energía del tranvía de París, en servicio comercial desde Septiembre de 2009, está basado en el cofre de ultracapacidades STEEM. Éste está formado por 48 módulos (1 módulo contiene 20 celdas conectadas en serie) distribuidos en 6 ramas en paralelo, cada una de ellas con 8 módulos en serie, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 23. Cofre STEEM



Fuente: Alstom

A continuación se indican algunas características del cofre:

- Energía utilizable: 1.62 kWh.
- Máxima potencia: 500 kW.
- Tensión: 400 V.
- Velocidad de carga: 15 segundos.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2300x1600x590 mm³.
- Peso: 1340 kg.

Mediante el empleo del freno regenerativo la energía de frenado es acumulada en las ultracapacidades y empleada en la fase de propulsión. La mejora en el consumo obtenida por un tranvía con cofre STEEM al compararlo con el consumo de un tranvía clásico es de alrededor del 20%-24%.

Una de las principales ventajas de este sistema es la alta velocidad de carga y descarga. Sin embargo, una de las limitaciones importantes es que no es adecuado para trayectos sin catenaria, ya que no tiene reserva de energía para modos degradados. Además, el sobrepeso tiene un efecto importante en el consumo energético (variaciones de hasta 2.5 kWh en el consumo energético entre tranvía vacío y tranvía a plena carga).

4.9. KAWASAKI SWIMO-X en SAPPORO (JAPÓN)

El sistema de autonomía de este tranvía se compone de una única batería Gigacell capaz de aportar al vehículo una autonomía de hasta 10 km.

Características del vehículo:

- Longitud: 15 m.
- Anchura: 2.23 m.
- Altura: 3.8 m.
- Velocidad máxima: 40 km/h.

Características de la batería

- Tecnología: NiMH.
- Capacidad: 200 Ah.
- Refrigeración: aire.
- Velocidad de carga: 5 minutos.
- Peso: 4500 kg.

Figura 24. Kawasaki Swimo-X



La batería se recarga en las paradas y mediante el freno regenerativo. Además es capaz de suministrar la potencia requerida por el aire acondicionado y otros elementos auxiliares durante el funcionamiento sin catenaria.

La batería Kawasaki Gigacell de NiMH fue desarrollada específicamente para aplicaciones de industria y transporte que requieran gran capacidad de almacenamiento, elevada velocidad de carga y descarga y muchos ciclos de vida.

4.10. Sistema ACR (Trainelec)

Un Acumulador de Carga Rápida (ACR) es un sistema de almacenamiento de energía embarcado que permite tanto la circulación de los tranvías sin necesidad de catenaria, como el ahorro energético por la recuperación de la energía generada durante el frenado.

Una de sus características más destacables es que es un sistema modular, donde cada módulo o rama está formado por un determinado número de ultracapacidades en serie. Esta modularidad permite configurar el ACR en base a las necesidades de potencia y energía requeridas para cada aplicación, colocando más o menos módulos en paralelo. Además, al estar compuesto por ultracapacidades, el sistema tendrá alta densidad de potencia pero baja densidad energética. En caso necesario, es posible colocar una rama de baterías para aumentar la cantidad de energía acumulada. Además de los módulos de ultracapacidades y baterías, el ACR contiene un convertidor DC/DC que controla el nivel de tensión y, en algunos casos, actúa como cuello de botella para la potencia.

En el funcionamiento del sistema con ACR, el tren inicia la marcha desde la parada con el acumulador completamente cargado. Durante la marcha, el ACR aporta la

energía necesaria al tren para su funcionamiento y utiliza el freno regenerativo para frenar. Al llegar a la inter-estación se completa la carga del acumulador, generalmente tomando la energía de la red mediante un sistema de captación en parada. La carga completa de un ACR en la parada dura aproximadamente 20 segundos.

En Marzo de 2010 estaba prevista la entrega del tranvía de Sevilla, primer tranvía con ACR instalado. Próximamente, en 2011 entrará en servicio el tranvía de Zaragoza equipado con el sistema ACR cuyo primer objetivo será el ahorro energético. Posteriormente, una vez ejecutados los tramos de la infraestructura sin catenaria en la ciudad aragonesa, y tras un período de pruebas, se comenzará a dar servicio en estas condiciones hacia la primavera del 2012.

Por otro lado, está prevista para otoño de 2011 la entrega del tranvía de Granada, cuyo recorrido, al igual que el de Zaragoza, estará formado por algunos tramos sin catenaria. La función del ACR será, por tanto, ahorrar energía en los tramos que hay catenaria y aportar al tren toda la energía necesaria para su funcionamiento en los tramos en los que no la haya.

Un tranvía con el sistema ACR instalado presenta las siguientes ventajas:

- Ahorro medio del 30% en el consumo de energía y reducción del 30% de las emisiones de CO2 comparado con el funcionamiento sin acumulador.
- Autonomía de hasta 1200 metros.

Datos de un módulo de ultracapacidades:

- Energía almacenable: 0.775kWh.
- Máxima Potencia: 100kW.
- Peso: aprox. 370kg.
- Dimensiones: 345x1780x750mm³.
- Datos de un módulo de baterías:
- Energía almacenable: 15kWh.
- Máxima Potencia: 48kW.
- Peso: 410kg.
- Dimensiones: 345x1780x750mm³.
- Datos del acumulador:
- Rango de tensión en: 500V-900V a la salida del convertidor.
- Refrigeración: forzada de aire (aunque compatible con otros sistemas de refrigeración).
- Tipo/tecnología del sistema de acumulación: Ultracapacidades EDLC, baterías NiMH.
- Tensión nominal de trabajo: 750V.
- Número de módulos: hasta 5 por equipo.
- Temperatura de funcionamiento nominal: -25÷50°C.

Figura 25. Tranvía de Sevilla



Figura 26. Tranvía de Zaragoza

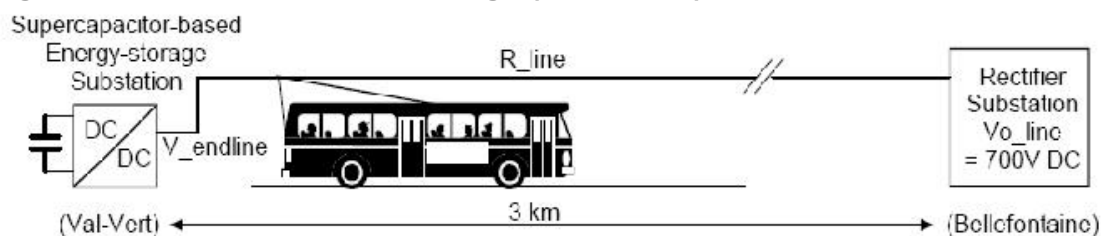


4.11. Sistema de almacenamiento en subestaciones de energía basado en ultracapacidades para la compensación de tensión en redes débiles de transporte ferroviario

Se trata de un proyecto desarrollado por el profesor Alfred Rufer, el doctor Philippe Barrade y el ingeniero David Hotellier de la EPFL de Lausana, que propone una interfaz de electrónica de potencia basado en ultracapacidades para subestaciones de redes DC de transporte ferroviario, en los cuales se controlan las condiciones de la tensión utilizando el sistema como fuente de corriente.

El sistema ha sido diseñado como una subestación de compensación para colocarlo en puntos débiles de la red entre estaciones con el objetivo de sustituir las subestaciones suplementarias. Los resultados de un prototipo a escala de la interfaz del convertidor y su asociado sistema de control muestran unos resultados de compensación de la tensión muy satisfactorios con una eficiencia superior al 90%.

Figura 27. Almacenamiento de energía para la compensación de caída de tensión



Fuente: Dr. P. Barrade. Seminar on Energy Storage by means of supercapacitors.

4.12. Proyectos Europeos LIFE

El programa de la comisión europea LIFE (Financial Instrument For the Environment) comenzó en 1992 y ha co-financiado hasta 130 proyectos relacionados con la energía. Actualmente varios proyectos relacionados con el transporte urbano están siendo co-financiados: LNG tanker, PVTrain, Traffic legislation, EPCOS y ECOBUS. El proyecto está enfocado a combustibles alternativos y nuevas tecnologías para vehículos, información al consumidor y cambio de comportamiento, transporte público, control del tráfico y sistemas inteligentes.

Dentro del proyecto EPCOS (Braking-energy storage in public Light-rail systems) se realizó el estudio y desarrollo de un sistema de almacenamiento de energía en un autobús mediante volante de inercia, con el objetivo de ahorrar hasta el 30% de la energía consumida. Este proyecto fue desarrollado entre 1997 y 2000. Sin embargo, la tecnología de almacenamiento seleccionada no estaba suficiente madura en aquellos momentos para su aplicación en la tracción y los resultados no fueron satisfactorios. El fracaso fue debido básicamente a la falta de seguridad de la colocación de un volante de inercia en una zona cercana a los pasajeros, el coste y el mantenimiento.

Sin embargo este proyecto dio pie a utilizar el mismo concepto para desarrollarlo con ultracapacidades, obteniendo unos resultados económicos y medioambientales mucho mejores que con el volante de inercia.

4.13. Proyecto Europeo EVENT

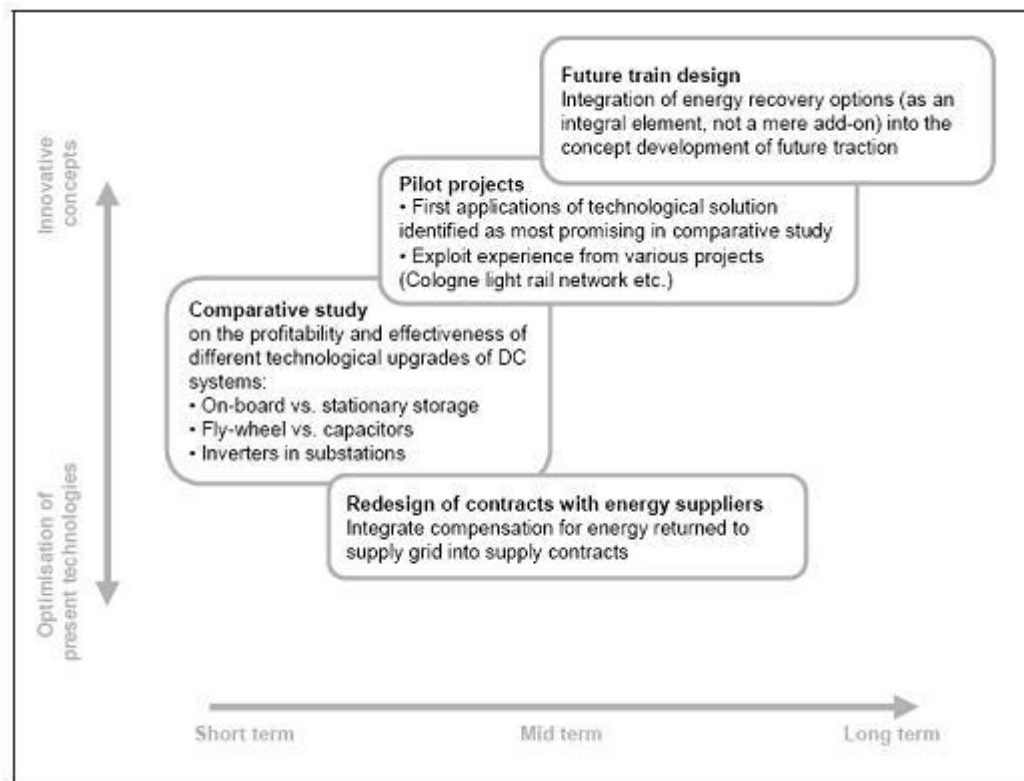
El proyecto EVENT (Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways) finalizado en Marzo 2003, trata de dar una idea global del estado del arte sobre las tecnologías eficientes de energía y las experiencias y proyectos relevantes desarrollados hasta el momento. Se centra básicamente en el consumo energético de los sistemas de tracción ferroviaria.

En dicho análisis, se remarcan dos tendencias principales para la mejora del uso energético en la tracción ferroviaria:

- Estrategias de conducción energéticamente eficientes.
- Frenado regenerativo.

Con respecto a la última tendencia, se remarcan las tecnologías actuales y los conceptos innovadores para el futuro.

Figura 28. Tendencias del mercado sobre ahorro energético en la tracción ferroviaria



Fuente: Proyecto Event

4.14. Proyecto europeo CUTE

Durante los años 2004 y 2005 se pusieron en servicio 27 autobuses CITARO alimentados por pila de combustible de hidrógeno en 7 ciudades europeas. Esta experiencia, desarrollada en Hamburgo, Luxemburgo, Londres, Reykiavik, Ámsterdam, Barcelona y Madrid, ha permitido acumular cerca de un millón de km en diferentes líneas de autobuses con gran variedad de condiciones climáticas, de orografía, velocidad de tráfico y tipo de servicio.

Figura 29. Proyecto CUTE. Desglose de km recorridos.



Fuente: Proyecto Cute

Aunque la fiabilidad de estos sistemas no es aún la deseable para este tipo de explotación y menos para el transporte ferroviario los resultados obtenidos han sido bastante satisfactorios.

BIBLIOGRAFÍA

ESTUDIOS Y TRABAJOS EN REVISTAS

SAFT. *Communique de presse realise* "Saft batteries provide high-tech traction battery for Sitras HES hybrid energy storage system on Siemens Mobility's trams"

ALSTOM. *Enviroment. Urban Integration. Batteries.* "The battery. Autonomous on board system"

Jean-Paul Moskowitz, "Full tram Project", Alstom, June 2006.

Schneider, "Review and comparison of the different Energy Storage Means", 2007

Andrew Burke, "Energy Storage in Advanced Vehicle Systems", Institute of Transportation Studies, 2005

E. Bersano, "Cost and Energy Savings for Traction Applications", Maxwell, 2005

M Steiner, J Scholten, "Energy storage on board of DC fed railway vehicles", Bombardier Transportation, PESC 2004

"LIFE and Energy - Innovative solutions for sustainable and efficient energy in Europe"

"Gateway to a new thinking in energy management - supercapacitors", *Maxwell, 2005*

P. Barrade, B. Destraz, A. Rufer, "Hybrid vehicle in railways applications: spuercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives", EPFL.

2004, M. Endo y otros. Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century.

DOCUMENTOS E INFORMES

Informe de vigilancia tecnológica. Maria Jesús Rivas Martinez, José Román Gancer, María Luisa Cosme Huertas. "Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono"

Sitras MES. "Mobile energy storage or rail vehicles". Product Information/ Version 1.0.0. www.siemens.com/mobility

Sitras HES. "Hybrid energy storage system for rail vehicles". Product Information/ Version 1.0.0. www.siemens.com/mobility

EcoActive Technologies. Propulsion & Controls. "MITRAC Energy Saver". www.bombardier.com

EcoActive Technologies. Light Rail Vehicles. "PRIMOVE" www.bombardier.com

"Fly-wheels (storage Technologies)" www.railway-energy.org

ROBOTIKER. Tecnalia. "Tecnologías de almacenamiento electroquímico de energía para tracción eléctrica"

"Fly-wheels (storage Technologies)" , www.railway-energy.org.

A Schnewly, G Sartorelli, "Ultracapacitors: Advanced energy storage for peak, bridge and emergency power applications", PCIM 2007

Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011

M Steiner, J Scholten, M Klohr, "MITRAC Energy Saver", Bombardier Transportation

"Design for environment at Bombardier Transportation", Bombardier Transportation

"Siemens Transportation Systems - Shaping Tomorrow's Railways", Siemens Transportation

R Nolte "EVENT. Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Sotock and Train Operation of Railways", International Union of Railways, 2003

A Rufer, P Barrade, D Hotellier, "Power electronic interface for a supercapacitor based energy system substation in DC transportation networks", EPFL, 2004

A Rufer, P Barrade, D Hotellier, "A supercapacitor based energy system substation for voltage compensation in weak transportation network", EPFL, 2003

A Berg, "Cityval, new generation of automated mass transit transportation system", Siemens transportation, MEED 2006

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Volante de Inercia	6
Figura 2. Detalle gráfico de una ultracapacidad	7
Figura 3. Ecuación de capacidad.....	7
Figura 4. Sistema con fuente primaria y ultracapacidades	8
Figura 5. Configuración básica de una batería	9
Tabla 1. Valores típicos de batería AGM de uso industrial.....	10
Tabla 2. Valores típicos de baterías de NiMH.....	12
Figura 6. Batería de NiMH de Saft para aplicaciones de tranvía.....	12
Tabla 3. Valores típicos de una batería de Litio-ion.....	14
Figura 7. Relación densidad de potencia/densidad de energía para diferentes tipos de batería	15
Figura 8. Relación densidad de potencia / densidad de energía para diferentes tipos de batería	16
Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías	16
Tabla 5. Comparativa de prestaciones de las diferentes tecnologías.....	17
Figura 9. Resorte radioidal.....	17
Figura 10. Resortes radioidales con láminas en paralelo	18
Figura 11. CNT de pared simple.....	19
Figura 12. CNT de pared múltiple	19
Figura 13. Módulo basado en ultracapacidades.....	24
Figura 14. Prototipo Autotram del Instituto de Fraunhofer	25
Figura 15. Flujos de energía en un sistema con almacenamiento de energía Sitras.....	25
Figura 16. Esquema de Sitras MES integrated Concept	27
Figura 17. Esquema de Sitras HES Independent Concept	28
Figura 18. Sitras HES en Lisboa.....	29
Figura 19. Esquema de MITRAC Energy Saver	29
Figura 20. Bobinas colectoras de PRIMOVE	31
Figura 21. Cables subterráneos de PRIMOVE	31
Figura 22. MITRAC Energy Saver	31
Figura 23. Cofre STEEM.....	33
Figura 24. Kawasaki Swimo-X.....	34
Figura 25. Tranvía de Sevilla	36
Figura 26. Tranvía de Zaragoza	36
Figura 27. Almacenamiento de energía para la compensación de caída de tensión.....	36
Figura 28. Tendencias del mercado sobre ahorro energético en la tracción ferroviaria.....	38
Figura 29. Proyecto CUTE. Desglose de km recorridos.	39

Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

Monografías:

Monografía 1: *“Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 2: *“Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica”*: Francisco Javier Olea.

Monografía 3: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria”*: José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tovagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz.

Monografía 4: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes”*: Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri.

Monografía 5: *“Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 6: *“Diseño de los vehículos ferroviarias para la mejora de su eficiencia energética”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 7: *“Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red”*: Ramón R. Pecharromán, Eduardo Pilo, Álvaro López.

Monografía 8: *“Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, Instituto de Investigación Tecnológica de Metro de Madrid.

Monografía 9: *“Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 10: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 11: *“Resultados de conducciones eficientes en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 12: *“Implementación, resultados y pruebas de los modelos para líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 13: *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables (ELECRAIL)”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografías **ElecRail** /4

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes

Pedro Estévez Iziar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri

Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)
