



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO
BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU
INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS**

AUTOR: Isaac Gil Mera

TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

CAPÍTULO 2. BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES



	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

1. SISTEMAS BASADOS EN BATERÍAS

Una batería es un elemento acumulador eléctrico que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Es un generador eléctrico secundario. No produce energía eléctrica en sí, sino que libera la que anteriormente se ha almacenado durante su carga. El número de cargas y descargas vendrá limitado por su vida útil.



Figura 2.1. Baterías estacionarias de plomo-ácido

La principal virtud de las baterías es la mayor densidad de energía que poseen frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Una de ellas es la baja velocidad de carga y descarga permitida. Una batería tiene restricciones de tiempos y corrientes de carga y descarga. Por su naturaleza, no son dispositivos capaces de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas sin que ello no repercuta negativamente en su vida útil. Su rendimiento no es muy elevado, del orden del 80%, debido a su resistencia interna, la cual es notable en los procesos de carga y descarga del dispositivo. Otra característica desfavorable es la propia autodescarga con el tiempo debida a la resistencia de fuga. Algunos tipos de baterías presentan el llamado “efecto memoria”, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad de almacenamiento, debido a corrientes elevadas, altas temperaturas, al envejecimiento del dispositivo, imposibilitando el aprovechamiento de toda su energía. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

tipos de baterías, que constituyen un problema medioambiental grave. Se están intentando reducir esta toxicidad con la sustitución por nuevas sustancias menos contaminantes.

Entre los tipos de baterías existen de Plomo-Ácido, NaS, Ni-Cd, Ni-Mh, Li-ión y otras varias. Entre ellas, las baterías de plomo han sido las más desarrolladas y utilizadas en sistemas de potencia [1] [2]. El resto de baterías están siendo utilizadas en aplicaciones donde las restricciones de tamaño y peso son críticas. Las baterías de ión litio son las que mayores ventajas presentan, en cuanto a densidades de energía y potencia específica, eficiencia en el almacenamiento, mayor rendimiento en la descarga, ausencia de efecto memoria, pero por contra, dichos dispositivos son caros, y aunque prometen en un futuro próximo, su tecnología aún le queda por madurar. En la actualidad se están llevando a cabo proyectos de investigación cuyo objetivo es el aprovechamiento de las ventajas de este tipo de baterías y el desarrollo de la tecnología [3].

Las baterías más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía de fuentes de energía renovables (solar, eólica...) son las baterías estacionarias. Son baterías de plomo-ácido de bajo contenido de antimonio. Éstas poseen unos 2000 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20% (es decir que la batería estará con un 80% de su carga) y unos 1200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50%. Estas baterías tienen un autodescarga menor del 3% y una eficiencia del 75%. Pueden soportar descargas del 80% y tener una vida de unos 15 años. Son utilizadas en instalaciones de grandes potencias.

Estas baterías se comercializan en celdas unitarias de 2V, o en bancadas que suelen ser de 12V ó 24V que no es más que una asociación encapsulada de celdas unitarias. Estas celdas son capaces de dar altas tasas de energía (Ah). Se puede conseguir la tensión de trabajo deseada mediante la asociación en serie de estos dispositivos.

En la Tabla 2.1 se muestra un cuadro comparativo entre las distintos tipos de baterías comerciales más importantes.

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

Tipo de batería	Capacidades máximas	η	Precio (€/kWh)	Nº ciclos carga y descarga	Auto-descarga	Observaciones
Plomo-Ácido	10MW 40MWh	≈75%	50-150	1500	2-5% Al mes	Pesadas, baja energía específica
Níquel Cadmio (NiCd)	30MW 10MWh	≈75%	200-600	3000	5-20% al mes	Alta descarga, baja energía específica
Sulfuro de sodio (NaS)	10MW 70MWh	≈89%	-	2500	0%	Incorporan calentadores: temperaturas de operación ≈ 325°C
Ión-Litio	En desarrollo	≈99%	700-1000	3000	1% al mes	Alta energía específica, alto coste

Tabla 2.1. Cuadro comparativo de los principales tipos de baterías [1]

1.1. Resumen de características principales

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Densidad de energía: ~ 20-100 Wh/Kg
- Densidad de potencia: ~ 20-200 W/kg
- Rango de energía: para sistemas de hasta 100MWh
- Rango de potencia: ~ 1kW-30MW
- Tiempos de carga y descarga: ~ horas
- Número de ciclos de carga y descarga: 1000 - 3000
- Rendimiento: 75% – 99% según tecnologías
- Autodescarga: 0 – 20 % al mes según tecnologías
- Precios bajos para Pb-ácido, medios para Ni-Cd y caros para Li-ión
- Según tipo puede poseer elementos tóxicos

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

1.2. Principales fabricantes

Hay una gran cantidad de fabricantes de baterías. Algunos de los fabricantes más importantes son:

YUASA BATTERY [4]: Dispone de bancadas de 6 ó 12V, con corrientes máximas desde 3 a 1200 A, y capacidades máximas de hasta 200 Ah. Uso industrial, telecomunicaciones, UPS y otras aplicaciones de gran potencia.

EXIDE TECHNOLOGIES [5]: Posee también un amplio catálogo de baterías para aplicaciones de potencia con capacidades de entre 50 a 5000 Ah y una vida útil de 25 años.

1.3. Futuras tendencias

La tecnología de baterías de plomo-ácido ya es madura, y los precios de mercado son los más competitivos. Las tendencias futuras pasan por la investigación de nuevas tecnologías de baterías, y el desarrollo de las que ya se están comercializando para conseguir unos precios competitivos que consigan hacer competencia a las baterías de plomo-ácido. En especial las de Ión-Litio cuyas mayores densidades de potencia, energía y mayores rendimientos las hacen más atractivas para estas aplicaciones. Así, ya hay fabricantes como Panasonic [6], y GS Yuasa Lithium Power [7] que ya están comercializando baterías de Ion-Litio industriales, con capacidades que van desde los 4 Ah hasta los 400 Ah, aunque sus precios son bastantes superiores a las baterías estacionarias de plomo-ácido.



Figura 2.2. Baterías de Li-ión

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

2. SISTEMAS BASADOS EN SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional a gran escala. Un supercondensador puede llegar a tener capacidades del orden de miles de faradios. Los supercondensadores son caracterizados por poder ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración. Ello es debido a que el almacenamiento de cargas es puramente electrostático.



Figura 2.3. Supercondensadores varios

En los últimos años, los supercondensadores han surgido como una alternativa o complemento importante para otros dispositivos de producción o almacenamiento de energía eléctrica como las pilas de combustible o las baterías [8] [9]. La principal virtud del primero frente a los dos últimos es la mayor potencia que es capaz de inyectar, aunque poseen una menor densidad de energía. Otras características de los supercondensadores son la rapidez de carga y descarga, pueden proporcionar corrientes de carga altas, cosa que daña a las baterías, el número de ciclos de vida de los mismos, del orden de millones de

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

veces, no necesitan mantenimiento, trabajan en condiciones de temperatura muy adversas y por último, no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías.

La principal desventaja de los supercondensadores es la limitada capacidad de almacenar energía, y a día de hoy, su mayor precio. En realidad debido a sus diferentes prestaciones, condensadores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, si no más bien se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercondensador aporta los picos de potencia [10].

La cantidad de energía almacenada en este dispositivo viene dada por la siguiente expresión, en Julios, siendo V_1 y V_2 las tensiones que marcan la profundidad del almacenamiento:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Los materiales estudiados como electrodos para supercondensadores son principalmente de tres tipos: óxidos de metales de transición, polímeros conductores y materiales de carbono activados. Con óxidos metálicos se han conseguido valores de capacidad muy altos, pero estos supercondensadores tienen la desventaja de que son excesivamente caros y por lo tanto sólo se utilizan en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial. El uso de polímeros conductores también puede dar lugar a capacidades relativamente altas, pero estos materiales presentan el inconveniente de que sufren hinchamiento y contracción, lo cual es indeseable puesto que pueden ocasionar la degradación de los electrodos durante los ciclos de carga y descarga. Finalmente, los materiales de carbono se presentan como los materiales activos del electrodo más atractivos, debido a su bajo coste relativo, elevado área superficial (pueden superar los $2500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) y gran disponibilidad. Además, los materiales de carbono pueden presentar unas estructuras diferentes (materiales grafiticos, grafitizables o no grafitizables) y están disponibles en una gran variedad de formas (fibras, telas, aerogeles o nanotubos).

Se puede decir que, actualmente, sólo los supercondensadores basados en carbono, o también llamados condensadores de doble capa (double-layer capacitors), han conseguido llegar a la etapa de comercialización.

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

2.1. Resumen de características principales

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Altas Capacidades: ~ 1-5000 F
- Densidad de energía: ~ 1-10 Wh/Kg
- Densidad de potencia: ~ 1-10 kW/Kg
- Tiempos de carga y descarga: ~ minutos, segundos
- Número de ciclos de carga y descarga: ~ 10^6
- Tensión de trabajo Limitada: ~ 1-500V
- Rendimiento eléctrico: ~ 95-99%
- Muy baja autodescarga
- Precio relativamente Alto
- No necesitan mantenimiento
- No poseen elementos tóxicos
- Resistencia a condiciones adversas de temperatura

2.2. Principales fabricantes

MAXWELL TECHNOLOGIES [11]: Fabricante americano de supercondensadores. Dispone de dispositivos con capacidades de 10-3000F y rango de tensiones 2.5V-125V.

NESSCAP ULTRACAPACITORS [12]: Fabricante coreano de supercondensadores. Dispone de dispositivos con capacidades de 1-5000F y rango de tensiones 2.3V-340V.

2.3. Futuras tendencias

La nanotecnología se presenta como el futuro de los supercondensadores. Los nanotubos son estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden del nanómetro, aumentando la superficie de trabajo de las capas al ordenarlas en nanotubos de grafeno, y con ello, la capacidad del dispositivo. Con esta tecnología se espera aumentar sustancialmente la densidad energética de los supercondensadores, sin elevar excesivamente su coste.

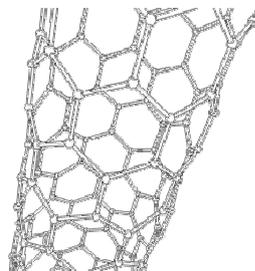


Figura 2.4. Nanotubos de grafeno

Otro método alternativo para aumentar la superficie de trabajo es el uso de aerogeles de carbono. Un gel de carbono es una estructura cuya fase continua es sólida carbonosa y la discontinua líquida. Tras un secado supercrítico se elimina la fase líquida para dejar la fase carbonosa. Es un tipo de nanoestructura con presentan una red interconectada de poros entre partículas y en las propias partículas, dando lugar a una gran porosidad (>80%) y elevadas áreas superficiales (400-1200 m²/g). Ello pretende también elevar las capacidades de los supercondensadores y con ello la cantidad energética almacenada.

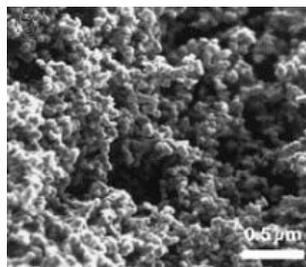


Figura 2.5. Aerogeles de carbono

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

Otro tipo de supercondensador, que no pertenece al grupo de condensadores de doble capa como los dos anteriores, espera ser presentado en sociedad por la casa tejana EESstor. Según la empresa, su ingenio alcanza densidades energéticas de 1MJ/Kg, suponiendo el doble que una batería de Li-Pol y doce veces la capacidad de los mejores supercondensadores [14]. Se trata un condensador de armaduras de aluminio con un dieléctrico de titanato de bario (posee una gran permitividad) sinterizado con cerámica, para evitar la autodescarga (0,1% al mes). Sin problemas de ciclabilidad y con un tiempo de carga inferior a cinco minutos, tal y como lo presentan [15] sería la solución de almacenamiento de energía definitiva [16].

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

3. REFERENCIAS

- [1] An overview K.C. Divya and Jacob Østergaard , “Battery energy storage technology for power systems”, Electric Power Systems Research Volume 79, Issue 4, April 2009.
- [2] Joseph and M. Shahidehpour, “Battery energy storage systems in electric power systems”, IEEE 2006.
- [3] T. Matsushime, S. Takagi, S. Muroyama, and T. Horie, “Fundamental characteristics of stationary lithium-ion secondary cells and a cell-management system”, Intelec, 2004.
- [4] <http://www.yuasabatteries.com/batteries.php>
- [5] <http://www.exide.com>
- [6] <http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/chem/lithion>
- [7] <http://www.gsyuasa-lp.com/Products.html>
- [8] R. Bonert, L. Zubieta, “Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications”, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 36, January-February 2000.
- [9] P.J. Binduhewa, A.C. Renfrew, M. Barnes, “Ultracapacitor Energy Storage for MicroGrid Microgeneration”, the 4th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008.
- [10] John M. Miller, "Ultracapacitor Efficiency under Constant Power Conditions: Prospects for Lithium Battery plus Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems," 3rd International Symposium on Large Ultracapacitor Technology and Application (UCAP), Advanced Automotive Battery Conference, Hyatt Regency hotel, Long Beach, CA, May 2007.
- [11] <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/index.asp>
<http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/index.asp>
- [12] http://www.nesscap.com/products_edlc.htm
http://www.nesscap.com/products_lineup.htm



	DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS
	AUTOR: Isaac Gil Mera
	TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

[13] EESTOR: Electrical Energy Storage Unit

<http://www.eestor.us>

[14] “Electrical-energy-storage unit (EESU) utilizing ceramic and integrated-circuit technologies for replacement of electrochemical batteries”, Weir, et al, April 2006.

[15] http://www.treehugger.com/files/2007/01/big_news_eestor.php

[16] <http://green.autoblog.com/2007/01/31/more-on-eestors-ultracapacitor-can-we-believe-the-hype/>