

# Almacenamiento de energía magnética por superconducción

**Guadalupe G. González**

Universidad Tecnológica de Panamá  
 guadalupe.gonzalez@utp.ac.pa

**Resumen:** *en este artículo presentamos una de las tecnologías de almacenamiento de energía actualmente utilizadas en sistemas de potencia, Almacenamiento de Energía por Superconducción. Primero, presentamos una pequeña reseña histórica sobre la superconductividad, sus orígenes y primeras aplicaciones, ya que es la base de este sistema de almacenamiento. Luego, explicamos los principios básicos de su funcionamiento y detallamos sus componentes principales. Finalmente, presentamos su aplicación en sistemas de potencia.*

**Palabras claves:** *almacenamiento de energía, electromagnetismo, sistema de potencia, SMES, superconductor.*

**Title:** *Superconducting Magnetic Energy Storage.*

**Abstract:** *in this article we present one of the energy storage technologies currently used in power systems, Energy Storage by Superconduction. First, we present a small historical review on superconductivity, its origins and first applications, since it is the base of this storage system. Then, we explain the basic principles of operation and detail its main components. Finally, we present its application in power systems.*

**Keywords:** *electromagnetism, energy storage, power system, SMES, superconductor.*

## 1. Introducción

El mundo industrializado gira alrededor de energía. En los últimos años, casi el 90% de la energía primaria en el mundo proviene de derivados del petróleo, ya sea en forma de carbón, petróleo crudo o gas natural [1]. Dado que éstos no son renovables no podemos depender de ellos como fuentes primarias de energía.

En las últimas décadas se han incrementado los esfuerzos para reducir el uso del petróleo a nivel mundial. Hemos visto cómo se han desarrollado los sistemas de energías renovables para generación eléctrica así como la comercialización de vehículos eléctricos, híbridos y de combustible flexible, entre otros; sin embargo, todas estas tecnologías parecen tener un punto débil en común: el sistema de almacenamiento de energía.

En los sistemas de potencia con generación eólica o solar, por ejemplo, la energía se extrae de manera intermitente; ya sea debido

a variaciones en la velocidad del viento o a la presencia de nubes durante el día. Estas fluctuaciones pueden afectar significativamente el sistema de potencia por consiguiente, se necesitan sistemas de almacenamiento capaces de almacenar grandes cantidades de energía que puedan amortiguar dichas fluctuaciones. También, se necesita asegurar la extracción de la energía en cualquier momento que sea posible no sólo cuando la carga lo requiera. Finalmente, se requieren métodos de almacenamiento capaces de satisfacer variaciones en la demanda [2,3].

Para satisfacer las necesidades previamente mencionadas, se han desarrollado diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, entre ellos: térmico, químico, electroquímico, de aire comprimido, mecánico con volantes de inercia, bombeo hidroeléctrico, banco de capacitores y por superconducción, siendo esta última el tema de este artículo.

Los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) fueron diseñados originalmente para satisfacer variaciones en la demanda diaria. Quizás su mejor característica es que es altamente eficiente; se ha estimado que una unidad puede tener un 90% de eficiencia mientras que los sistemas de almacenamiento por bombeo hidroeléctrico, las baterías y las volantes de inercia tienen una eficiencia típica del 60-70% [4].

## 2. Reseña histórica

La superconductividad fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, quien se encontraba estudiando la resistencia del mercurio sólido a temperaturas criogénicas, utilizando helio líquido como refrigerante [5].

Alrededor de los años 60's, científicos americanos, japoneses y europeos realizaron los primeros pasos en la creación de almacenadores de energía magnética por superconducción. Pero no fue hasta 1971, en el Centro de Superconductividad Aplicada de la Universidad de Wisconsin, cuando Peterson y Boom inventaron el sistema de SMES tal y como lo conocemos hoy en día. Después de esto, distintas compañías y centros de investigación han desarrollado y diseñado SMES para su uso en redes eléctricas.

## 3. Almacenamiento de energía magnética por superconducción

Las unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) almacenan energía de la misma forma que lo haría un inductor convencional. Ambos, almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La principal diferencia radica en que en el SMES, una corriente directa fluye a través de un alambre superconductor; esto significa que el alambre se encuentra a temperaturas criogénicas y no muestra resistencia conductiva alguna.

El hecho que no exista resistencia óhmica en el alambre implica que no hay disipación térmica, por consiguiente, la energía puede almacenarse en el SMES virtualmente por tiempo indefinido hasta que sea requerida. Dado que la energía es almacenada como corriente circulatoria, puede extraerse de las unidades SMES con una respuesta casi instantánea siendo entregada o almacenada en

periodos que varían de fracciones de segundos a algunas horas [6].

Una unidad típica de almacenamiento de energía por superconducción consta principalmente de: la bobina superconductora, el sistema de refrigeración y la interfaz eléctrica.

### 3.1. Bobina superconductora

Los superconductores son capaces de transportar altos niveles de corrientes en la presencia de altos niveles de campos magnéticos a bajas temperaturas con cero resistencia al flujo de corriente eléctrica, a menos que sus valores críticos: temperatura ( $T_c$ ), densidad de flujo magnético ( $B_c$ ) y densidad de corriente ( $I_c$ ), sean excedidos.

Los materiales que exhiben superconductividad han ido creciendo en número y variedad, pero la cantidad de superconductores utilizados en aplicaciones prácticas y comerciales todavía es limitada, siendo la aleación de Niobio-Titanio (NbTi) la más utilizada en aplicaciones a altos niveles de potencia [5]. En la Tabla 1 podemos ver una lista de superconductores con sus valores críticos de temperatura, densidad magnética y su densidad energética ( $W_m$ ) [7].

Tabla 1. Lista de Superconductores

Superconductor	$T_c$ [K]	$B_c$ [T]	$W_m$ [J/m <sup>3</sup> ]
<b>Metales</b>			
Niobio (Nb)	9.26	0.82	2.68E+05
Tántalo (Ta)	4.48	0.30	3.58E+04
Vanadio (V)	5.03	1	3.98E+05
<b>No-Metales</b>			
C6Ca	11.5	0.95	3.59E+05
Diamante:B	11.4	4	6.37E+06
In2O3	3.30	3	3.58E+06
Si:B	0.40	0.40	6.37E+04
<b>Aleaciones Binarias</b>			
MgB2	39	74	2.18E+09
Nb3Ge	23.2	37	5.45E+08
Nb3Sn	18.3	30	3.58E+08
NbTi	10	15	8.95E+07

El contenido energético en un campo electromagnético es determinado por la corriente que fluye a través de las espiras de una bobina magnética y puede ser calculado con (1).

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1)$$

donde  $W_m$  es la energía almacenada [Joules].  
 $L$  es la inductancia [Henrios].  
 $i$  es la corriente eléctrica [Amperios].

Dado que la densidad de campo magnético en materiales ferromagnéticos no sobrepasa los 3 Teslas, las bobinas utilizadas para almacenar energía magnética por superconducción son usualmente colocadas en aire o al vacío con permeabilidad  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m].

Para obtener altos valores de energía ( $W_m$ ) con una corriente ( $i$ ) limitada por el superconductor utilizado es necesario incrementar la inductancia; lo cual se puede hacer utilizando la geometría adecuada. Existen tres configuraciones en el diseño de SMES:

- Solenoide sencillo con forma circular.
- Conexión en serie de solenoides coaxiales.
- Toroide de forma circular, ovalado o D comprendido por una serie de espiras conectadas en series. [6]

Cabe señalar que la configuración del inductor afecta la masa total de la estructura del SMES. Inductores con configuración toroidal compuesto por espiras sencillas tienen un campo magnético externo mínimo, lo cual es ideal para no afectar a los sistemas de navegación, la salud de las personas y las líneas de transmisión, pero utilizan aproximadamente el doble de superconductor, mientras que la configuración de solenoide sencillo es superior en términos de energía almacenada por peso.

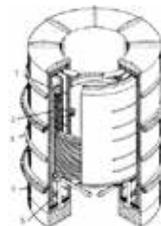
### 3.2. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento de un SMES está compuesto por el refrigerador, en donde se prepara el refrigerante y el contenedor criogénico en donde reposa la bobina superconductora para ser refrigerada y aislada térmicamente del medio ambiente (ver Figura.1).

El sistema de enfriamiento utiliza normalmente Helio como refrigerante ya sea como baño de Helio o por circulación forzada. Éste remueve todo el calor que entra al contenedor criogénico y por consiguiente asegura que la temperatura del superconductor no exceda la temperatura crítica. Dado que la planta de refrigeración posee una eficiencia límite, el calor que penetra por las tuberías, los soportes mecánicos y por radiación deben ser tan bajo como sea posible; para asegurar esto, se provee de un enfriamiento intermedio llamado "escudo térmico".

La refrigeración de la bobina y el aislamiento térmico son problemas técnicos de extrema dificultad dado a las bajas temperaturas (alrededor de 1.8 K) que se necesitan para mantener el superconductor trabajando de manera eficiente.

El refrigerador consume energía eléctrica y por consiguiente disminuye la eficiencia del SMES. Un sistema de refrigeración típico requiere aproximadamente 1.5 kW por mega watt-hora de energía almacenada [9].



1. Tubería de Helio
2. Espira superconductora
3. Anillo de refuerzo
4. Cámara de vacío
5. Columna de soporte

Figura 1. Pictórico de una bobina superconductora dentro de un contenedor criogénico de Helio, con capacidad de almacenar 100 MJ de energía.

\*Figura modificada de la versión original [8], traducida al español.

### 3.3. Interfaz eléctrica

La interfaz eléctrica entre el inductor superconductor y el sistema de potencia es un convertidor. El mismo es un rectificador/inversor que cambia la corriente alterna proveniente de la red a la corriente directa que fluye continua en las bobinas. Para cargar o descargar el inductor, el voltaje, a través de las bobinas, se hace positivo o negativo. Cuando la unidad está en reposo, independientemente del nivel de energía almacenado, la corriente se mantiene constante y el voltaje promedio, a través de las bobinas superconductoras, es cero [2].

La configuración típica de un convertidor para esta aplicación comprende dos puentes de tiristores de 6 pulsos, conectados en serie a la bobina superconductor en la parte directa del puente y acoplados, en la parte alterna, al sistema de potencia a través de un transformador.

Las pérdidas correspondientes al convertidor de estado sólido se estiman alrededor del 3 al 8% del total de la energía almacenada [6].

### 4. Almacenadores de energía magnética por superconducción en sistemas de potencia

En la Tabla 2, podemos ver algunos parámetros típicos de un sistema de almacenamiento por superconducción [4]. Los sistemas SMES son capaces de almacenar de 1 MW a 10 MW. La Figura 2 muestra una comparación entre la capacidad de almacenamiento y el tiempo de descarga de distintos sistemas de almacenamiento de energía.

Tabla 2. Parámetros típicos de un SMES

Total de energía almacenada	10000-13000 MWh
Energía disponible	9000-10000 MWh
Tiempo de descarga	5-12 h
Potencia máxima	1000-2500 MW
Corriente máxima	50-300 kA
Densidad de campo máximo	4-6 T
Diámetro medio de la bobina	300 m
Altura total de la bobina	80-100 m
Profundidad media debajo de la superficie	300-400 m
Eficiencia*	85-90 %
Pérdidas en el convertidor	2% de la potencia
Potencia del refrigerador	20-30 MW

\* Asumiendo un ciclo completo de carga/descarga al día.

Dado que los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción son altamente eficientes y responden rápidamente a las variaciones de la demanda, pueden ser de gran utilidad a los sistemas de potencia ya que:

- tienen la capacidad de proveer energía al sistema (spinning reserve) si se presenta una pérdida en la generación;

- pueden proveer estabilidad durante transitorios ya que amortigua las oscilaciones presentes en la línea de transmisión;
- pueden amortiguar cambios bruscos de voltaje;
- y finalmente, el sistema de almacenamiento en general es relativamente pequeño en tamaño en comparación con otros sistemas de almacenamiento y su ubicación no se ve limitada a algún área específica como es el caso de las hidroeléctricas. [10,4].

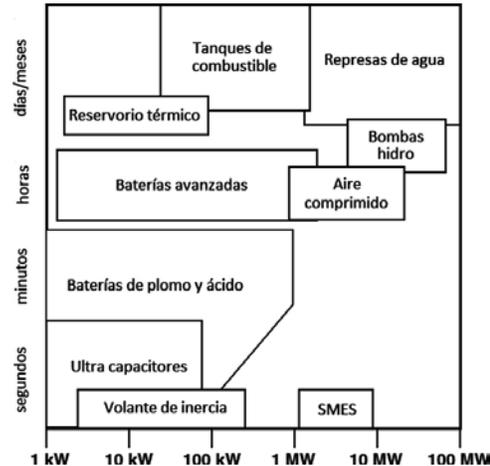


Figura 2. Tiempo de Descarga vs. Capacidad de almacenamiento en distintos sistemas de almacenamientos de energía.

\* Figura modificada de la versión original [10], traducida al español.

El primer SMES utilizado tanto para experimentación como para uso comercial fue diseñado por el Laboratorio Nacional Los Alamos (LANL, por sus siglas en inglés) y construido para la Bonneville Power Company en 1982. Estuvo en uso por cinco años y fue desmantelado para investigación. Este proyecto tenía una capacidad energética de 30 MJ y fue utilizado para estabilizar el sistema de potencia ya que amortiguaba las oscilaciones presentes en una línea de transmisión de 1500 km de largo. [6]

Según LANL, el costo de construcción de un sistema de almacenamiento por superconducción se distribuye de la siguiente manera:

- Bobina superconductor, 45%.
- Estructura, 30%.
- Mano de obra, 12%.
- Convertidor, 8%.
- Sistema de enfriamiento, 5%.

El mayor reto que presenta esta tecnología es reducir el costo total del sistema. La Tabla 3 presenta una proyección de costo para distintos sistemas de almacenamiento de energía [10]. Actualmente, el costo del sistema de almacenamiento SMES depende del costo de los superconductores. En el 2007, el costo del NbTi era de 1 \$/kAm, mientras que el Nb3Sn era de 1.50 \$/kAm (Dólar/kilo ampere por metro). Afortunadamente, una característica inusual de este sistema es que el costo por unidad de energía almacenada (MJ o kWh) decrece a medida que la capacidad de almacenamiento aumenta, es por esto que este tipo de sistema es preferible para aplicaciones de gran tamaño como lo es el sistema de potencia, aunque también se están realizando estudios para su aplicación en vehículos [11].

Tabla 3. Proyección de costos para sistemas de almacenamiento de energía

Sistema	Tamaños Típicos MW	\$/kW	\$/kWh
Ultra capacitores	1-10	300	3600
Volantes de Inercia	1-10	200-500	100-800
SMES	10-1000	300-1000	300-000
Aire Comprimido	50-1000	500-1000	10-15
Bombeo Hidroeléctrico	100-1000	600-1000	10-15

## 5. Conclusión

SMES es una tecnología de almacenamiento de energía que tiene mucho potencial debido a su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía y aún ser rentable en comparación con otros sistemas de almacenamiento. El mayor reto que presenta es reducir el costo total del sistema, pero avances en los sistemas de refrigeración criogénica y el desarrollo de mejores superconductores puede llevar a que su aplicación sea mucho más comercial.

## Referencias

- [1] R. L. Evans, *Fueling our Future: An Introduction to Sustainable Energy*, 1era edición, Cambridge University Press, 2007, pp. 168.
- [2] W. V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Proceedings, vol.71, No. 9, Septiembre, 1983.
- [3] H.Y. Jung, A. Kim, J. Tamura, et. al, "A Study on the Operating Characteristics of SMES for Dispersed Power Generation System", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.19, No.3, Junio 2009, pp.2028-2031.
- [4] W. Buckles and W. V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Power Engineering Review, Mayo, 2000, pp.16-20.
- [5] J. Bray, "Superconductors in Applications; Some Practical Aspects", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.13, No.3, Junio 2009, pp.2533-2539.
- [6] A. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*, 1st edition, Peter Peregrinus Ltd., 1994.
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_superconductors](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_superconductors)
- [8] W. V. Hassenzahl, "Will Superconducting Magnetic Energy Storage be Used on Electric Utilities Systems?" IEEE trans. On Magnetics, vol.Mag-11, No. 2, Marzo, 1975, pp.482-488
- [9] S. Vasquez, S.M. Lukic, E. Galvan and J. Carrasco, *Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*, IEEE trans. On Industrial Electronics, vol.57, No.12, Diciembre 2010, pp.3881-3895
- [10] F. Farret and M. Godoy Simoes, "Integration of Alternative Sources of Energy", IEEE Press/Wiley-Interscience, 2006, Hoboken New Jersey, 1era edición, pp. 290.
- [11] L. Trevisani, A. Morandi, F. Negrini, P.L. Ribani and M. Fabbri, "Cryogenic Fuel-Cooled SMES for Hybrid Vehicle Application," IEEE trans. On Applied Superconductivity, vol. 19, No.3, Junio, 2009.