

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Universidad de Burgos



**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
BASADO EN LA SUPERCONDUTIVIDAD PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE MICROGRID POR
CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE CARGAS,
SISTEMA SMES**

**ANEJO Nº 3: SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
SMES**

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA**

AUTOR:

RUBÉN ARCE DOMINGO

TUTOR:

CARMELO LOBO DE LA SERNA

JUNIO DE 2019



ANEJO II: SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	3
1. INTRODUCCIÓN	3
2. BOBINA SUPERCONDUCTORA	3
3. SUPERCONDUCTIVIDAD	5
3.1 Tipo 1:.....	7
3.2 Tipo 2:.....	7
4. REFRIGERACIÓN	7
5. ELECTRÓNICA DE POTENCIA.....	9
6. APLICACIONES DE UN SISTEMA SMES.....	10
6.1. UPS (Uninterruptible power supply)	10
6.2. FACTS (flexible alternating current transmission system)	10
6.3 Pulsed Power Supplies (Fuentes para aplicaciones de pulsos)	11
6.4 Micro y Mini grid	11
7. DISEÑO DE LA BOBINA SUPERCONDUCTORA	11
7.1 Selección del tipo de bobinado	12
7.2 Ventajas del bobinado elegido	14
7.3 Criterios para la elección de los parámetros constructivos.....	15
7.4 Cálculo cuantitativo	16
8. CONCLUSIÓN	21
9. BIBLIOGRAFÍA	21

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: Simbología de una bobina.....	3
Ilustración 2:Partes de una bobina	4
Ilustración 3:Temperatura crítica	5
Ilustración 4: Evolución de la Superconductividad	6
Ilustración 5:Tipos de refrigerantes y aplicaciones.....	8
Ilustración 6:Esquema de control y potencia del sistema SMES	10
Ilustración 7: Circuito real de una bobina	12
Ilustración 8: Parámetros típicos de una bobina superconductora	13
Ilustración 9: Partes de una bobina superconductora.....	14
Ilustración 10: Corriente en función del número de bobinados	15
Ilustración 11: Máximo flujo de corriente en función del diámetro de una bobina superconductora	16
Ilustración 12: Geometría de la bobina empleada.....	17



ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Refrigerantes típicos	8
Tabla 2: Selección de refrigerante.....	9
Tabla 3: Aplicaciones del sistema SMES	11
Tabla 4: Elecciones sobre la forma y tipo de superconductor	15
Tabla 5: Rangos de potencia y energía necesarios	17
Tabla 6: Comparativa entre las distintas formas de una bobina superconductora	19
Tabla 7: Descripción de la solución inductiva	21



ANEJO II: Sistema de almacenamiento SMES

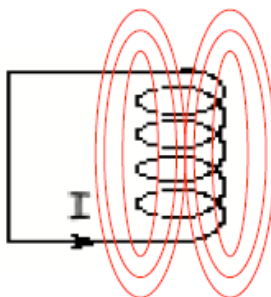
1. INTRODUCCIÓN

El sistema SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) o almacenamiento de energía en un superconductor magnético se basa en almacenar corriente continua en una bobina superconductora que se encuentra sumergida en un refrigerante a muy baja temperatura.

El almacenamiento energético en forma magnética consta de tres partes diferenciadas: por un lado, una bobina superconductora, seguida de una refrigeración para este inductor y por último una etapa de electrónica de potencia y control que regula todo el proceso.

2. BOBINA SUPERCONDUCTORA

El tipo de bobina es clave en el rendimiento del sistema SMES, al fin y al cabo, debe elegirse un material tal que a su temperatura crítica minimice la resistencia y por tanto minimice las pérdidas por efecto Joule.



*Ilustración 1: Simbología de una bobina
(Fuente Propia)*

El comportamiento que sigue una bobina como la de la ilustración 1 es el siguiente:

$$v = L \cdot \frac{di}{dt} \quad i = \frac{1}{L} \int_0^T v \cdot dt + i_0 \quad (1)$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Siendo: $\tau = \frac{L}{R}$ obtenemos que:



$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Siendo 'i' la corriente que atraviesa la bobina, 'R' su resistencia asociada por el hecho de estar compuesta de un hilo de cobre e 'i₀' que es la corriente inicial que tenía almacenada al inicio del proceso.

La 'V' es la tensión y la 'L' es el valor de la inductancia que esta tiene y 't' es el tiempo.

Si el valor de la resistencia a la temperatura crítica del material se vuelve cero, la constante de tiempos τ será infinita. Este hecho permitirá almacenar energía en forma de un campo magnético un número ilimitado de veces (a diferencia de las baterías que tienen un número máximo de cargas y descargas).

La inductancia de una bobina es:

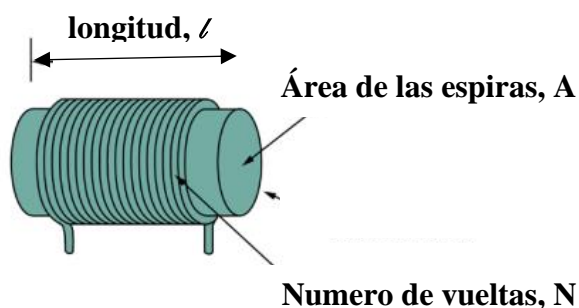


Ilustración 2: Partes de una bobina (Research on Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage)

La fórmula que permite obtener su valor inductivo (L) es la siguiente:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

N : número de espiras

A : área de las espiras (2)

l: longitud

μ : permeabilidad del núcleo

Una bobina ideal presenta inductancia positiva y no depende de los materiales ni de la geometría. La potencia, W, almacenada en una bobina es la siguiente:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = W_0 \cdot e^{-\frac{2 \cdot t}{\tau}} \quad (3)$$



Vemos por lo tanto la necesidad de emplear un material superconductor para nuestra bobina, con otro material sin esta propiedad perderíamos energía en forma de calor por efecto Joule:

$$\text{El efecto Joule: } P = R \cdot I^2 \quad (4)$$

La existencia de una resistencia disminuiría notablemente el rendimiento, por lo tanto, nos surge la necesidad de indagar en la superconductividad para buscar el material con el que confeccionar nuestra inductancia sin resistencia asociada.

3. SUPERCONDUCTIVIDAD

Para entender mejor el proceso llevado a cabo para almacenar corriente en forma de campo magnético debo explicar el concepto de superconductor.

Un superconductor es un elemento que permite la conducción de electrones sin apenas pérdidas debidas a la resistencia asociada que todo componente electrónico posee.

Esto es posible solo a temperaturas próximas a la temperatura crítica en la cual las propiedades magnéticas del material son máximas y el valor de su resistencia mínima, de esta forma podemos almacenar corriente de forma magnética.

La temperatura crítica de un material es la temperatura en la que la resistencia eléctrica del metal se reduce drásticamente a cero.

En la ilustración 3 podemos comprobar este hecho puesto que comparamos las resistencias en función de la temperatura de dos materiales, uno superconductor y otro que no. Vemos que en el primer elemento, para un valor de temperatura dado, su resistencia se reduce a cero.

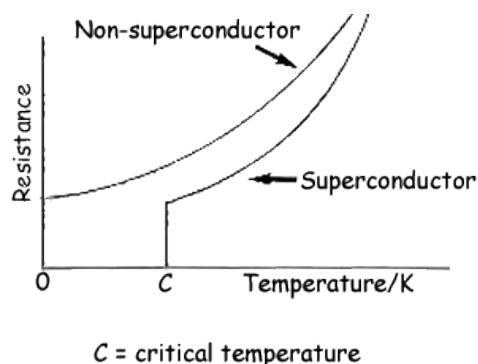


Ilustración 3: Temperatura crítica (Chennai, A. (s.f.). Design of Superconducting Coil for SMES)



Este tránsito tan veloz viene determinado por la teoría BSC (recibe este nombre en honor a los tres científicos que la confeccionaron: John Bardeen, John Robert Schrieffer y Leon Cooper). Esta teoría pretende explicar el fenómeno de la superconductividad desde el punto de vista microscópico, sin embargo, no es una teoría que permita justificar el comportamiento de todos los semiconductores con suficiente precisión.

La teoría BSC se basa en que los portadores de carga son pares de electrones, a diferencia de lo postulado en teorías anteriores, en los que se les consideraba electrones solitarios.

Al hallarse en una red cristalina la energía que habitualmente les repele por estar ambos cargados negativamente, ahora les puede atraer. De esta forma se crean parejas con mínima carga, esta energía de enlace se denomina banda prohibida superconductora.

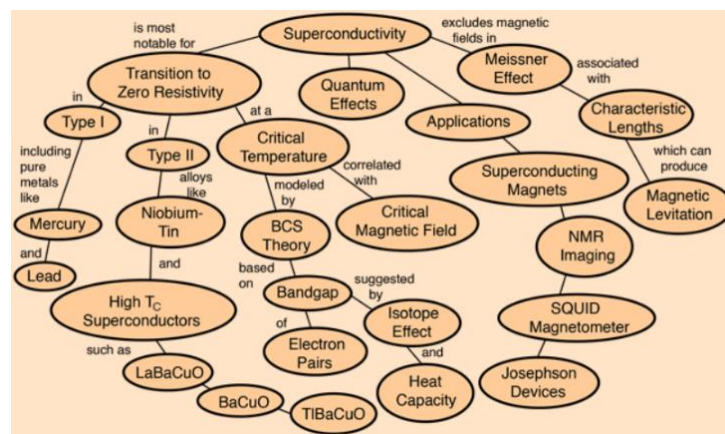


Ilustración 4: Evolución de la Superconductividad (Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications. Applied Superconductivity and Electromagnetics)

Como podemos apreciar en la ilustración 4, la superconductividad tiene numerosas aplicaciones y se fundamenta en varias teorías físicas que permiten explicar la existencia de dos tipos de materiales superconductores, los de tipo I y los tipo II.

Este comportamiento explicado por la teoría BSC permite explicar la existencia de una temperatura crítica, a la cual el material pasa a estado de superconductor. También permite justificar porqué el calor específico al pasar de un estado físico (sólido, líquido o gaseoso) al estado superconductor permanece constante.

Esta temperatura crítica no tiene por qué ser excesivamente reducida, también puede darse en materiales en un rango de 20 y 120K, siendo de esta forma fácilmente obtenible con nitrógeno líquido.



La superconductividad es un proceso de la mecánica cuántica al igual que el ferromagnetismo, se da en numerosos materiales que encontramos en la tabla periódica y son muy utilizados en el día a día. Existen dos tipos de superconductividad:

3.1 Tipo 1:

La conductividad tipo 1 se da en materiales que presentan a temperatura ambiente conductividad, es experimentada por metales puros y metaloides. El cobre, la plata y el oro son tres de los mejores metales puros superconductores tipo uno, pero también se dan en el mercurio o el plomo.

Presentan bajas temperaturas críticas, entre 0 y 30K, y tienen una disminución acusada en la resistencia, así como la desaparición del magnetismo inherente del material.

Lo que significa que a temperatura crítica los superconductores tipo 1 se convierten en materiales diamagnéticos, o lo que es lo mismo, no son atraídos ni repelidos por un campo magnético.

3.2 Tipo 2:

La mayor parte de materiales que engloban este grupo son aleaciones, sin embargo, elementos de la tabla periódica como el vanadio (número atómico 23), niobio (41) o el tecnecio (43) también se encuentran en esta categoría. Tienen temperaturas críticas mucho más altas, entre 30 y 130K.

Otra diferencia es su mayor intensidad de campo magnético, es decir son elementos paramagnéticos mucho más poderosos.

Por esta razón se utilizan para crear imanes superconductores con los que provocar altas aceleraciones a partículas o en pruebas médicas de resonancias magnéticas.

4. REFRIGERACIÓN

Se hace imprescindible emplear refrigerantes para que podamos almacenar de una forma eficiente la energía en forma de campo magnético, para lo cual disponemos de varias alternativas de materiales.

En la ilustración 5 vemos que no solo se necesitan temperaturas bajas para el sistema SMES, sino que la refrigeración en numerosas aplicaciones electrónicas necesita de estos rangos de temperatura.

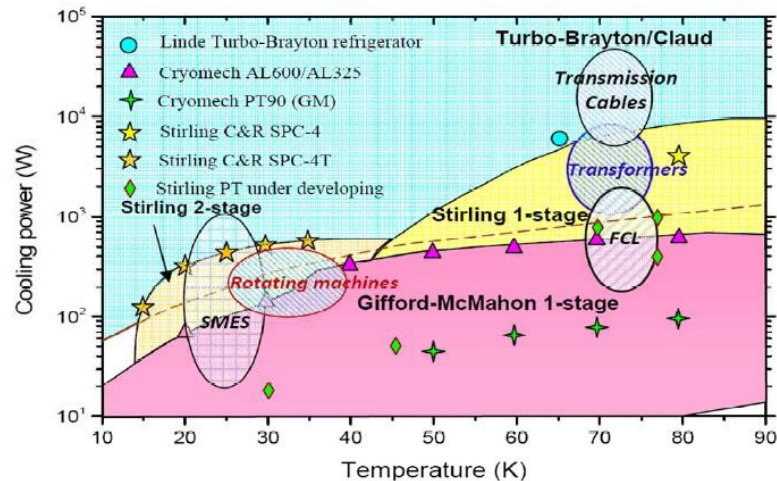


Ilustración 5: Tipos de refrigerantes y aplicaciones. (Chennai, A. (s.f.). Design of Superconducting Coil for SMES)

Desde las etapas de un motor Stirling utilizado en centrales térmicas, pasando grandes rotores de máquinas, hasta los transformadores, vemos que la refrigeración es una necesidad.

En la tabla 1 podemos ver los diversos tipos de refrigerantes en una comparativa:

Tabla 1: Refrigerantes típicos

Propiedades	He	H ₂	Ne	N ₂
Punto de ebullición a 1 bar (K)	4.22	20.27	27.09	77.36
Temperatura del punto triple (K)	-	13.8	24.56	63.15
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	20.9	443	58.9	199.3
Densidad del líquido saturado a 1 bar (kg/m ³)	125	70	1206	807
Calor específico del estado líquido (kJ/(kg·K))	5.47	9.48	1.94	2.04

1. El hidrógeno líquido (LH₂)

Tiene el mayor calor latente de vaporización de la tabla y el mayor calor específico. Su mayor inconveniente es su peligrosidad puesto que puede ser un potente explosivo. Se suele usar para sistemas grandes como SMES o con cables de MgB₂.

2. El nitrógeno líquido (LN₂)

Tiene la mayor relación densidad precio y se emplea en el enfriamiento de máquinas rotativas principalmente.



3. El helio líquido (LHe)

Es el refrigerante más barato, tiene propiedades como dieléctrico muy buenas y es seguro en comparación con el hidrógeno líquido. Se emplea principalmente en refrigeración de cables y transformadores a pesar de que su temperatura más baja alcanzable sea los 63K.

En vista a la tabla de los tipos de refrigerantes más habituales se optará por el hidrógeno líquido, debido en gran medida a que permite alcanzar temperaturas mucho menores que sus competidores.

Tabla 2: Selección de refrigerante

Refrigerante para sistema SMES:	Hidrógeno líquido, H ₂
---------------------------------	-----------------------------------

5. ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Para acondicionar la tensión alterna procedente de la red y cargar la bobina debemos, en primer lugar, emplear un convertidor CA/CC que sea bidireccional, es decir, que permita la conversión en ambos sentidos.

La topología de éste será desarrollada en el anejo 3. La segunda parte es la de un convertidor CC/CC o chopper que funcione como fuente de corriente variable, este estudio se llevará a cabo en el mismo anejo.

El sistema de igual modo deberá ser bidireccional para que permita la carga y descarga, así como el almacenamiento.

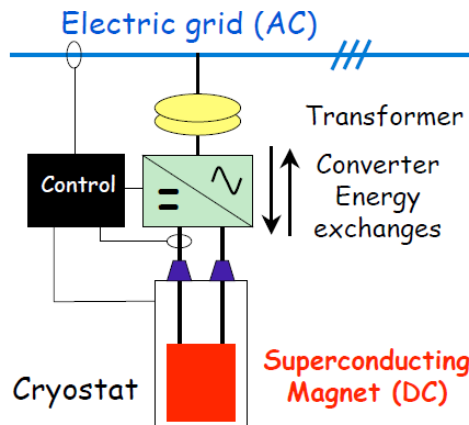


Ilustración 6: Esquema de control y potencia del sistema SMES (Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications. Applied Superconductivity and Electromagnetics)

En el diagrama de la ilustración 6 se ve la constitución de un sistema SMES: por un lado, apreciamos la bobina criogenizada a la temperatura crítica, encima de este está el sistema de potencia y por último el sistema de control que permite regular todo el proceso. Una vez seleccionado el refrigerante solo queda elegir la bobina.

6. APLICACIONES DE UN SISTEMA SMES

Existen tres grandes aplicaciones que se le pueden dar al sistema SMES:

6.1. UPS (Uninterruptible power supply)

Son las denominadas fuentes de alimentación ininterrumpidas y permiten almacenar energía en condiciones de suministro normal y cuando se produce una avería o corte eléctrico ceden esa potencia almacenada.

Con estos sistemas podemos asegurarnos que nuestro aparato va a funcionar durante un periodo de tiempo suficiente como para no tener que preocuparnos por la inestabilidad de la red.

6.2. FACTS (flexible alternating current transmission system)

Es un sistema de control de las redes de distribución de alta tensión que permite regular e incrementar la potencia transferida.

Este sistema aumenta la fiabilidad y estabilidad de las redes y está basado en inyectar tanto potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva en las líneas de distribución.



6.3 Pulsed Power Supplies (Fuentes para aplicaciones de pulsos)

Dentro del ámbito de las telecomunicaciones se emplea en crear fuentes de pulsos.

6.4 Micro y Minigríd

Como se desarrolló en el anejo 2, el aprovechamiento de los picos de energía procedentes de fuentes renovables de energía es un problema para las redes de distribución. El sistema SMES ofrece la solución de almacenar estos picos y en momentos de mayor consumo devolver a la red esta potencia acumulada.

Tabla 3: Aplicaciones del sistema SMES

Aplicaciones	UPS	MICROGRID	FACTS	Fuente de pulsos
Usos	Fuente de tensión de alta calidad para cargas críticas.	Almacenamiento de picos de energía dentro de pequeñas redes.	Liberador de potencias activa y reactiva para mejorar la red.	Comunicaciones con emisores y antenas por radar.
Eficiencia	92 - 95%	>97%	>94%	> 90%

En vista a la tabla 3 apreciamos, por una parte, la gran eficiencia que tienen los sistemas SMES en cualquiera de sus múltiples aplicaciones, y por el otro los diversos usos que podemos darle.

En este trabajo se desarrollará este sistema aplicado a una microgrid. Con esto se conseguirá mantener estable la red ante la conexión o desconexión de grandes cargas que tiendan a desequilibrarla.

7. DISEÑO DE LA BOBINA SUPERCONDUCTORA

Dentro del sistema SMES la selección de una bobina que soporte las bajas temperaturas, así como las altas corrientes, es una tarea imprescindible, ya que de este dependerá el rendimiento del sistema en gran medida.



En el ejemplo representativo que se ha estudiado vemos los datos más habituales sobre este tipo de inductor.

Se suele emplear un superconductor inductivo de en torno a 1-10 Henrios con una capacidad de almacenamiento de hasta 100MJ. Está compuesto por distintos módulos, cada uno de los cuales lleva unas 40 vueltas de material superconductor. Admiten una corriente de más de 200 A y trabajan en un rango de entre 10 y 30K.

En la ilustración 7 vemos el esquema eléctrico de cómo sería una bobina superconductora en un sistema SMES real.

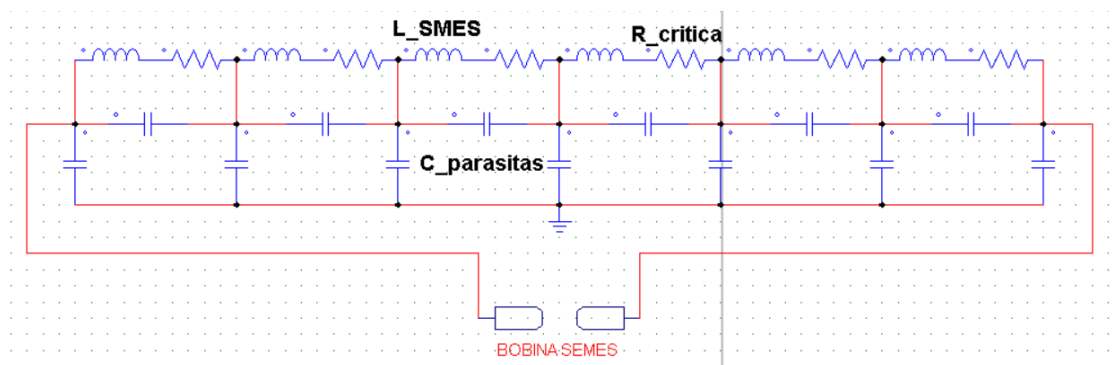


Ilustración 7: Circuito real de una bobina (Fuente propia)

Vemos el carácter inductivo, capacitivo y resistivo de una bobina superconductora aplicada al sistema SMES.

7.1 Selección del tipo de bobinado

Hay dos tipos de superconductores:

1. Superconductores de bajas temperaturas:

Son aquellos que necesitan temperaturas del orden de 4K, para lo cual se emplea el costoso Helio para su refrigeración.

2. Superconductores de altas temperaturas

Son aquellos superconductores que tienen la temperatura crítica por encima de los 40K y se llaman HTS, “High Temperatura Superconductors”. En su refrigeración se emplea el económico nitrógeno líquido.

Una vez presentado el ejemplo característico, procedo a hacer una guía de como seleccionar y dimensionar un inductor basado en superconductores. En nuestro caso



de sistema SMES emplearemos **superconductores del tipo 1**, es decir de muy bajas temperaturas.

No se entrará en profundidad en el fundamento teórico de cada apartado puesto que esto desbordaría el campo de aplicación del trabajo fin de grado.

Hay dos elementos que tenemos que tener en cuenta para diseñar una bobina SMES.

1. Las propiedades del conductor
2. La forma y la manufacturación del proceso.

El material conductor empleado en un sistema SMES llevado a cabo en Estados Unidos (AMSC) permitía transportar 115 A a 77K y estaba compuesto por acero inoxidable. En la ilustración 8 vemos las características del conductor empleado:

AMSC WIRE SPECIFICATION (COURTESY AMSC)

Properties	Value
Thickness (avg.)	0.31 (+/- 0.02) mm
Width (avg.)	4.2 (+/- 0.2) mm
Critical Tensile Stress	265 MPa
Critical Tensile Strain	0.4 %
Critical Bend Diameter	70 mm
77 [K], 1 [μ V/cm] self field, 95 [%] Ic retention	

Ilustración 8: Parámetros típicos de una bobina superconductora (Chennai, A. (s.f.). Design of Superconducting Coil for SMES)

La forma y proceso de fabricación de la bobina deben de tener en cuenta el lugar en el que se van a llevar a cabo, puesto que la temperatura del emplazamiento influirá en gran medida. El diseño de la bobina puede variar, las tres opciones para bobinar un inductor son:

1. Bobina solenoidal

La bobina en forma de solenoide es la más empleada debido a su facilidad de construcción y su elevada densidad de campo magnético, aunque presenta el inconveniente de su elevado gasto de material. Necesita de aislamiento entre los conductores y también con la tierra de la instalación. En definitiva, permite soportar el desgaste mecánico y consigue una alta eficiencia.

2. Bobina Toroidal

La forma toroidal es muy buena alternativa también, pero presenta un complicado ensamblaje y unión a pesar de su gran ventaja frente a las pérdidas por desmagnetización.



3. Bobina de múltiples solenoidales

La forma solenoidal múltiple, por el contrario, es complicada de llevar a cabo y supone un elevado gasto en material, sin embargo, permite mayores rangos de corriente.

7.2 Ventajas del bobinado elegido

Debido a que la forma solenoidal es utilizada con mayor frecuencia en los sistemas SMES en este trabajo se optará por ella. Sus principales ventajas de su elección son:

- Alta densidad de campo magnético.
- No genera campo magnético de forma perpendicular a la misma, por lo que aprovechamos todo el flujo magnético. Este hecho es de vital importancia debido a la influencia en la corriente que conlleva.
- Otra ventaja de este tipo de bobinado es que permite emplear el método “Magnetic flux leakage”, que se basa en un estudio no destructivo por el cual podemos detectar la corrosión de los recipientes de almacenamiento. Otro tipo de bobinado no permite llevar a cabo esta comprobación.



Ilustración 9: Partes de una bobina superconductora

Esta imagen muestra una bobina solenoidal típica de dimensiones muy variables en función del rango de potencias y energía almacenada. Vemos sus partes de una forma muy resumida en relación con el sistema de refrigeración.

En la tabla 4 se encuentran las decisiones tomadas sobre el superconductor y la forma.



Tabla 4: Elecciones sobre la forma y tipo de superconductor

Tipo de material superconductor:	Tipo I (rango 10K-30k) NbTi
Forma de la bobina	Forma solenoidal

7.3 Criterios para la elección de los parámetros constructivos

En el siguiente apartado se mostrarán una serie de tablas en las que se ve la dependencia de los bobinados en función de varias variables. No es motivo de estudio detallado de este trabajo un análisis riguroso.

En la ilustración 10 se muestra la influencia del diámetro de un solo bucle de bobinado sobre la corriente de trabajo y sobre, el ya mencionado, flujo magnético ortogonal al sentido de la corriente.

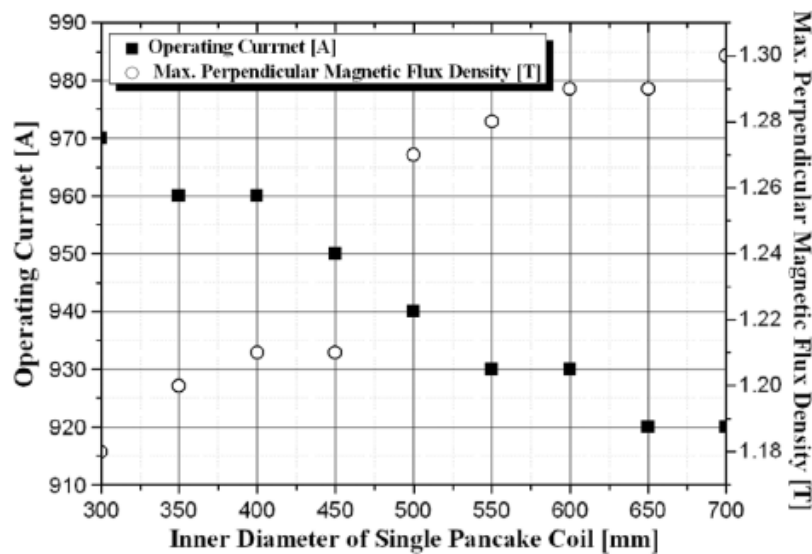


Ilustración 10: Corriente en función del número de bobinados (SMES Solenoids with Reduced Stray Field. IEEE Transactions on Magnetics)

Por tanto, a menor diámetro de los distintos grupos de devanados, mayor corriente podremos almacenar y menor dispersión de flujo magnético.



En la gráfica 11 vemos la influencia del diámetro de los bobinados sobre la densidad de flujo, además se ha comparado con la variación de SPC o single pancake cooli, es decir, la cantidad de bobinado que tiene cada celda inductiva.

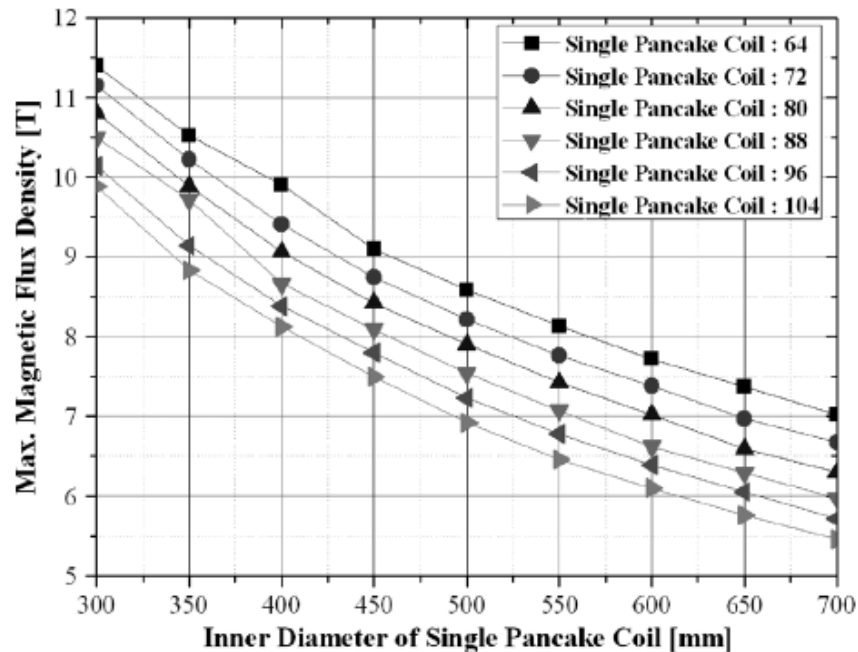


Ilustración 11: Máximo flujo de corriente en función del diámetro de una bobina superconductora (SMES Solenoids with Reduced Stray Field. IEEE Transactions on Magnetics)

Podemos apreciar que cuanto menor diámetro tenga cada celda inductiva, mayor será la densidad de flujo magnético y en consecuencia mayor poder de almacenamiento para nuestro sistema SMES.

7.4 Cálculo cuantitativo

De cara a obtener valores concretos sobre las propiedades de las bobinas debemos tener en cuenta tres parámetros importantes:

- JC: Densidad de corriente crítica.
- TC: Temperatura crítica.
- HC: Campo magnético crítico.

Estos tres parámetros están interrelacionados, cuando uno de los tres excede su límite, esto afecta a la propiedad de superconductividad del bobinado.

Cuando una gran cantidad de energía debe ser almacenada, se produce un incremento en el campo magnético, lo que lleva a una disminución acusada de los valores de



temperatura y densidad de corriente, todo ello se traduce en una pérdida de propiedades superconductoras.

Los rangos de potencia, energía y tensión dentro de los que se diseñará el sistema SMES son los siguientes:

Tabla 5: Rangos de potencia y energía necesarios

Energía Almacenada	1MJ
Potencia	2,4MVA
Tensión	1,2kV

Por lo tanto, en el cálculo del superconductor inductivo debemos tener siempre los valores críticos de estos tres parámetros en mente, así como los valores nominales de energía que debemos almacenar.

En la ilustración 12 vemos un corte de la bobina que se procederá a dimensionar cuantitativamente. Su expresión matemática de la inductancia será la recogida en la ecuación 5.

$$L = 2\pi \cdot \mu_0 \cdot N_C^2 \cdot R_1^5 \cdot T(p, q) \quad (5)$$

Los parámetros que influyen son:

- Permitividad magnética μ_0
- Número de vueltas N_C^2
- Relación de tamaño del inductor $T(p, q)$

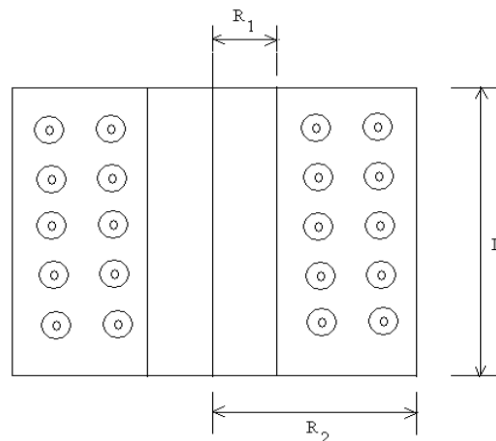


Ilustración 12: Geometría de la bobina empleada (Research on Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage)



Donde R_1 es el radio interior de la bobina, y el R_2 el exterior como se ha visto en la imagen anterior. La D es la profundidad de la bobina, a y b son el largo y el ancho.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad N_c = \frac{N}{(R_2 - R_1) \cdot D} \quad (6)$$

La N es en número de vueltas y $T(p,q)$ es una función de las relaciones de tamaño del inductor.

$$p = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad q = \left(\frac{D}{R_1}\right)$$

Por lo tanto, sustituyendo estas últimas ecuaciones en la que nos ofrece la inductancia de la bobina obtenemos:

$$L = 2\pi \cdot \mu_0 \cdot R_1^5 \cdot \left(\frac{N}{(R_2 - R_1) \cdot D}\right)^2 \cdot T(p, q) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que la energía almacenada es:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2; \text{ sustituyendo: } L = \frac{2 \cdot E}{I^2} \quad (8)$$

Pero como tenemos la potencia aparente y la tensión podemos calcular la corriente:

$$S = V \cdot I \text{ luego } I = \frac{S}{V} = \frac{2,4MVA}{1,2kV} = 2000 \text{ A}$$

$$L = \frac{2 \cdot E}{I^2} = \frac{2 \cdot 1MJ}{2000^2} = 0,5 \text{ H}$$

Por lo tanto, nuestra bobina tendrá un valor de 0.5 H.

Aplicando un criterio de diseño por el cual:

$$N_{ab} = (R_2 - R_1) \cdot D \quad (9)$$

Y fijando los valores de las relaciones de p y q , $T(p,q)$ podremos barajar las distintas alternativas.

$$p = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad q = \left(\frac{D}{R_1}\right)$$

Se ha optado por una bobina superconductora de tipo 1 del **material NbTi** por ser una de las mejores alternativas a juzgar por los ensayos encontrados.



Este material es el idóneo para una bobina superconductora debido a que es un material cerámico compuesto de óxidos cuya temperatura crítica es de 27K, con lo que a las temperaturas de trabajo que serán menores de 30K, presenta una resistencia prácticamente nula.

Una vez elegido el material solo queda encontrar la forma más óptima. Podemos modificar los valores de p y q, de tal forma que nuestra inductancia adquiera la forma cuadrada, rectangular o a escalones.

Comparando las tres formas de bobina en las mismas condiciones de longitud, corriente y factor K podemos ver cual nos permite almacenar más energía y flujo magnético.

Los rangos de T(p,q) para las principales dimensiones de bobinas son los recogidos en la tabla 6.

Tabla 6: Comparativa entre las distintas formas de una bobina superconductora

R1(mm)	R2(mm)	D(mm)	T (p,q)	Número de vueltas	Inductancia (H)	Energía almace nada (kJ)	Forma
81	162	81	T (2,1) = 0,329	2186	1,8	9	Cuadra da
81	121,5	162	T (1,5;2) = 0,2046	2186	1,07	5,3	Rectan gular
81	121,5	162	T (1,5;2) = 0,1901	2186	1,41	7,1	Escalon ada

Finalmente deducimos en vista a la tabla de que la forma cuadrada o bobina Brooks es la mejor elección debido a que obtiene la máxima inductancia en las mismas condiciones.

El material empleado para ello es el menor y además permite almacenar la mayor cantidad de energía en el menor volumen de las tres opciones barajadas.



Por lo tanto, se calcularán las dimensiones de la bobina elegida para poder almacenar 1MJ con una inductancia de 0,5H y una forma cuadrada como hemos deducido anteriormente:

$$L = 2\pi \cdot \mu_0 \cdot R_1^5 \cdot \left(\frac{N}{(R_2 - R_1) \cdot D} \right)^2 \cdot T(p, q) \quad (7)$$

Los diámetros de R1 y R2 se han cogido similares a los empleados en otros estudios de este tipo, la única condición que debemos tener en cuenta es respetar la relación existente entre ambos para asegurar la forma cuadrada de la misma.

En este caso se han supuesto $R_2 = 2 \cdot R_1 = 162\text{mm}$. Por lo tanto, solo queda sustituir en la ecuación y despejar el número de vueltas que debemos dar para poder cumplir con los rangos de potencias propuestos.

$$0,5 = 2\pi \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot 0,081^5 \cdot \left(\frac{N}{(0,162 - 0,081) \cdot 0,081} \right)^2 \cdot 0,329$$

$$N = 1541,52 \rightarrow 1542 \text{ vueltas}$$



8. CONCLUSIÓN

Los parámetros de nuestra bobina superconductora de material **NbTi Niobium–titanium** serán:

Tabla 7: Descripción de la solución inductiva

R1 y D1 (mm)	R2(mm)	Forma	Material	Tipo de superconductor	Número de vueltas
81	162	Cuadrada	Cerámica NbTi	Tipo I	1542

Inductancia (H)	Corriente (A)	Tensión (V)	Energía almacenada (MJ)	Potencia (MVA)
0,5	2000	1200	1	2,4

Una vez escogida y dimensionada la bobina debemos estudiar el tipo de convertidor CA/CC que va a permitir cargarla, descargarla o almacenar energía dentro de ella en forma de campo magnético. Este asunto se abordará en el anejo 4.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acero, I. J. (1995). Comparative Study and Simulation of Optimal Converter Topologies for SMES Systems. *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 5(2), 254-257.
- [2] Bi, Y. F. (2013). Cooling and Cryocoolers for HTS Power Applications. *Applied Superconductivity and Electromagnetics*, 4(1), 97-108.
- [3] Chennai, A. (s.f.). Design of Superconducting Coil for SMES.
- [4] Ji Hoon Kim, W.-S. K.-Y. (2005). Characteristic Test of HTS Pancake Coil Modules for Small-Sized SMES. *IEEE Transactions on applied Superconductivity*, 15(2), 1919-1922.
- [5] Jilei Gao, H. S. (2008). *A Novel Control Strategy for Current-Source Rectifiers with Space Vector Modulation*. China.



- [6] LiJun, K. C. (2003). *Multi-modular Current-Source Based Hybrid Converter for SMES*.
- [7] Padimiti, D. S. (2007). *Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) for Improved Dynamic System Performance*.
- [8] R. L. Kustom, J. J. (1991). Research on Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES). *IEEE Transactions on Magnetics*, 27(2), 2320-2323.
- [9] Schonwetter, G. (1994). SMES Solenoids with Reduced Stray Field. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(4), 2636-2639.
- [10] Seyeon Lee, K.-P. Y.-K.-S.-H.-C. (2012). Design of HTS Toroidal Magnets for a 5 MJ SMES. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3).
- [11] Shohei Kanda, Y. H. (2010). *Independent Control of Rectifiers Connected to SMES in AC Loop Microgrid System*.
- [12] Yan Li, S. C. (2002). *Characteristics of SMES Fed by A Voltage Source Converter and Its Robust Control in Power System*.