

La superconductividad y sus aplicaciones

1ª parte

Gustavo Sarmiento¹, Santiago Sanz¹, Ainhoa Pujana¹, José María Merino¹, Aitor Kortajarena², Raúl Rodríguez³, Susana Apiñániz³
¹ Área de Energía Marina, Energía y Medio Ambiente. TECNALIA
² Servicios. TECNALIA
³ Redes Eléctricas Inteligentes, Energía y Medio Ambiente. TECNALIA

1. INTRODUCCIÓN: PASADOS 100 AÑOS

Pese a haber transcurrido más de cien años desde su descubrimiento, la superconductividad presenta algunos aspectos, principalmente teóricos, que continúan sin ser totalmente entendidos. Por otro lado, y a pesar del gran impacto de los dispositivos superconductores en la vida diaria, la mayor parte de sus aplicaciones son desconocidas por una gran parte de la sociedad. En este contexto, **nuestro objetivo será** presentar una revisión sobre este sorprendente fenómeno y sus desarrollos más destacados, orientada principalmente hacia sus aplicaciones en el área de la energía. Finalizaremos con algunas reflexiones y con una presentación de las actividades y desarrollos de TECNALIA en este campo.

2. FENOMENOLOGÍA Y BREVE HISTORIA DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad es un estado de la materia carente de resistencia eléctrica, caracterizado por tres magnitudes críticas: temperatura (T_c), densidad de corriente (J_c) y campo magnético aplicado (H_c). Estas magnitudes definen la superficie crítica que separa las fases superconductor y resistiva (ver Figura 1, izquierda). Por debajo de la superficie así definida, el material se encuentra en estado superconductor. Desde un punto de vista tecnológico, y por las implicaciones que presenta, la deformación es también un parámetro

que conviene tener en cuenta dado que degrada las características críticas del superconductor.

“*Kwik nagenoeg nul*”: “*Mercurio prácticamente cero*”. Este apunte en el cuaderno de laboratorio de Kamerlingh Onnes, anunció la primera observación de la superconductividad el 8 de abril de 1911. El premio Nobel

retrasados únicamente por las guerras mundiales. El efecto Meissner-Ochsenfeld², publicado en 1933, significó la observación experimental del diamagnetismo perfecto en superconductores puros y también que la superconductividad es una fase termodinámica de la materia y no únicamente un caso de resistencia nula. La explicación del comportamiento electromagnético de los superconductores puros, de acuerdo a la *teoría de Maxwell*, llevó a proponer a los hermanos London en 1935 las llamadas ecuaciones de London, legando así la primera teoría fenomenológica de la superconductividad. Tras la in-

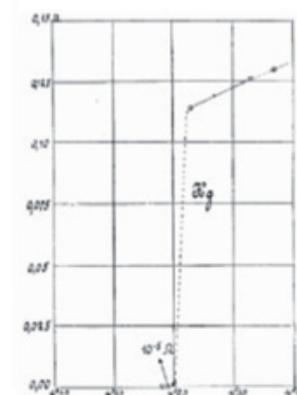
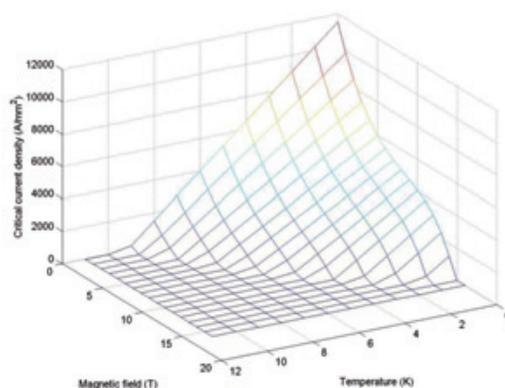


Fig. 1: Izquierda: Diagrama de fase del NbTi, cedida por F. Toral (CIEMAT). Derecha: Gráfica histórica de la resistencia (Ω) vs temperatura (K) para Hg, en los experimentos realizados por Kamerlingh Onnes

holandés había detectado una abrupta caída de la resistencia del mercurio¹ en el entorno de 4,2 K. La Figura 1, derecha, muestra el histórico gráfico de la resistencia frente a la temperatura para el mercurio. Por tanto, la superconductividad apareció en un principio como una propiedad por la cual la resistencia eléctrica desaparecía abruptamente por debajo de una cierta temperatura.

El descubrimiento abrió un nuevo campo para investigadores experimentales y teóricos, cuyos avances fueron

introducción del concepto de “*longitud de coherencia*” por Pippard³, en 1957 se estableció el modelo microscópico de la superconductividad conocido como teoría BCS – según las iniciales de sus proponentes: Bardeen, Cooper y Schrieffer⁴–. Los denominados “*pares de Cooper*” (pares de electrones acoplados por su interacción a través de fonones, vibraciones cuantizadas de la red cristalina) fueron identificados como los verdaderos portadores de carga superconductor. Siete años antes,

Ginzburg y Landau habían introducido una teoría fenomenológica denominada GL⁵, la cual engloba la naturaleza mecánico-cuántica a nivel macroscópico del estado superconductor y explica la destrucción del mismo bajo la aplicación de campos magnéticos y corrientes eléctricas, inexplicable desde la perspectiva de la teoría de London.

También 1957 fue el año en que Abrikosov acuñó el término superconductor de “Tipo II”⁶ para denominar aquellos materiales que muestran una transición continua de segundo orden en las proximidades de su intensidad de campo magnético crítico H_c . De hecho, mientras los superconductores “puros” (denominados en contraposición de “Tipo I”) presentan una transición discontinua de primer orden en H_c , los Tipo II permiten la formación de los denominados “vórtices” del cuanto de flujo magnético en la región comprendida entre los campos críticos H_{c1} y H_{c2} (el último describe la pérdida completa del estado superconductor). El estado mixto se denomina fase Schubnikov. Conviene destacar que la gran mayoría de los superconductores de uso práctico obedecen a este mecanismo.

El efecto Josephson fue otra notable predicción apoyada en la teoría GL. Fue formulado por Brian Josephson, en 1962⁷, quien predijo que, debido al efecto túnel, una supercorriente puede fluir de manera persistente entre dos superconductores que se encuentren separados por un “enlace débil”: una película delgada de material aislante, metal o una constricción física. En el efecto Josephson AC aparece una corriente alterna bajo la aplicación de una tensión DC. Por su parte, en el efecto Josephson DC aparece una corriente incluso en ausencia de tensión.

Bajo un campo magnético externo en dos enlaces débiles en paralelo, se produce un patrón de interferencia entre portadores de supercorriente y por tanto una variación de la corriente con el campo magnético. Este efecto se ha convertido en la base de muchas aplicaciones tecnológicas de la superconductividad, por ejemplo el SQUID

(véase el apartado de aplicaciones en la investigación básica).

El descubrimiento de la superconductividad en óxidos de Cu de estructura tipo perovskita en 1986 por Bednorz y Müller⁸, con una T_c que varía desde los 30 K hasta temperaturas superiores a la del punto de ebullición atmosférica del nitrógeno líquido (77 K), inició la carrera en la búsqueda de materiales superconductores que pudiesen trabajar a temperatura ambiente. Estos fueron denominados *superconductores de alta temperatura* o HTS (de sus siglas en inglés). Además del claro impacto de este descubrimiento en las aplicaciones, se apuntó el hecho de que la teoría BCS no podía explicar satisfactoriamente el comportamiento superconductor de esos óxidos de cobre. Hoy en día, el mecanismo básico responsable del comportamiento de los materiales HTS no está completamente descifrado.

Es importante señalar que tras cien años del descubrimiento de este sorprendente fenómeno, ingenieros e investigadores continúan esforzándose en la búsqueda de nuevos materiales que pongan a prueba las teorías existentes. Recientemente, en el año 2006, se descubrió una nueva familia de superconductores basados en hierro, los “oxipnictidos”⁹.

3. CONSEGUIR LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde el punto de vista de las aplicaciones, el potencial beneficio de la superconductividad ya fue señalado por su descubridor, contemplando la posibilidad de construir electroimanes para generar altos campos¹⁰. Sin embargo, los bajos campos críticos de los materiales estudiados por K. Onnes (60 mT para el Pb a 4,2 K) supusieron un obstáculo insalvable para tales usos.

Hasta finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, las aleaciones de alto campo como el niobio-titanio (NbTi) y niobio-estaño (Nb₃Sn) no fueron descubiertas ni mejoradas. Todas ellas son superconductores de Tipo

II, y permitieron el surgimiento de un mundo nuevo de aplicaciones.

A continuación se presentan los materiales más relevantes desde el punto de vista práctico. Posteriormente, se mencionarán sus necesidades de refrigeración y finalmente se mostrará el amplio abanico de aplicaciones existentes.

3.1. Materiales

Atendiendo a la aplicación tecnológica, los materiales se clasifican como LTS o materiales superconductores de baja temperatura por sus siglas en inglés, con una temperatura crítica sobre los 4,2 K y HTS o de alta temperatura, cuyo parámetro crítico no está tan bien delimitado pero tradicionalmente entendido como mayor que 35-40 K.

El NbTi y el Nb₃Sn son materiales LTS ampliamente usados en las aplicaciones y se caracterizan por una T_c de 9 y 18 K respectivamente. Sin embargo, normalmente operan a 4,2 K, la temperatura de ebullición del helio líquido (LHe) a presión atmosférica. Conviene remarcar la importante diferencia entre las temperaturas o parámetros críticos y las condiciones de operación. Para imanes o máquinas que requieren de altos campos magnéticos, las temperaturas de operación necesariamente están muy por debajo de sus valores críticos.

Tras el descubrimiento de los HTS en 1986, comenzó una auténtica carrera en pos de temperaturas críticas más altas. Se descubrieron en pocos años un gran número de materiales HTS, incluidos los de uso práctico más utilizados hoy día: BISCCO-2212 ($T_c \sim 85$ K), BISCCO-2223 ($T_c \sim 110$ K) e YBCO-123 ($T_c \sim 90$ K). El Diboruro de Magnesio (MgB₂), también considerado habitualmente como HTS, fue descubierto en el año 2001¹¹ con una T_c de 39 K.

Los superconductores se presentan en forma de hilos o cintas. Se han validado varios procesos para la fabricación de hilos de longitudes largas, uniformes en toda su longitud y con elevada corriente crítica; algunos de ellos son: “*powder-in-tube*” (PIT), “*dip-coating*”, “*tape casting*”, “*electropho-*

retic coating” o “spray coating”. En el caso de los materiales BISCCO-2212 y BISCCO-2223, el método PIT se emplea rutinariamente para la fabricación de conductores multifilamento tipo *composite*, clasificados por los fabricantes de cintas como de primera generación o 1G.

El material YBCO-123 representa al hilo de segunda generación o 2G, ya que se fabrica mediante procesos de recubrimientos delgados. Su arquitectura comprende múltiples capas con variadas funcionalidades (incluyendo la propia capa del superconductor) sobre un sustrato. El método de deposición varía dependiendo del fabricante. American Superconductors - AMSC (EEUU) utiliza la deposición metal-orgánica sobre un sustrato texturizado biaxialmente (MOD)/RABiTS. Superpower Inc (EEUU) prefiere la deposición asistida por haz de iones (IBAD) sobre un sustrato de Hastelloy, método también seguido por el fabricante alemán Bruker. En la actualidad se están realizando grandes esfuerzos para desarrollar un método químico de deposición, mucho más económico y escalable. Conviene destacar en este sentido algunos resultados obtenidos en el Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB)¹².

Para la fabricación del hilo de MgB₂ también utilizan el proceso PIT dos compañías de referencia: Columbus Superconductors (Italia) e Hyper-tech (EEUU).

Un compendio de los hilos comerciales más destacados, atendiendo a los parámetros de corriente crítica y campo magnético, se presenta en la Figura 2. La deformación debe también tenerse en cuenta dado que afecta, por ejemplo, en el máximo radio permitido en su manejo. Para el caso concreto de las cintas superconductoras, la anisotropía también debe tenerse en cuenta en la etapa de diseño de la aplicación.

Finalmente, otro aspecto a considerar desde un punto de vista ingenieril es la combinación de las propiedades en las condiciones de operación y su precio. Ésta se representa por la Figura de mérito del coste a la corriente trans-

portada por unidad de longitud “€/kA m”. Una comparación de YBCO-123 (Superpower), BISCCO-2223 (Su-

presenta una pequeña descripción.

Los refrigerantes criogénicos (*cryogens* en inglés) pueden presentar-

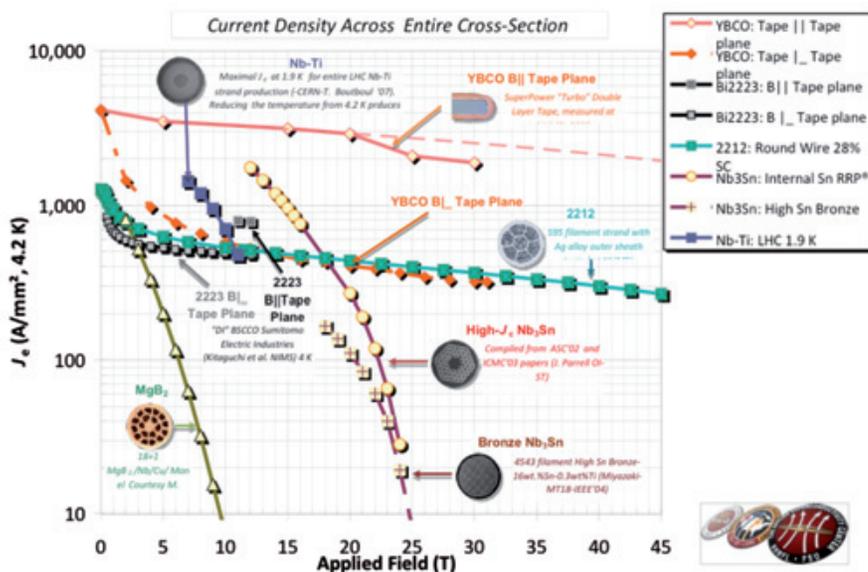


Fig.2: Densidad de corriente ingenieril, para hilos superconductores comerciales. Gráfica obtenida de Peter Lee del National High Magnetic Field Laboratory

mitomo) y MgB₂ (Columbus Superconductors) a 20 K, y 1,8 T de campo aplicado conduce a valores de 115, 80 y 30 €/kA m respectivamente. El precio lógicamente es un factor limitante, pero también su expectativa futura de evolución. Aparentemente, ésta ha sido una de las razones del progresivo abandono de las cintas de 1G frente a las de 2G.

3.2. Necesidades criogénicas

Las aplicaciones superconductoras trabajan bajo la exigente condición de contorno de las temperaturas criogénicas. Así, los sistemas deben permanecer aislados del ambiente exterior mediante un *criostato*, que debe minimizar las entradas de calor desde el exterior. El calor debido a la radiación, convección y conducción tiene que ser sistemáticamente eliminado o minimizado. Existen dos formas de evacuarlo: mediante enfriamiento directo utilizando fluidos refrigerantes criogénicos, o por vía indirecta o frío seco (mediante conducción). A continuación se pre-

se en forma de gas o líquidos de bajo punto de ebullición. Se usan en ciclos abiertos o cerrados, con o sin consumo neto de fluido. El único refrigerante criogénico adecuado para LTS es el LHe (L significa “líquido”), ya que la temperatura de uso se encuentra por debajo de la crítica de estos materiales. El LN₂ (con temperatura de ebullición de 77 K a 1 atm) también es usado junto con el LHe, pero en este caso para refrigerar las pantallas o escudos de radiación térmica, reduciendo el consumo de He y aumentando la eficiencia global del sistema.

En el caso de los HTS, son posibles distintos refrigerantes. El más común es el LN₂ pero el problema es la relativa baja densidad de corriente crítica de los HTS en este rango de temperaturas. Este inconveniente puede mitigarse trabajando a presiones reducidas (puntos de ebullición más bajos), si bien la temperatura del punto triple es el límite inferior alcanzable por este procedimiento. El neón líquido LNe (temperatura de ebullición de 27K a

Sistema de imanes (DC)	Densidad de Corriente (MA/m ²)	Corriente de Operación (kA)	Campo típico (T)	Energía almacenada en el sistema (MJ)
Resistive –aircooled	1-5	1-2	1	0,01
Resistive –water cooled	10-15	1-10	2	0,05
Large S. C. Coils for detectors	20-50	2-20	2-6	5-2.500
SC MRI magnets	20-50	1	1-10	1-40
SC Tokamaks for Fusion	25-50	5-70	8-13	5-40.000
SC Laboratory solenoids	100-200	0,1-2	5-20	1-20
SC accelerators	200-400	1-12	4-10	1-10.000

Tabla 1: Características principales más usuales en varios sistemas de imanes¹³

presión atmosférica) es otra elección conocida, pero su alto precio limita su aplicación exclusivamente a sistemas de ciclo cerrado. Como orden de magnitud, su precio es aproximadamente diez veces el del helio. A primera vista el hidrógeno líquido, LH₂, es un candidato prometedor dada su temperatura de ebullición de 20,4 K a presión atmosférica. Sin embargo, no se usa para refrigerar imanes por su precio, similar al del LHe, y principalmente por el riesgo asociado a su manejo, ya que forma mezclas explosivas con concentraciones en volumen entre 4% y 74,5 %, y para energías de activación de sólo 0,02 mJ. Además, fragiliza algunos materiales estructurales como el acero al carbono. Sin embargo, el riesgo real no es muy diferente que el de otras sustancias comúnmente usadas. Quizás la percepción de su peligrosidad está condicionada por accidentes famosos como el del Zeppelin Hindenburg en 1937 o el del transbordador espacial Challenger en 1986.

Por otro lado, los “cryocoolers” son complejos sistemas indirectos de refrigeración, en los cuales no hay aporte continuo de refrigerante desde el exterior. Desde el punto de vista del usuario trabajan como una caja negra. Es posible distinguir dos partes principales en todos los “cryocoolers”: una trabajando a temperatura ambiente y la otra que trabaja en frío. El fluido refrigerante se mueve entre ambos lados extrayendo el calor de la parte fría ha-

cia la caliente. El proceso puede conseguirse en uno o más pasos, esto es, con o sin temperaturas intermedias. Este aspecto es muy útil para refrigerar las pantallas o escudos de radiación de los criostatos. Algunos ejemplos son los “cryocoolers” tipo Stirling, Gifford-McMahon y “Pulse-tube”. La eficiencia es uno de los aspectos más importantes con el que los fabricantes deberán enfrentarse en el futuro, si el empleo de estos dispositivos comienza a generalizarse.

4. APLICACIONES EN INVESTIGACIÓN Y MEDICINA

Pasados cien años desde su descubrimiento, la superconductividad ya ha impactado profundamente en nuestras vidas. Las peculiares características técnicas que ofrece ya han derivado en un buen grupo de aplicaciones, recopiladas y descritas brevemente en este apartado.

4.1. Investigación básica

Los imanes de alto campo están ampliamente presentes en universidades y centros de investigación. En términos generales, los electroimanes basados en cobre son capaces de funcionar con densidades de corriente de hasta 10⁷ A/m², utilizando agua como refrigerante para evacuar las pérdidas óhmicas. El hierro dulce permite minimizar el volumen de conductor

(amperios-vueltas) pero con un límite de 2 T en su campo de saturación. Es posible obtener campos mayores con solenoides de tipo *Bitter*, pero pagando un alto coste en términos de consumo energético y de refrigerante. Los hilos superconductores permiten utilizar densidades de corriente mayores (una o dos órdenes de magnitud) con demandas de refrigeración relativamente bajas. La Tabla 1 muestra algunos valores característicos para bobinas SC. Como apunte, un diseño común utilizado para conseguir campos magnéticos mayores es la superposición de bobinas concéntricas de distintos materiales superconductores con diferentes campos críticos.

Los aceleradores de partículas dedicados al estudio de la física de altas energías, fuentes de luz sincrotrón y de generación de neutrones por espalación son otros campos en los que la superconductividad esta ampliamente presente. Los aceleradores de partículas son dispositivos usados para energizar haces de partículas cargadas con diversos fines. Los mayores aceleradores del mundo son los colisionadores, que están diseñados para que impacten dos haces de partículas de alta energía y estudiar el resultados de esta interacción en un intento de entender mejor la naturaleza, el origen del universo y las propiedades de la materia.

En los aceleradores circulares, se utilizan potentes imanes para guiar los haces mientras las partículas van

ganando energía vuelta a vuelta. Estos imanes, que mantienen el haz en la trayectoria circular, son conocidos como dipolos. Otros imanes son los cuadrupolos, sextupolos o solenoides, usados para enfocar y corregir la trayectoria del haz.

La energía máxima que se puede transferir a las partículas está limitada por la fuerza centrípeta que las mantiene en una órbita cerrada. Así, hay dos posibilidades para incrementar la energía final de las partículas antes de la colisión: aumentar el radio del sistema o la intensidad de los dipolos. El tamaño del sistema puede incrementarse, aunque obviamente hay un límite práctico. Por ejemplo, el anillo del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el CERN (Suiza), el mayor del mundo, tiene 26,7 km de perímetro y requiere de unas 126 t de LHe para el funcionamiento de sus imanes de 8,3 T (40 MW de potencia de refrigeración equivalente). Si se hubiese construido con imanes resistivos, con campos limitados a 1,8 T, la circunferencia hubiera necesitado de 100 km, requiriendo 900 MW (equivalente a una planta nuclear de buen tamaño), que sería necesario refrigerar con agua y evacuar de la instalación¹³.

La otra forma de incrementar la energía de los haces es aumentando el campo magnético. Con la tecnología actual es posible alcanzar los 8,5 T con cables de NbTi refrigerados con helio superfluido; éste es el caso en los dipolos del LHC. Otras tecnologías actualmente en desarrollo basadas en Nb₃Sn, podrían producir campos cercanos a las 15 T en aceleradores venideros o actualizaciones y mejoras de los actuales.

Las fuentes de luz sincrotrón son aceleradores dedicados a la producción de la llamada luz sincrotrón. Ésta es la radiación producida por un haz de partículas cargadas cuando se fuerza un cambio en su trayectoria. Se ha construido un gran número de estas fuentes en el mundo, incluyendo ALBA (Bellaterra-España). La tercera generación de fuentes de luz son los “Free Electron Lasers” (FEL) o láseres de

electrones libres, donde el acelerador es lineal en lugar de circular. Las características de esta luz son similares a las de la luz láser, de ahí su nombre, pero con frecuencias en el rango de los rayos X y pulsos de duración de femtosegundos. Hay varios proyectos en curso en el mundo: LCLS (EEUU), SACLA (Japón), E-XFEL (Alemania). En éste último, el Ministerio de Economía y Competitividad participa con unos 20 M€ a través de las instituciones del CIEMAT y CELLS.

Las fuentes de espalación de neutrones (SNS) son instalaciones dedicadas a la producción de un haz controlado de neutrones para experimentar con la materia. Éstos se generan de la siguiente manera: un haz de iones de alta intensidad impacta contra un blanco que expelle fragmentos de materia (neutrones). La superconductividad puede estar presente en los imanes y puede aparecer también en las cavidades resonantes que empaquetan y aceleran el haz de iones. En España se está desarrollando el proyecto de un acelerador lineal llamado ESS Bilbao, que servirá como banco de ensayos de componentes y subsistemas relevantes para la Fuente Europea de Espalación, que previsiblemente se construirá en Lund (Suecia).

Otro campo de aplicación es el de los dispositivos de alta sensibilidad basados en SQUID, usados en investigación básica. SQUID o “Superconducting Quantum Interference Device” es el nombre de un importante sistema electrónico superconductor. Consiste en una o más uniones Josephson conectadas para formar un circuito múltiplemente conexo. Hay tres tipos de SQUIDs: DC-SQUID (con dos uniones y una característica corriente-voltaje en corriente continua), RF-SQUID (contiene una única unión y aporta una respuesta en radiofrecuencia) y R-SQUID (semejante al anterior pero con una resistencia en serie para producir una relajación oscilatoria). R-SQUID es el dispositivo base de la metrología cuántica del voltio: cuantos de flujo magnético son pulsados a través de la unión resistiva a la frecuencia

de Josephson, dada por la relación $V_0/f = \Phi_0 \approx 2,0678 \times 10^{-15}$ Weber ó 2,0678 $\mu\text{V}/\text{GHz}$. Como ofrece una relación exacta entre la tensión y la frecuencia, es posible definir un patrón basado en un estándar de frecuencia (por ejemplo el Cesio), con el que se obtienen precisiones muy elevadas. Actualmente se está en proceso de aprobación, bajo la supervisión del *Bureau International Des Poids et Mesures*¹⁴.

En los laboratorios de magnetismo, química, materiales, biotecnología y nanotecnología, los magnetómetros SQUID se emplean asiduamente. El mecanismo de detección se basa en la alta sensibilidad del DC-SQUID en la medida de diminutas diferencias de flujo magnético, siendo incluso capaz, al menos teóricamente, de detectar el incremento debido a un simple cuanto de flujo Φ_0 . La compañía tradicionalmente más importante en esta área de aplicación es Quantum Design, que comenzó su actividad comercial en 1980. SHE también exploró este área de negocio, siendo pionero en el desarrollo de magnetómetros comerciales, si bien en 1986 abandonó la actividad.

Los magnetómetros SQUID también se aplican en investigación médica – tal y como el lector encontrará más adelante – y en geofísica, disciplina en la que las anomalías del campo magnético de la Tierra pudieron ser determinadas con gran precisión desde el momento en que se inventó. Los gradiómetros basados en el SQUID son también usados para la detección de recursos minerales.

4.2. Aplicaciones Médicas

NMR (*Resonancia Magnética Nuclear*) y MRI (*Imagen por Resonancia Magnética*) son técnicas fundamentales en el campo de la medicina. El principio de funcionamiento consiste en la alineación de los espines nucleares en la dirección del campo magnético externo aplicado, induciendo transiciones entre dos estados energéticos permitidos mediante la aplicación de un campo RF (radiofrecuencia), sólo posible en un rango muy estrecho en torno a la frecuencia de resonancia magnéti-

ca. El proceso para construir imágenes se basa en la introducción de pequeños gradientes sobre el campo magnético de fondo. Estas técnicas funcionan mejor con campos magnéticos altos, dado que la intensidad de la señal RF es proporcional a la frecuencia (proporcional a su vez al campo magnético) y el tiempo de computación para construir las imágenes, inversamente proporcional a ésta. En la actualidad, el máximo campo autorizado en los pacientes es de 1,5 T, correspondiente a una frecuencia sobre los 64 MHz. Sin embargo, existen máquinas NMR, dentro del ámbito de la investigación, de hasta 900 MHz, correspondientes a 21,1 T¹⁵. Existen incluso desarrollos en pos de frecuencias por encima de 1 GHz¹⁶. Las máquinas diseñadas para trabajar a estas elevadas frecuencias deberán, necesariamente, construirse con imanes híbridos de insertos HTS. Oxford Instruments ha desarrollado un sistema MRI abierto con bobinas HTS que contrasta con el restringido espacio disponible para el paciente en la configuración solenoidal habitual. El campo magnético se genera por un par de bobinas Helmholtz, como en el caso del ciclotrón, cuya topología es muy adecuada para las características de las cintas HTS.

La *Magnetoencefalografía* (MEG) y la *Magnetocardiografía* (MCG) son dos aplicaciones biomédicas destacadas en las que la superconductividad juega un papel crucial. Los detectores SQUID son parte esencial en las técnicas magnetométricas que permiten construir las imágenes de órganos internos. Básicamente, éstos rastrean los impulsos eléctricos en el cerebro (MEG) o en el corazón (MCG). El principio es la detección de los pequeños campos magnéticos asociados a las corrientes transportadas en las neuronas y nervios. Una matriz de SQUIDS se utiliza como magnetómetro y gradímetro para detectar campos del orden del pT (10⁻¹² T). Estas técnicas han permitido un mejor entendimiento de la fisiología de estos órganos, posibilitando un diagnóstico precoz de patologías. En el caso del cerebro, los me-

canismos utilizados en el pensamiento o la toma de decisiones parecen estar a punto de ser descodificados, gracias a estas técnicas¹⁷.

Otra aplicación son los ciclotrones destinados para la producción de radioisótopos, usados tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de enfermedades. Los radioisótopos pueden utilizarse como trazadores; detectándose en su decaimiento radiactivo. Éstos funcionan como marcadores al ser introducidos en el organismo dentro de compuestos químicos que son absorbidos selectivamente por los tejidos a analizar. Un ejemplo paradigmático es la tomografía por emisión de positrones o PET. Los radioisótopos usados en esta técnica decaen emitiendo un positrón, que transcurrido un tiempo se aniquila produciendo dos fotones en direcciones opuestas. La detección de estos dos fotones ha de realizarse simultáneamente o en coincidencia para poder determinar el lugar donde se ha producido la aniquilación.

En España, bajo el proyecto AMIT¹⁸ se está desarrollando un ciclotrón superconductor de pequeño tamaño en la Unidad de Aceleradores del CIEMAT. Su objetivo es acelerar iones hasta 10 MeV para producir radioisótopos para PET. Normalmente, estas máquinas son resistivas y consecuentemente pesadas y grandes. Haciéndolas superconductoras es posible obtener máquinas más compactas con menores costes de operación.

PARA SABER MÁS

Lecturas recomendadas

100 years of Superconductivity. 2012 CRC PRESS. Editors: Horst Rogalla and Peters H. Kes.

Enlaces recomendados

<http://www.supraconductivite.fr>
<http://www.msm.cam.ac.uk/ascg/lectures>
<http://www.superconductivityiea.org>
<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe>
<http://www.conectus.org/superconductivity.html>

REFERENCIAS

- 1) H. Kamerlingh Onnes, Proc. 14 (1912) 685, Comm. 142c (Nov. 1911)
- 2) W. Meissner, R. Ochsenfeld, Naturwissenschaften 21 (1933) 787
- 3) A.B. Pippard, Proc. Roy. Soc. (London) A216, 547 (1953)
- 4) J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957)
- 5) V.L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksperim. i Teor. Fiz. 20, 1064 (1950)
- 6) A.A. Abrikosov, Zh. Eksperim. i Teor. Fiz. 32, 1442 (1957)
- 7) D.D. Josephson, Phys.Lett. 1 (1962) 251
- 8) G. Bednorz and K.A. Müller, Z. Phys. B64, 189 (1986)
- 9) Kamihara Y, Hiramatsu H, Hirano M, Kawamura R, Yanagi H, Kamiya T and Hosono H 2006, J. Am. Chem. Soc. 128 10012
- 10) Third International Congress of Refrigeration in Washington - Chicago (1918).
- 11) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu. Nature 410 (2001) 63
- 12) "Method for obtaining superconducting tapes from metal-organic solutions having low fluorine content" - Patent pending WO2011/067453A1
- 13) 100 years of Superconductivity. 2012 CRC PRESS. Editors: Horst Rogalla and Peters H. Kes.
- 14) <http://www.bipm.org/>
- 15) W.D. Markiewicz, I.R. Dixon, C.A. Swenson, W.S. Marshall, T.A. Painter, S.T. Bole, T. Cosmos, M. Parizh, M. King, G. Ciancetta. IEEE Trans. on App. Supercond. Vol. 10, Issue 1, pp. 728-731, Mar 2000
- 16) New hybrid magnets to enable research in a currently unavailable regime. NHMFL Reports, 2006, Vol. 13, No. 5
- 17) <http://www.meteoreservice.com/neurospin/>
- 18) <http://www.cenit-amit.com/joomla/>