



Departamento de
Ingeniería Eléctrica
Universidad Zaragoza



Instituto de Ciencia
de Materiales de Aragón

Proyecto Fin de Carrera

“Realización de Experimentos Divulgativos sobre el Fenómeno de la Superconductividad”

JOSÉ MARÍA IZQUIERDO HERNANDO

Especialidad: Electricidad (Centrales y Redes)

Directores: Mario Mora Alfonso y Antonio Usón Sardaña

Dpto. de Ingeniería Eléctrica

Dpto. de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluido

ÍNDICE

	Página
1. Antecedentes.....	2
2. Objetivos.....	3
3. Descripción de los Experimentos de Cátedra.....	4
3.1. Ausencia de Resistencia Eléctrica.....	4
3.1.1. Historia, explicación e importancia de la superconductividad.....	4
3.1.2. Propiedades y proceso de fabricación del B-2212	8
▪ Método de Fusión Zonal inducida por Laser (FZL).....	9
3.1.3. Descripción del Experimento de Cátedra.....	10
3.1.4. Elementos empleados y detalles técnicos.....	14
3.1.5. Guión del vídeo divulgativo.....	14
3.2. Levitación por Superconductividad.....	16
3.2.1. Historia, explicación e importancia del fenómeno.	16
▪ Efecto Meissner.....	16
▪ Superconductores Tipo I y II.....	19
▪ Efecto Atrapamiento del Campo Magnético (Flux Pinning)...	21
3.2.2. Propiedades y proceso de fabricación de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	23
3.2.3. Levitación magnética.....	24
3.2.4. Descripción del Experimento de Cátedra.....	25
3.2.5. Elementos empleados y detalles técnicos.....	26
3.2.6. Guión del video divulgativo.....	26
4. Conclusiones.....	29
5. Bibliografía.....	30

1. ANTECEDENTES

Mi Proyecto de Fin de Carrera se incluye dentro del grupo de actividades de divulgación científica del grupo de profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica, denominado Edemuz, (acrónimo del Equipo Docente de Electromagnetismo de la Universidad de Zaragoza) adscrito a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA), y del ICMA (Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón-CSIC). Sus orígenes se remontan a 1996, cuando estos profesores comienzan sus actividades en asignaturas de electromagnetismo impartiendo clases a sus alumnos en primer curso, mostrando distintos experimentos relacionados con su docencia. Dicho equipo ha colaborado en más de una ocasión con el departamento de Ciencia y Tecnología de los Materiales y Fluidos, concretamente con el profesor-investigador D. Mario Mora Alfonso, en la realización de experimentos de Superconductividad y Levitación, empleando recursos del ICMA.

Dentro de las actividades del Edemuz, podemos destacar distintos aspectos, fundamentalmente su divulgación científica, con dos páginas en internet diferenciadas. Una de ellas de contacto, dudas, información en general en Facebook y otra más científica, dónde se exponen y explican visualmente distintos experimentos realizados por el departamento. Esos vídeos se encuentran alojados en la página de YouTube. También destacaremos su implicación activa en distintos eventos, como la Semana de la ingeniería realizada en la universidad de Zaragoza o la colaboración con el grupo de aristas Al-Mayari así como distintas charlas científicas.

He colaborado anteriormente con el Departamento de Ingeniería Eléctrica en el diseño de un experimento de cátedra para la demostración de la superconductividad, Fig. 1 y 2. Mi trabajo consistió en el diseño y elaboración de una de una caja de latón que contenía un hilo de cobre y un filamento de material superconductor, ver Fig. 3. El filamento superconductor procedía de los laboratorios que el Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón tiene en el campus Río Ebro. El experimento demostraba el comportamiento de un material superconductor una vez enfriado por debajo de su temperatura crítica, respecto a otro que no lo era a esa temperatura.



Fig. 1. Realización del experimento de cátedra sobre la superconductividad por el profesor Jesús Letosa en el Laboratorio de Electricidad del Dpto. de Ingeniería Eléctrica.

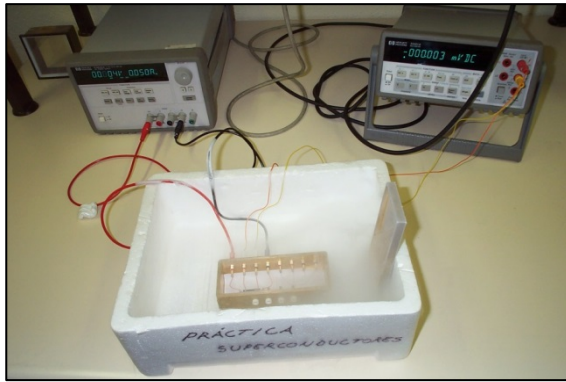


Fig. 2. Realización del experimento de cátedra sobre la superconductividad. Detalle de la fuente de corriente, del polímetro y de la caja de latón conteniendo los dos conductores. La caja se encuentra en un baño de nitrógeno líquido a 77 K.

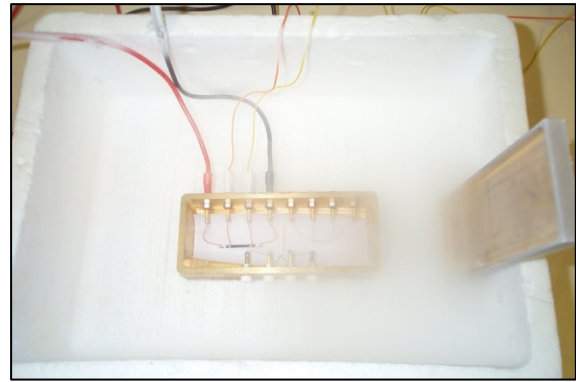


Fig. 3. Detalle de la caja de latón y su tapa en el baño de nitrógeno líquido durante el experimento de cátedra.

Se hacía circular una corriente eléctrica por ambos filamentos y se observaba el efecto sobre la diferencia de potencial. Actualmente se emplea en actividades docentes para alumnos de primer curso de la asignatura Física II del grado de Ingeniería Eléctrica y para demostraciones de divulgación científica.

2. OBJETIVOS

El objetivo de mi proyecto es continuar con las actividades de divulgación descritas anteriormente en colaboración con el Edemuz y el ICMA. Concretamente se tratará de elaborar experimentos relacionados con la superconductividad, para posteriormente plasmarlos de forma audiovisual y poder darlos a conocer públicamente.

El planteamiento docente basado en los experimentos de cátedra como los que aquí desarrollo se aproxima, en parte, al empleado en universidades anglosajonas, fundamentalmente norteamericanas. En Estados Unidos, el Physics Instructional Resource Association (PIRA), a través del comité DCS (proyecto para la clasificación de demostraciones) [1] [2] clasificó las demostraciones para la enseñanza de la Física en nueve grandes grupos, uno de ellos dedicado al Electromagnetismo. En [3], los profesores del Edemuz exponen la importancia que tiene para ellos el uso de este tipo de recursos docentes para la enseñanza de la Física, y del Electromagnetismo en particular.

Voy a intentar explicar de forma sencilla el efecto de “Resistencia Nula”, que se produce cuando un material superconductor se enfría por debajo de su temperatura crítica, permitiendo el paso de corriente eléctrica sin ninguna tipo de resistencia. Este fenómeno se está aplicando tecnológicamente, entre otros, al campo del almacenamiento, transporte y distribución de la energía eléctrica.

También mostraré cómo el atrapamiento de un campo magnético en el interior de un material superconductor, enfriado por debajo de su temperatura crítica, da lugar al efecto de levitación. Este fenómeno se está aplicando, entre otros, al campo del transporte de personas y mercancías.

Para la descripción de los experimentos, incluiré en la memoria breves antecedentes históricos del desarrollo de los mismos, los materiales utilizados, sus características técnicas y los detalles necesarios para su ejecución práctica.

Los vídeos divulgativos se relatarán en el idioma castellano. Existe mucho material relativo a la superconductividad en internet [4], pero casi todo se encuentra explicado en inglés. Es por ello importante desarrollar materiales divulgativos dirigidos a la comunidad hispanoparlante, muy numerosa y joven, con un creciente acceso a internet.

Edemuz tiene ya presencia en internet, a través de su página de vídeos en Youtube [5], su página en Facebook [6], y la página relacionada con sus actividades de docencia universitaria [7].

3. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE CÁTEDRA

3.1. AUSENCIA DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

3.1.1. HISTORIA, EXPLICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad tiene como característica principal la ausencia de resistencia eléctrica por debajo de una temperatura crítica, T_c . Además se caracterizan por mostrar un comportamiento singular respecto al campo magnético conocido como efecto Meissner.

Los superconductores son materiales cuyas propiedades eléctricas, magnéticas y térmicas cambian drásticamente cuando su temperatura baja más allá de un cierto valor crítico, T_c , o temperatura crítica, característico de cada sustancia.

La conductividad de estos materiales (inversa de la resistividad) aumenta bruscamente por debajo de T_c , además se convierten en sustancias diamagnéticas perfectas (no permiten ningún campo magnético dentro del material cuando está en estado superconductor, lo que se conoce como efecto Meissner).

El descubrimiento de la superconductividad apareció derivado de la investigación del comportamiento de la materia a bajas temperaturas.

Desde el siglo XIX se intentaba lograr la licuefacción de todos los gases conocidos, incluido el aire.

En este sentido Michael Faraday de la Royal Institución de Londres, llevó a cabo una serie de experimentos en 1823, que le llevaron a licuar un buen número de gases, Sin embargo, esta técnica no resultaba suficiente para la licuefacción del helio (He), del hidrógeno (H), del oxígeno (O₂), del nitrógeno (N₂), del metano (CH₄), del monóxido de carbono (CO), ni del óxido nítrico (NO), que eran los únicos gases que faltaban por licuar de todos los que se conocían en aquella época y, en consecuencia, tampoco el aire había sido licuado, tras repetir sus experimentos en 1845 llegó a pensar que estos gases podían ser permanentes

Unos años después, Thomas Andrews licuando CO_2 , estudió el comportamiento de las sustancias en su cambio de fase, determinando que era imposible licuar un gas por simple acción de compresión cuando permanecía por encima de una temperatura denominada temperatura crítica, mientras que si estaba por debajo de dicha temperatura, sí sería posible licuarla por la sola acción de la compresión.

En esta época los avances se suceden, en 1877 Luis Caillet consigue licuar el oxígeno, alcanzando los 90,2 K, en 1898 James Dewar de la Royal Institución de Londres logra licuar hidrógeno a una temperatura de 20,8 K.

El siguiente paso, decisivo en la historia de la superconductividad, lo dio el científico holandés Heike Kamerlingh Onnes, quien en el año 1908 obtuvo por primera vez helio líquido a temperatura de 4,22 K. Habiendo alcanzado esta temperatura, inició el estudio de los metales bajo estas condiciones, estudiando el comportamiento de su resistividad eléctrica. En 1911 observó que la resistencia eléctrica del mercurio adquiría un valor de cero cuando éste se enfriaba a una temperatura cercana al cero absoluto (4,2 K o -269°C), ver Fig. 4. De este modo se descubre el fenómeno de la superconductividad. Más tarde, en 1913, obtuvo el Premio Nobel de Física por su investigación en esta área. [8]

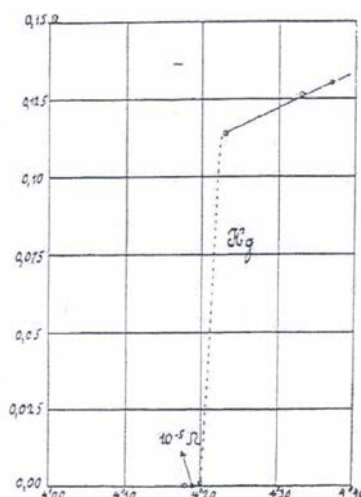


Fig. 4. Resistencia (en Ω) de una muestra de Hg en función de la temperatura (en K). Esta es la gráfica debida a Kamerlingh Onnes que marcó el descubrimiento de la superconductividad.

El siguiente hito en la comprensión de cómo se comporta la materia a temperaturas extremadamente frías ocurrió en 1933. Walter Meissner y Robert Ochsenfeld descubrieron que un material superconductor repele los campos magnéticos. Un imán en movimiento en la proximidad de un conductor induce corriente en éste. Este es el principio por el que funciona un generador eléctrico. Pero, en un superconductor las corrientes inducidas reflejan exactamente el campo que de otra manera habría penetrado el material superconductor, causando la repulsión del imán. Este fenómeno es conocido como diamagnetismo y solemos referirnos a él como “efecto Meissner”. Este efecto es tan fuerte que un imán puede levitar sobre un material superconductor.

En las décadas siguientes se encontraron otros metales, aleaciones y compuestos superconductores. En 1941 se descubrió la superconductividad del nitruro de niobio a 16 K. En 1953 el vanadio-silicio demostró sus propiedades superconductoras a 17,5 K; y en 1962 científicos de Westinghouse desarrollaron el primer cable superconductor comercial, una aleación de niobio y titanio (NbTi). En los años 60 se desarrollaron aceleradores electromagnéticos de partículas de alta energía hechos de niobio-titanio recubierto de cobre en el Laboratorio Rutherford-Appleton en el Reino Unido, y fueron utilizados por vez primera en un acelerador superconductor en los Estados Unidos en 1987.

La primera explicación teórica ampliamente aceptada sobre la superconductividad fue lanzada en 1957 por los físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer. Su Teoría de la Superconductividad fue conocida como “teoría BCS”, por las iniciales de los apellidos de sus autores, y ganaron el Premio Nobel en 1972. Esta teoría, bastante compleja matemáticamente, explica la superconductividad a temperaturas cercanas al Cero Absoluto para elementos y aleaciones simples. Sin embargo, a temperaturas más altas y con otros materiales superconductores, la teoría BCS ha resultado inadecuada para explicar completamente cómo ocurre la superconductividad.

Otro avance teórico significativo llegó en 1962 cuando Brian D. Josephson, un estudiante de la Universidad de Cambridge, predijo que la corriente eléctrica podría fluir entre 2 materiales superconductores, incluso si éstos estuvieran separados por un no-superconductor o un aislante. Su predicción fue confirmada posteriormente y le valió una parte del Premio Nobel de Física de 1973. Este fenómeno se conoce como “efecto Josephson” y ha sido aplicado a dispositivos electrónicos como el SQUID, un instrumento capaz de detectar incluso los campos magnéticos más débiles.

Durante las primeras décadas de este siglo se llegó a pensar que la superconductividad quedaría sujeta sin remedio a muy bajas temperaturas. A principio de los setenta se obtuvo un material superconductor (una aleación de niobio 3-germanio) *a una temperatura crítica de 23 K*. Comienza la investigación de **Superconductores de Alta Temperatura**.

A principio de los ochenta el químico francés Bernard Raveau sintetizó un compuesto de bismuto-estroncio-cobre-oxígeno. Posteriormente, otros investigadores notaron que al aumentar los planos de cobre-oxígeno de este compuesto aumentaba la temperatura crítica

Entonces, en 1986, ocurrió un gran avance en el campo de la superconductividad. Alex Müller y Georg Bednorz, investigadores en el Laboratorio de Investigación de IBM en Rüschlikon, Suiza, crearon un frágil compuesto cerámico que era superconductor a la mayor temperatura entonces conocida: 30 K. Lo que hace más remarcable este descubrimiento es que las cerámicas son normalmente aislantes, no conducen la corriente eléctrica bien del todo. Por eso los investigadores no las consideraban como posibles candidatas a superconductor de alta temperatura (SAT). **El compuesto de lantano, bario, cobre y oxígeno** que Müller y Bednorz sintetizaron se comportaba de una forma no comprensible todavía. El descubrimiento del primero de los óxidos de cobre superconductores les valió a ambos un Premio Nobel el año siguiente. Más tarde se encontró que pequeñas cantidades de este material son superconductoras a 58 K, debido a que una pequeña cantidad de plomo había sido añadida como un estándar de calibración, haciendo el descubrimiento todavía más significativo

El descubrimiento de Müller y Bednorz desencadenó una gran actividad en el campo de la superconductividad. Investigadores de todo el mundo empezaron a “crear” cerámicas de cualquier combinación imaginable en una búsqueda de temperaturas críticas cada vez

mayores. En enero de 1987 un equipo de investigación de la Universidad de Alabama-Huntsville substituyó por itrio el lantano en la molécula de Müller y Bednorz y obtuvo una increíble T_c de 90 K. Por vez primera se había hallado un material (conocido como **YBCO**) que presentaba su estado superconductor a temperaturas mayores que la del nitrógeno líquido (usado frecuentemente como refrigerante). Se consiguieron otros hitos importantes usando elementos exóticos (y frecuentemente tóxicos) en cerámicas basadas en perowskita. La clase de cerámicas superconductoras de mayor temperatura de transición actualmente es la de los superconductores con mercurio. La primera síntesis de uno de estos compuestos fue obtenida en 1993 por el Doctor Ulker Onbasli de la Universidad de Colorado y por el equipo de A. Schilling, M.Canton, J.D. Guo y H.R. Ott de Zúrich, Suiza. El récord mundial de $T_c = 138$ K lo tiene actualmente un compuesto de mercurio dopado con talio que comprende mercurio, talio, bario, calcio, cobre y oxígeno. La temperatura crítica de esta cerámica superconductora fue confirmada por el Doctor Ron Goldfarb en el Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología de Colorado en febrero de 1994. Bajo presiones extremas su T_c puede ser aumentada aún más, aproximadamente 25 ó 30 grados a 300.000 atmósferas.

Los nuevos compuestos cerámicos de alta temperatura crítica tienen una estructura cristalina del tipo de la perowskitas. Estos compuestos tienen deficiencia de oxígenos (aniones) y esta deficiencia les da las propiedades superconductoras.

Aunque no ha habido avances significativos en la temperatura crítica de los superconductores en los últimos años, se han hecho otros descubrimientos de igual importancia. En 1997 se descubrió que a una temperatura muy cercana a la del Cero Absoluto, una aleación de oro e indio era tanto un superconductor como un imán natural. La creencia habitual era que un material con tales propiedades no existiría. Desde entonces, más de media docena de compuestos de esta naturaleza han sido hallados. Recientemente se ha descubierto el superconductor de más alta temperatura que no contiene cobre (año 2000) y el primer superconductor totalmente formado de metal de perowskita (2001).

También en 2001, un material que había permanecido en los laboratorios durante décadas demostró ser un nuevo y sorprendente superconductor. Investigadores japoneses midieron la temperatura de transición del diboruro de magnesio que resultó ser de 39 K (muy por encima de la mayor T_c de cualquier superconductor formado por un solo elemento o por una aleación binaria). Aunque 39 K es todavía inferior a la T_c de los superconductores cerámicos de mayor temperatura crítica, posteriores refinamientos del MgB_2 han abierto la puerta a su uso en aplicaciones industriales. Ensayos de laboratorio han hallado que el MgB_2 podrá superar a los cables de NbTi y de Nb_3Sn en aplicaciones para grandes campos magnéticos como las MRI (Imágenes de Resonancia Magnética). [11]

Los actuales avances en la obtención de superconductores de alta temperatura crítica, hacen que las aplicaciones posibles de éstos sean mucho más amplias, lo que puede llegar a derivar en un uso masivo de estas tecnologías. Estos sorprendentes (y a veces casuales) descubrimientos están obligando a los científicos a revisar continuamente sus teorías y a considerar combinaciones de elementos hasta ahora inimaginadas.

Hoy podemos constatar la importancia del descubrimiento de la Superconductividad que podríamos resumir en:

La corriente eléctrica a un metal esta asociado al movimiento de los electrones por la acción de un campo magnético, en su movimiento, un electrón puede chocar contra un átomo de la red que esta vibrando y toda su energía que tenía antes del choque se transforma en

calor. Por este motivo, cuando por un metal circula una corriente eléctrica, este se va calentando y esto supone una limitación de la máxima corriente que se puede hacer pasar por un cable eléctrico.

En los materiales Superconductores el comportamiento es totalmente diferente, cuando estos materiales se enfrían por debajo de una cierta temperatura llamada Temperatura Crítica, los electrones se agrupan en parejas que se conocen como Pares de Cooper. Esta pareja de electrones se mueve de forma acoplada con la red de átomos pudiendo moverse sin chocar con ellos, por esto no se calientan y no se disipa energía cuando se transporta la corriente eléctrica, con los adelantos que esto conlleva [9].

Durante años, la superconductividad ha prosperado como un campo del esfuerzo científico, llevando a la concesión de varios Premios Nobel en Física. Además ha surgido como una tecnología, contribuyendo a avances en medicina, electrónica, astronomía, transporte y ciencia experimental. Pero, a pesar de todas estas cosas, la superconductividad ha permanecido como un fenómeno poco conocido al margen de la ciencia.

3.1.2. PROPIEDADES Y PROCESO DE FABRICACIÓN DEL Bi- 2212

Muchos de los SAT son materiales laminares cuyas estructuras cristalinas presentan celdas elementales que contienen planos conductores de CuO separados entre sí por capas intermedias de distintos óxidos. Esta estructura laminar es el origen de la anisotropía que se observa en las propiedades de transporte de los SAT (existe gran diferencia entre las características de las direcciones perpendiculares y paralelas a los planos CuO).

Dentro de los SAT, la anisotropía es más importante en el caso de los óxidos superconductores de la familia BSCCO. En ella se pueden diferenciar tres fases con una estequiometría nominal genérica, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+\delta}$ cuyas propiedades superconductoras dependen del número de planos de CuO, n , presentes en la celda unidad. La fase utilizada en la realización de este proyecto es la de $n = 2$; denominada 2212 por la estequiometría de sus cationes: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ($T_c \approx 80 - 95 \text{ K}$). Los hábitos de crecimiento de esta fase hacen que adquiera forma de plaqueta alargada de espesor reducido y fácilmente exfoliable en planos paralelos que contienen las direcciones a y b. Esta habilidad de deformarse de forma plástica bajo esfuerzos paralelos y de desigual crecimiento de los granos, mucho más rápido en los ejes a y b que en el c, facilita la obtención de materiales texturados y el desarrollo con ellos de aplicaciones tecnológicas, como cintas para cables conductores o monolitos texturados para barras de alimentación.

El método de procesado empleado en nuestro caso para la fabricación de los compuestos texturados de BSCCO es el de Fusión Zonal inducida por Láser (FLZ). Como resultado de este proceso de crecimiento se obtienen barras delgadas (hasta 3 - 5 mm de diámetro) de BSCCO texturadas, que a su forma cilíndrica unen una superficie rugosa por el crecimiento de los granos y que les confiere apariencia fibrosa. Eligiendo correctamente los principales parámetros de crecimiento se pueden obtener barras texturadas con un tamaño de grano y una textura bien controlada.

El crecimiento de barras delgadas de BSCCO mayoritarias en la fase 2212 es relativamente simple y da buenas prestaciones incluso a 77 K. Sin embargo, tras su crecimiento, las barras texturadas presentan proporciones bajas de las fases superconductoras 2212 ó 2223. Esto se debe a la distinta cinética de las fases que solidifican, siendo mayor la de las fases secundarias asociadas o incluso la de la fase 2201. Para mejorar el contenido de las fases superconductoras deseadas, aumentar el tamaño de los granos y mejorar su conectividad eléctrica, es necesario tratar térmicamente a temperaturas adecuadas y durante períodos de tiempo prolongados los materiales obtenidos tras el proceso de fusión zonal. Este proceso se denomina recocido. [11]

- Método de Fusión Zonal Inducida por láser (FZL).

A continuación muestro un esquema del proceso de crecimiento de una barra texturada por el método de FZL, ver Fig. 5. Focalizando la radiación de una fuente continua de radiación láser de potencia sobre el extremo de una barra cerámica precursora con la estequiometría adecuada se genera una zona fundida flotante que se mantiene en posición por efecto de la tensión superficial. Empleando un sistema de mecanismos de traslación y rotación de velocidad variable es posible alimentar la zona fundida con el precursor, mientras que por tracción de una siemiente se extrae la barra texturada manteniendo constante el volumen del fundido. Esencialmente la rotación relativa del precursor frente a la semilla permite homogeneizar el volumen del fundido y hace que la interfase de crecimiento sea más plana mientras que la velocidad de extracción de la semilla determina la velocidad de enfriamiento del fundido. El elevado gradiente térmico axial que se crea en la interfase de crecimiento induce la textura del compuesto solidificado. El resultado del proceso son barras cilíndricas delgadas de diámetros que oscilan entre 1 y 3 mm y de longitudes de hasta 15 cm.

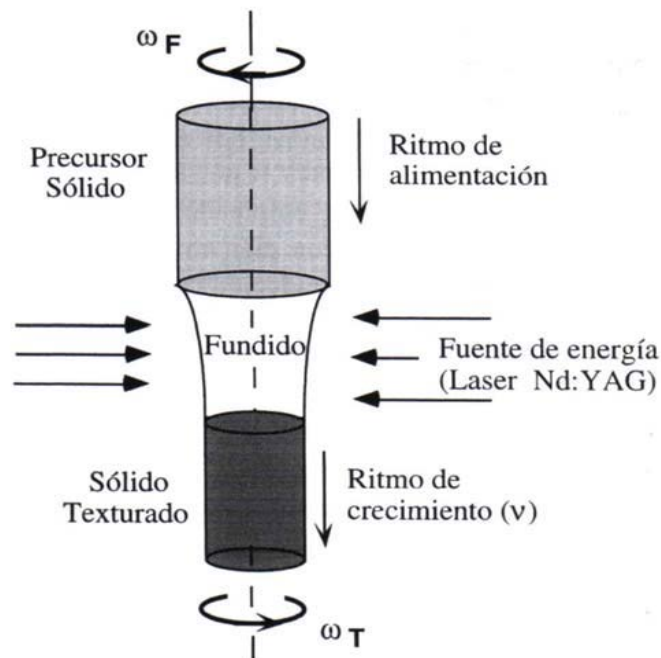


Fig.5 Método de fusión zonal inducida por láser (FZL)

Las dimensiones de los granos y el grado de textura dependen sensiblemente del cociente entre el gradiente térmico en la interfase de solidificación y la velocidad de crecimiento. La radiación láser genera en la interfase de crecimiento un gradiente muy grande, superior a los que se alcanzan con otras fuentes de energía. Esto permite el crecimiento de materiales texturados a ritmos muy diferentes que en nuestro caso varían desde un mínimo de ≈ 5 mm/h, hasta los 70 mm/h.

Las barras crecidas a baja velocidad se caracterizan por su buena textura y tamaños de grano muy grandes. Sin embargo, presenta una gran cantidad de grietas paralelas a los planos a-b, que ocasiona que éstas se exfolien con gran facilidad. Por el contrario, las que se crecen a mayor velocidad tienen una textura menor y granos con dimensiones más pequeñas, pero presentan un mejor comportamiento mecánico frente a la propagación de grietas.

Como se ha mencionado anteriormente, tras el proceso de fusión las barras tienen que ser recocidas en aire a temperaturas entre 840 y 850 °C (inferiores a la de fusión) durante un periodo de tiempo que oscila entre las 12 y las 100 horas.

Cuando la fibra ya está texturada mediante FZL, se debe introducir en el horno para efectuar un recocido para mejorar el contenido de la fase superconductora 2212, aumentar el tamaño de los granos y mejorar la conectividad eléctrica. Antes de este tratamiento se pintan con pintura de plata los lugares en los que se van a colocar los contactos. Esta pintura es conductora y, en el recocido, es absorbida por la fibra mejorando así la conductividad del punto de contacto. Después del recocido la fibra ya está preparada para soldar con estaño los cables que se van a utilizar en la medida.[11]

Fibras de 2 mm de diámetro y temperaturas críticas menores de 77 K (temperatura del nitrógeno líquido) pueden soportar corrientes cuya intensidad alcance los 100 A, sin dejar de ser SAT, que equivale a una densidad de corriente \mathbf{J} de 330 A/mm².

3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO DE CÁTEDRA

Inicialmente se pensó en realizar un experimento que mostrase de forma muy visual y directa la propiedad de resistencia cero, empleando el filamento formado por una combinación de Bismuto, Estroncio, Calcio, Cobre y Oxígeno (Bi₂Sr₂CaCu₂O₈), ver Fig. 6.

Este filamento conectado en serie con una bombilla o led, actuaría como interruptor, evitando el paso de corriente a temperatura ambiente, y como cortocircuito por debajo de su temperatura crítica.

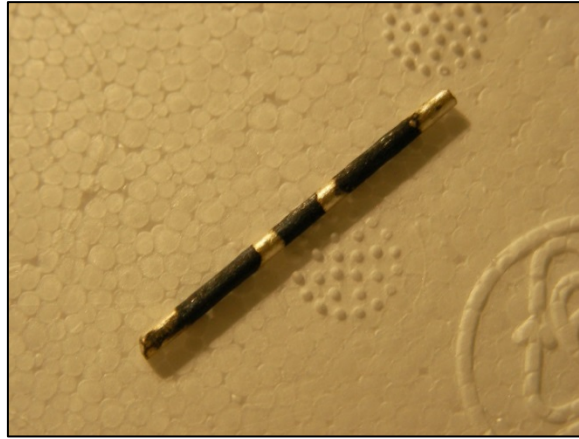


Fig. 6. Filamento de Bismuto, Estroncio, Calcio, Cobre y Oxígeno ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$), cedido por el departamento de Ciencias y Materiales de la Universidad de Zaragoza.

El problema con el que nos encontramos fue el del valor tan bajo de resistencia del filamento a temperatura ambiente, $0,1 \, \Omega$, lo que impedía emplearlo como resistencia limitadora de corriente en un circuito como el propuesto en la Fig. 7. Al emplear leds de alta luminosidad, se debía limitar la corriente eléctrica a un máximo de 30 mA. Conecté una resistencia de $10^3 \, \Omega$, en serie con la batería, con el seccionador de la derecha abierto, circulaba por la rama de la izquierda una corriente de unos 15 mA, encendiéndose el led. Cuando cerraba el seccionador de la derecha, estando el superconductor a temperatura ambiente, se encendían los dos leds. Pero cuando se sustituía el superconductor por un cortocircuito, no se apreciaban efectos importantes en la luminosidad de los leds, que permanecían ambos iluminados, debido a los bajos valores iniciales de diferencia de potencial que aparecen en el superconductor, del orden de 1,5 mV.

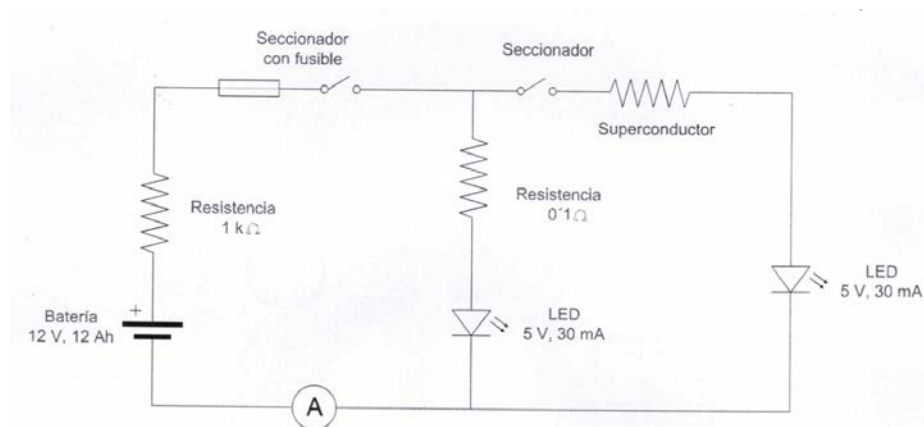


Fig. 7. Esquema circuital inicialmente propuesto.

En ausencia de nitrógeno líquido y para mostrar los experimentos de la forma más sencilla posible, debido a su carácter divulgativo, se podría realizar un simulador. En este caso el filamento de ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$), no forma parte del circuito real, aunque se muestra en el

experimento. En el circuito real es sustituido por dos elementos conectados en paralelo. Uno de ellos es una resistencia de potencia de 35 W y $38\ \Omega$, y el otro es un seccionador de cuchillas monofásico antiguo que actúa como cortocircuito. La resistencia simula el filamento a temperatura ambiente, y el seccionador lo simula cuando se comporta como superconductor. En la Fig. 8 muestro el esquema circuital propuesto para este simulador.

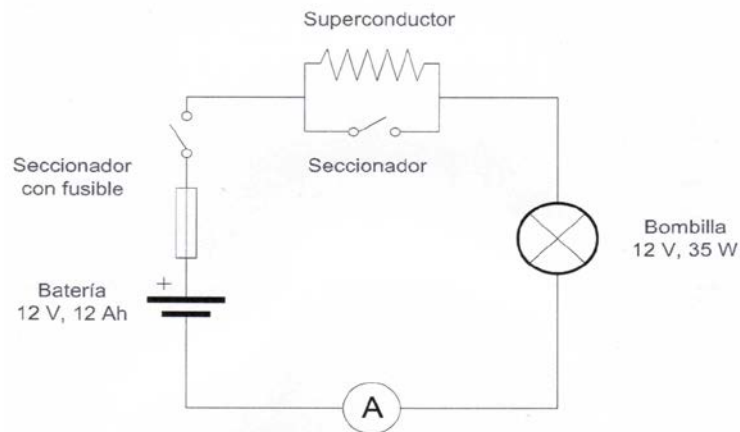


Fig. 8. Esquema circuital del simulador

Escogí como fuente de alimentación una batería electroquímica de 12 V y 12 Ah similar a las empleadas en las práctica de Física II, ya que era la más evidente y sencilla para mostrar. Intercalé un seccionador monofásico de cuchillas antiguo que incorporaba fusible de protección, para la puesta en marcha del experimento y la protección de la batería. He empleado una bombilla de automoción de 12 V, 35 W, con lo que consigo una fuerte diferencia de corrientes entre la situación inicial y final. En la situación inicial o de temperatura ambiente interpongo entre la batería y la bombilla la resistencia de $38\ \Omega$, circulando una corriente de 0,2 A. La situación final, que simula el estado superconductor, la resistencia es sustituida por el seccionador (cortocircuito) circulando una corriente de 5 A.

Para visualizar el cambio en las intensidades de la corriente eléctrica, he intercalado en el circuito un amperímetro de bobina móvil cuyo fondo de escala es de 6 A, ver Fig. 9.



Fig. 9. Plano general del circuito descrito anteriormente

En la Fig. 10 y 11, podemos observar el filamento Superconductor, el contenedor de poliespan que se llenará de Nitrógeno líquido, para enfriarlo por debajo de su Temperatura Crítica y el detalle del protector de latón del material superconductor, fundamental para evitar el contacto directo del filamento y el nitrógeno, evitando así su deterioro.



Fig. 10. Circuito principal con el contenedor de poliespan.

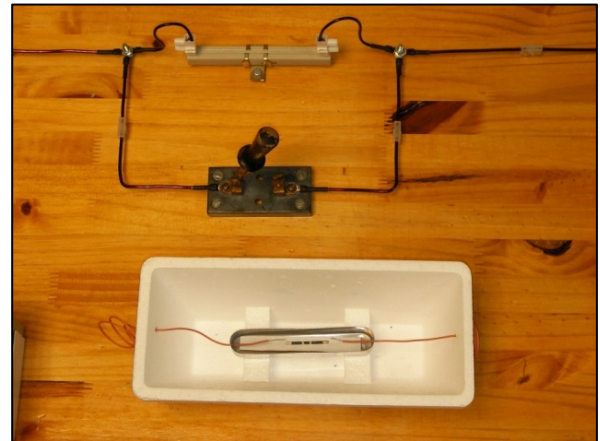


Fig. 11. Detalle del interior de la caja de poliespan con el protector de latón y el filamento Superconductor

Para nuestro experimento vamos a utilizar el circuito de la Fig.12, dónde tenemos dos distintos caminos de la corriente en paralelo. Por uno de ellos obtendremos una lectura en miliamperios (cuando el material es conductor a temperatura ambiente). En el otro tendremos una lectura mayor, en amperios (cuando la fibra se comporte como superconductor).

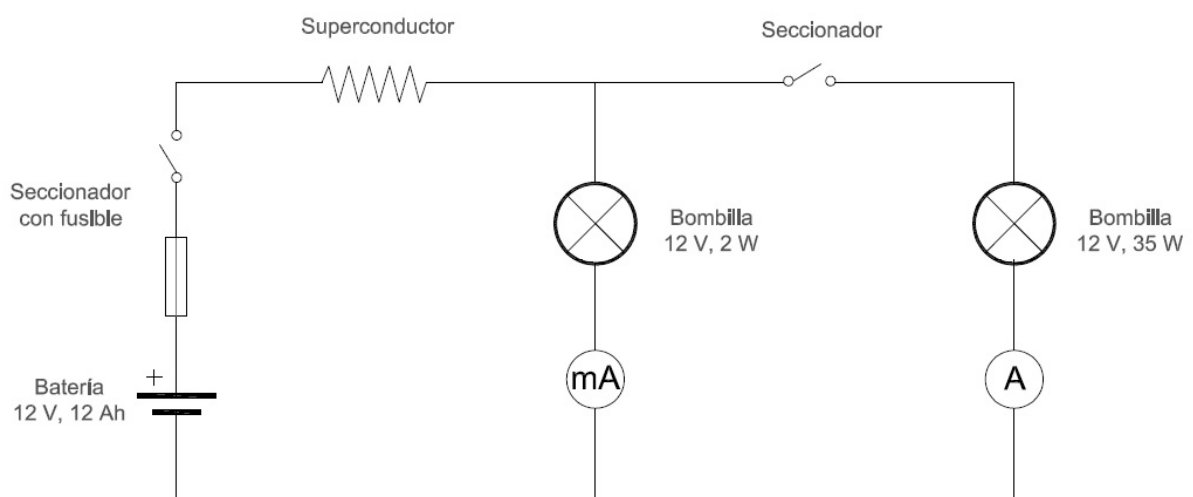


Fig. 12. Circuito para el experimento de resistencia nula de un superconductor

3.1.4. ELEMENTOS EMPLEADOS Y DETALLES TÉCNICOS

- Batería de plomo-ácido 12 Voltios.
- Seccionadores de Cuchillas Monofásicos.
- Cable de Cobre Rígido 2,5 mm.
- Caja Terminales Aislados.
- Resistencia Bobinada $38\ \Omega$ y 35 W.
- Una Fibra conductora formada por una combinación de Bismuto, Estroncio, Calcio, Cobre y Oxígeno ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$). Para que este material se comporte como superconductor es necesario que se encuentre extraordinariamente frío, por debajo de $180\ ^\circ\text{C}$ bajo cero, unos 90 K en la escala absoluta, que es la Temperatura Crítica de este superconductor.
- Nitrógeno líquido cuya temperatura es de $196\ ^\circ\text{C}$ bajo cero, o 77 K en la escala Absoluta, para enfriar nuestra pastilla.
- Contenedor Poliespan, material muy ligero y aislante del calor.
- Caja Metálica dónde introduciremos material superconductor para protegerlo del contacto directo del Nitrógeno líquido y su posible ruptura.
- Bombillas incandescentes de 12 V, una pequeña de 2 W y otra grande de 35 W.
- Dos Amperímetros, para mostrar la medición de la fibra conductora a temperatura ambiente y en una escala de mA y otro para la fibra enfriada actuando como superconductor en escala A.

El coste aproximado de todos elementos, excluyendo la barra superconductora, es de unos 180.- euros.

3.1.5. GUION DEL VIDEO DIVULGATIVO

Locución: “A continuación voy a mostrar el Fenómeno de “Resistencia Nula” que se produce cuando un material conductor se convierte en superconductor y es capaz de permitir el paso de corriente eléctrica sin oponer resistencia”.

Plano Cámara: Plano general del circuito montado.

Locución: “Disponemos de una fina barra formada por una combinación de Bismuto, Estroncio, Calcio, Cobre y Oxígeno ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$). Para que este material se comporte como superconductor es necesario que se encuentre extraordinariamente frío, a unos $180\ ^\circ\text{C}$ bajo cero, o 90 K en la escala absoluta. Para enfriar el material superconductor a esa temperatura emplearemos el Nitrógeno líquido, conservado en este termo o dewar a la temperatura de $196\ ^\circ\text{C}$ bajo cero, o 77 K en la escala absoluta. Dicha barra la tenemos introducida en una pequeña caja de metal para evitar el contacto directo con el nitrógeno líquido. A su vez, la caja se encuentra dentro de un contenedor de poliespan, para evitar derramar el nitrógeno empleado en el experimento y mantener el nitrógeno en su estado líquido.”

Plano Cámara: Muestra la barra y los diversos contenedores necesarios para el experimento.

Locución: “También contamos con el montaje de un pequeño circuito eléctrico que nos va a permitir visualizar el fenómeno de la superconductividad.

Una batería de plomo-ácido de 12 V nos proporcionará la energía eléctrica necesaria y un seccionador de cuchillas monofásicos con fusible hará las veces de interruptor general y protegerá el conjunto de posibles cortocircuitos.

En serie con la batería se encuentra la barra superconductora Bi-2212. En paralelo hay conectadas dos bombillas. La primera es de baja potencia y las variaciones de corriente que circula por ella la observaremos en el amperímetro que se encuentra en serie. La segunda es de alta potencia y la conectaremos empleando el segundo seccionador. La corriente que circule la mediremos con el segundo amperímetro.”

Plano Cámara: La cámara va recorriendo los distintos elementos descritos.

Locución: “Cerramos el interruptor dejando el seccionador simple abierto. A temperatura ambiente el conductor metálico ofrece resistencia al paso de corriente, y esto produce el encendido de la bombilla de 2 W con poca intensidad y una lectura en el amperímetro de unos pocos mA.

Ahora enfriamos el conductor con el nitrógeno líquido vertiéndolo en nuestro contenedor de poliespan.

Cuando la temperatura de la barra sea menor que su temperatura crítica, observamos como la intensidad de la bombilla aumenta, así como la lectura en el amperímetro, debido a la desaparición de la resistencia eléctrica en la barra.

Para demostrar esa ausencia de resistencia y la capacidad casi ilimitada de la barra para transportar la corriente eléctrica, cerramos el segundo seccionador. Observamos en el segundo amperímetro que la corriente que circula por nuestra bombilla está cercana a los 5 A, y atraviesa la barra superconductora.

A medida que la barra se calienta, perderá sus propiedades superconductoras. En esta situación una corriente como la que circula en este momento destruiría la barra por efecto Joule.”

Plano Cámara: La cámara va moviéndose por los distintos elementos y filmando las acciones descritas en la locución, terminando el video con un plano general del circuito.

3.2. LEVITACIÓN POR SUPERCONDUCTIVIDAD

3.2.1. HISTORIA, EXPLICACIÓN E IMPORTANCIA DEL FENÓMENO

En el proceso de Levitación se originan dos fenómenos distintos que vamos a explicar a continuación. Uno de ellos inestable, denominado Efecto Meissner y otro estable, producido por el atrapamiento del campo magnético de un imán dentro de un material superconductor.

- Efecto Meissner

En 1933 los investigadores Walter Meissner y Robert Oschenfeld descubren que el campo magnético se anula completamente en el interior de un material superconductor y que las líneas de campo magnético son expulsadas del interior del material, por lo que este, se comporta como un material diamagnético perfecto, ver Fig.13. Esto se llama El efecto Meissner que es una de las propiedades que definen la superconductividad. Su descubrimiento sirvió para deducir que la aparición de la superconductividad es una transición de fase a un estado diferente.

El material superconductor enfriado por debajo de su Temperatura Crítica tiende a mantener el campo magnético nulo en su interior, si nosotros acercamos un imán a la superficie del superconductor, intentamos cambiar el campo, este reacciona y apantalla el imán debido al efecto Meissner. Esto crea una fuerza repulsiva que aleja el imán del superconductor, si dejamos caer el imán sobre el superconductor, éste sale repelido. [9]

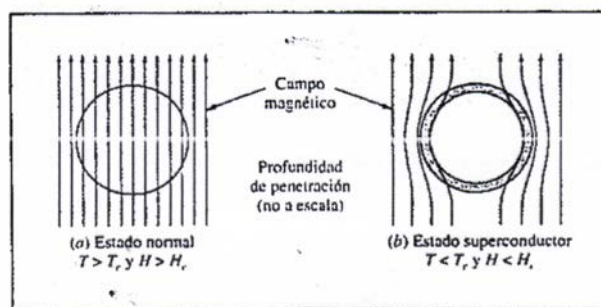


Fig. 13. Efecto Meissner. Cuando la temperatura de un conductor de tipo I se reduce por debajo de su Temperatura Crítica (T_c) y el campo está por debajo del campo magnético crítico (H_c), este campo es apantallado del material. [10]

Los superconductores expulsan el campo magnético independientemente de si éste es aplicado antes o después del enfriamiento, además, los superconductores, a diferencia de un conductor perfecto, apantallan el campo magnético, no sólo sus variaciones

Tanto en el conductor perfecto como en el superconductor, la resistencia eléctrica es nula. En un superconductor además, por el efecto Meissner, el campo magnético en su interior es cero, mientras que en el interior de un conductor perfecto el campo magnético es constante,

pero no necesariamente cero. Hemos de aclarar que en la naturaleza no se han descubierto conductores perfectos.

Para entender más claramente la diferencia entre un conductor perfecto y un superconductor, veamos qué ocurre cuando tratamos de magnetizar un conductor perfecto y un superconductor.

Consideremos primero al conductor perfecto, esto es, pensemos que la transición nos lleva únicamente a un estado de resistencia cero sin el efecto Meissner-Oschenfeld.

En ausencia de campo magnético externo, tomemos la muestra a una temperatura T mayor que la temperatura de transición, T_c al estado de resistencia cero del conductor perfecto, Fig. 14 (a). Luego, enfriemos la muestra a una temperatura $T < T_c$, e introduzcamos un campo magnético, Fig. 14 (b). Como en el instante en que ocurrió la transición al estado de conductor perfecto el campo magnético en el interior de la muestra era cero, permanecerá con ese valor y, por tanto, el campo magnético será excluido del interior de la muestra.

Finalmente, suprimamos el campo magnético aplicado, manteniendo la temperatura por debajo de T_c , Fig. 14 (c). Obtendremos que el campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo cero.

Ahora tomemos la muestra nuevamente a una temperatura $T > T_c$ pero con un campo magnético externo aplicado distinto de cero, Fig. 14 (d). Después, enfriemos la muestra a una temperatura $T < T_c$, Fig. 14 (e). El campo magnético en el interior de la muestra sigue siendo el mismo que había antes de enfriarla. Finalmente, suprimamos el campo magnético aplicado, Fig. 14 (f). Lo que ahora ocurre es que se generan corrientes superficiales en la muestra de tal modo que el campo en el interior de ella tenga el mismo valor que tenía antes de bajar la temperatura a $T < T_c$, ver Fig. 14.

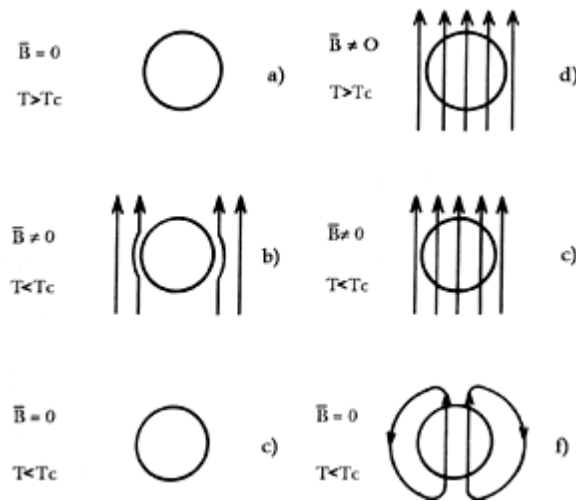


Fig. 14. Campo Magnético en el interior de un conductor perfecto.

Por lo anterior podemos afirmar que si la transición nos llevara simplemente a un conductor perfecto (esto es, a la ausencia del efecto Meissner-Oschenfeld en la transición), el estado de magnetización de la muestra dependerá de la manera en que se alcance el estado final.

Ahora consideremos el caso de un superconductor (es decir, teniendo en cuenta la aparición del efecto Meissner en la transición)

Primeramente, tomemos la muestra a una temperatura $T > T_c$ sin la presencia de un campo magnético aplicado, Fig. 15 (a). Después, enfriemos la muestra hasta $T < T_c$ e introduzcamos un campo magnético, como se indica en la Fig. 15 (b). Por el efecto Meissner-Oschenfeld se inducirán corrientes superficiales en la muestra de manera tal que el campo en su interior sea cero. Posteriormente, suprimamos el campo magnético aplicado, Fig. 15 (c). Las corrientes superficiales desaparecen y el campo magnético en el interior de la muestra es cero.

Intentemos ahora el otro camino. Tomemos la muestra a una temperatura $T > T_c$ en presencia de un campo magnético aplicado, como se ve en la Fig. 15 (d). Después, enfriemos la muestra hasta una temperatura $T < T_c$, Fig. 15 (e). Tendremos que, por el efecto Meissner-Oschenfeld, se inducirán corrientes superficiales en la muestra de manera que el campo en el interior de ella sea cero. Posteriormente, suprimamos el campo externo, figura 15 (f); Tendremos que las corrientes superficiales desaparecen y que el campo magnético en el interior de la muestra vale cero.

Como acabamos de ver, debido al efecto Meissner-Oschenfeld, el estado de magnetización de la muestra no depende de la manera en que se llegue al estado final.

Es claro que un superconductor es, además de un conductor perfecto, una sustancia en un estado en el que se presenta el efecto Meissner-Oschenfeld.

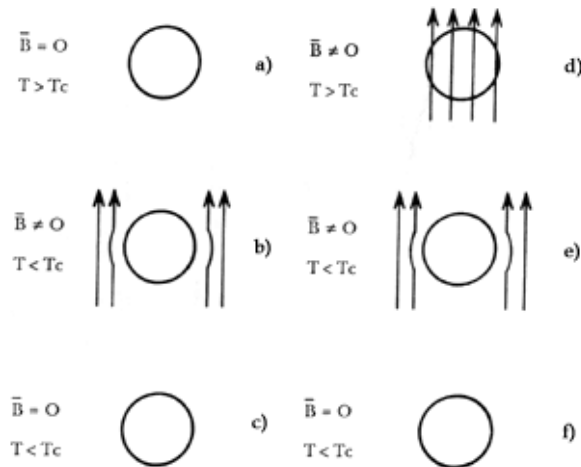


Figura 15: Comportamiento magnético de un superconductor.

Hemos comprobado que un superconductor es un material diamagnético perfecto. Este diamagnetismo se produce por corrientes de apantallamiento: al aplicar un campo magnético se produce una densidad de flujo en el material; las corrientes de apantallamiento crean una densidad de flujo interior igual, y opuesta, con el resultado de que la densidad neta de flujo es cero.

- Superconductores Tipo I y II

En el año 1957, Alexei Abrikosov, estudiando el comportamiento de los superconductores sometidos a campos magnéticos externos, descubrió que era posible diferenciar dos tipos de materiales, los llamados superconductores tipo I y los de tipo II. Por estas contribuciones Abrikosov recibió el premio Nobel de Física en 2003.

La diferencia de energía entre el estado normal y el superconductor implica la existencia de una superficie de energía en la frontera entre las regiones normales y superconductoras. Esta superficie de energía determina el comportamiento del superconductor:

- Tipo I: energía de superficie positiva
- Tipo II: energía de superficie negativa

Su comportamiento vendrá dado por la constante de Ginzburg-Landau $\kappa = \lambda / \xi$, siendo λ la longitud de penetración de London (que determina la extensión espacial de las corrientes de apantallamiento en el superconductor) y ξ la longitud de coherencia (que determina la distancia característica de disminución de la densidad de portadores superconductores en una frontera entre estado normal y superconductor).

Así,

- si $\kappa < 0,71 \Rightarrow$ energía de superficie positiva \Rightarrow Superconductor de tipo I
- si $\kappa > 0,71 \Rightarrow$ energía de superficie negativa \Rightarrow Superconductor de tipo II

Tipo I:

A estos superconductores también se les conoce como superconductores ideales o suaves, tienen varias características en común, como sus altas temperaturas de fusión, ser de fácil obtención en un alto grado de pureza, y suelen ser metales dúctiles. Ejemplos: el plomo, el zinc, el cobre, el estaño etc...

Este tipo de superconductores repelen el campo magnético hasta que éste alcanza un determinado valor, llamado campo magnético crítico, distinto para cada material, a partir del cual el material vuelve a su estado normal, perdiendo sus propiedades superconductoras y presentando resistencia eléctrica.

Del mismo modo sucede con la corriente crítica, ya que, en ausencia de un campo magnético, el estado superconductor puede destruirse aumentando la corriente por encima de un cierto valor crítico. El efecto de la corriente eléctrica y el del campo magnético no son ajenos entre sí, ya que la disminución del valor de T_c con el aumento de la corriente se debe al campo magnético que la corriente produce al circular por el superconductor.

Experimentalmente se encuentra que el valor del campo crítico depende de la temperatura, cayendo de un valor de H_0 , a temperaturas muy bajas, hasta hacerse cero a la temperatura de transición T_c . Los datos experimentales revelan que la variación del campo crítico con la temperatura se puede describir por una parábola: [6]

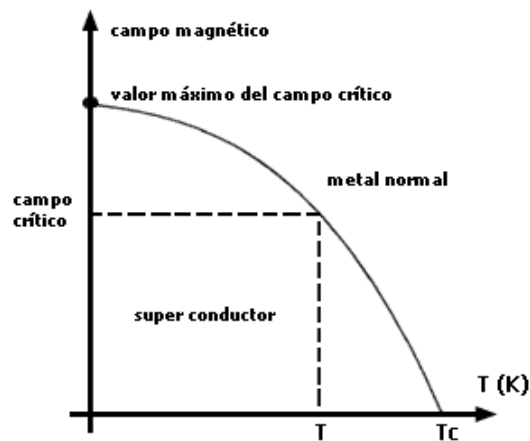


Fig. 19. Campo magnético en función de la temperatura en un superconductor tipo.

Tipo II:

A estos superconductores se les denomina también duros o de campo intenso, porque presentan campos y corrientes críticas muy superiores a los de tipo I, y además, sus propiedades magnéticas son muy diferentes a las que ya hemos analizado en los de tipo I. Suelen ser aleaciones o metales que poseen resistividades grandes en el estado normal. Exhiben las propiedades eléctricas de los superconductores excepto cuando actúa el Efecto Meissner.

Los superconductores de tipo II, a diferencia de los de tipo I, tienen múltiples aplicaciones. Los superconductores de tipo I, debido a la existencia de un campo crítico por encima del cual no presentan características superconductoras, no poseen aplicación en la práctica.

La característica esencial de los superconductores de tipo II es que presentan una energía superficial negativa para fronteras que separan la parte que se encuentra en estado normal de la parte que se encuentra en estado superconductor en el material. Recordemos que la energía superficial es la energía mínima que se necesita para crear una superficie en un material. De esta manera, la inmensa mayoría de los materiales conocidos en la naturaleza tienen una energía superficial positiva, lo que significa que es necesario invertir cierta cantidad de energía para formar una superficie en un material. Por ejemplo, si tenemos un trozo de metal, para crear una nueva superficie en él (por ejemplo partiéndolo) tendremos que invertir cierta cantidad de energía. De este modo queda claro el significado de tener una energía superficial negativa entre una parte en estado normal y otra en estado superconductor. Para un superconductor de tipo II será más conveniente, porque disminuirá su energía total, tener la frontera más grande posible entre su parte en estado normal y su parte en el estado superconductor. Esta circunstancia explica la existencia del llamado estado mixto en los superconductores tipo II.

Es importante distinguir entre el estado intermedio (que se da en los superconductores tipo I) y el estado mixto. Éste es una característica intrínseca de los superconductores tipo II y aparece aunque la forma de la muestra sea tal que lleve a asignarle un valor del factor de desmagnetización igual a cero. Además, la estructura del estado intermedio es relativamente gruesa y puede verse a simple vista. El estado mixto, en cambio, presenta una estructura mucho más fina, con una periodicidad de menos de 10^{-5} cm.

El superconductor en estado mixto está atravesado por finos cilindros de material en estado normal que son paralelos al campo magnético aplicado. Estos cilindros reciben el nombre de núcleos normales, los cuales quedan distribuidos en un arreglo periódico triangular. Al estudiar con detalle la energía libre del estado mixto del superconductor de tipo II, se obtiene que las propiedades del superconductor en el estado mixto varían de una manera periódica con la posición.

Hacia el centro de cada núcleo normal, el número de electrones en el estado superconductor tiende a cero. Aunque existan zonas del material en estado normal, y otras en estado superconductor, el material, como un todo, es diamagnético. El campo magnético aplicado recibe la oposición de un campo magnético generado por corrientes superficiales que circulan alrededor del perímetro de la muestra. Dentro de cada núcleo normal que atraviesa el material hay un flujo magnético que tiene la misma dirección que el flujo del campo aplicado. El flujo, dentro de cada núcleo normal, es generado por un vórtice de corriente persistente que circula alrededor de él, con un sentido de rotación opuesto al de la corriente en el perímetro de la muestra. [11]

Pueden apantallar campos de baja intensidad, pero una vez que alcanzan el valor de Campo Crítico, van dejando que el campo vaya penetrando poco a poco en su interior, esta se realiza en forma de tubos de flujo magnético. Cuando el campo magnético vaya aumentando, estos tubos se acercan hasta que se alcanza un segundo valor de campo magnético en el que se solapan, en esas condiciones, el material deja de ser superconductor.

- Efecto Atrapamiento del Campo Magnético ó Anclaje de Flujo (Flux Pinning)

Cuando un material superconductor de tipo II es sometido a un campo magnético, se originan en su interior los fluxones. Un fluxón es el flujo total generado en cada núcleo normal por la corriente que contiene. También puede interpretarse como un espacio cilíndrico en el superconductor en cuyo interior el campo magnético es muy intenso y se encuentra rodeado de una corriente que rota a su alrededor, en forma de vórtice, y que crea y mantiene el alto campo magnético. Cuando circula corriente eléctrica a lo largo del superconductor, los fluxones son desviados por fuerzas similares a la fuerza de Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$), haciendo que éstos comiencen a moverse. Este mismo movimiento de los fluxones induce un campo eléctrico macroscópico en la dirección de la corriente de transporte ($\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$), donde \mathbf{v} es la velocidad de los fluxones.

Los electrones normales asociados a cada fluxón son movidos por este campo eléctrico ocasionando una disipación de energía, produciendo pérdidas y, en consecuencia, la aparición de resistencia al paso de la corriente eléctrica. La resistividad eléctrica debida al movimiento de los fluxones se denomina resistividad de arrastre de flujo ρ_f .

Es necesario evitar que los fluxones se muevan para que los superconductores alcancen el estado superconductor de no-resistencia. La fuerza que hay que realizar para contrarrestar la fuerza de Lorentz (para detener el flujo de fluxones), se denomina fuerza de anclaje. Estas fuerzas necesitan un punto de apoyo para poder realizar este anclaje. Las inhomogeneidades de la muestra, tales como las dislocaciones, fronteras de grano, vacantes, impurezas..., son ideales para conseguir este anclaje, y se denominan centros de anclaje.

Los centros de anclaje por unidad de volumen deben ejercer la misma fuerza sobre los fluxones que la fuerza de Lorentz, para que éstos no fluyan y pueda circular corriente por el superconductor sin que aparezca resistencia. La densidad de fuerza macroscópica de los centros de anclaje, F_p , se denomina densidad de fuerza de anclaje. La densidad de corriente crítica que un superconductor puede soportar sin volver a su estado normal es $J_c = F_p / B$.

Puede observarse que, para aumentar la densidad de corriente crítica, tendremos que aumentar la fuerza que ejerzan los centros de anclaje.

A modo de verificación experimental de la teoría expuesta anteriormente, se ha realizado el experimento práctico cuya grabación en soporte audiovisual es objeto de mi trabajo.

Un experimento más sencillo se realiza en demostraciones a los estudiantes. Consiste en de una pastilla superconductora a la que hemos colocado encima un imán, separado por una superficie aislante. Inicialmente tenemos una pastilla no superconductora dentro del campo magnético creado por el imán. Enfriamos la pastilla por debajo de su temperatura crítica y la convertimos en material superconductor. Al retirar la lámina aislante, observamos que el imán queda suspendido por encima del material ya superconductor. Esto es debido al efecto memoria como consecuencia del anclaje de flujo, provocando que la pastilla recuerde el campo magnético inicial que tenía cuando no era superconductora. La consecuencia de todo ello es que la pastilla atrapa el campo y cualquier cambio en su posición que modifique o que intente modificar dicho campo magnético provocará la reacción de la pastilla para que el campo magnético permanezca constante en su interior, apareciendo fuerzas que recolocan la pastilla en su posición original.

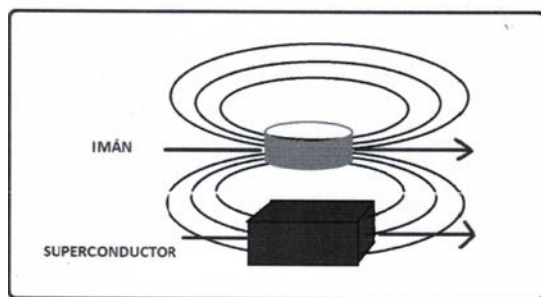


Fig. 17. Atracción entre un imán y un superconductor cuando éste atrapa el campo en su interior. [10]



Fig. 18. Pequeño imán levitando sobre una pastilla superconductora. Imagen procedente de una demostración de cátedra realizada por el Edemuz.

El efecto de memoria origina el enclavamiento de la pastilla superconductora en la posición inicial antes de enfriarse, dando lugar al efecto de levitación. [9]

3.2.2. Propiedades y proceso de fabricación de YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)

El Óxido de itrio bario cobre, a menudo abreviado YBCO, es un compuesto químico cristalino con la fórmula $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Este material, un famoso "superconductor de alta temperatura", alcanzó la prominencia debido a que fue el primer material en el que se logró la superconductividad por encima del punto de ebullición del nitrógeno líquido.

El YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) es fácil de obtener calentando una mezcla de óxido de itrio (Y_2O_3), carbonato de bario (BaCO_3) y óxido de cobre II (CuO), en presencia de una corriente de oxígeno (O_2). Las propiedades superconductoras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ son sensibles al valor de x , su contenido de oxígeno.

Se pueden hacer variaciones de la fórmula de YBCO, sustituyendo el itrio por cualquier lantánido (especialmente el disprosio) y otros elementos de tierras raras.

Además de ser sensibles a la estequiometría de oxígeno, las propiedades de YBCO están influenciados por los métodos de cristalización utilizadas. Es un material cristalino, y las mejores propiedades superconductoras se obtienen cuando los límites de grano de cristal están alineados mediante el control cuidadoso de recocido y enfriamiento rápido.

Los materiales superconductores compuestos por Nb y Ti son ampliamente utilizados en medicina (RMN, SQUID), en el transporte de corriente (limitadores de corriente, cables), en el confinamiento magnético (ITER), etc.

Estos materiales pueden ser conformados tanto en forma másica como en forma de capas delgadas o cintas. Durante los últimos años los materiales superconductores se han mecanizado en forma de cintas superconductoras y arrolladas como bobinas. Estas últimas, presentan muchos problemas durante el proceso de manufacturado, debido a que el desconocimiento de algunas propiedades mecánicas tales como el límite elástico, la tensión a cizalla o el radio máximo de curvatura del material puede propiciar la generación de tensiones o microgrietas durante el proceso de conformación.

Los materiales másicos superconductores de YBCO, pueden obtenerse mediante la técnica de crecimiento inducido por semilla (*Top-seeded-melt-growth*, *TSMG*). Estos materiales másicos, para ser funcionales, deben presentar una dispersión de finas partículas aislantes, (en nuestro caso de Y_2BaCuO_5 , Y-211) heterogéneamente distribuidas en el interior de la matriz superconductora (Y-123). El tamaño promedio de estas partículas, suele fluctuar entre 1-5 nm [1], dependiendo de la técnica de conformado utilizada.

YBCO, junto con superconductores basados en el diboruro de magnesio (MgB_2) y en el óxido de bismuto-estroncio-calcio-cobre (BSCCO), supondrán en 2017 un mercado de 370 millones de dólares, frente a los 12,3 de 2012. La aplicación tecnológica más importante de estos componentes a corto plazo, mayor incluso que la fabricación de cables, es la de limitadores de corrientes para la protección de equipos eléctricos (SFCL \equiv superconductive fault current limiters).

3.2.3. LEVITACIÓN MAGNÉTICA

La levitación magnética (MAGLEV) es una aplicación en la que los superconductores se comportan extremadamente bien. Tanto los trenes como otros vehículos de transporte pueden “flotar” sobre potentes imanes, eliminando el rozamiento entre el tren y las vías. Los imanes convencionales malgastan la mayor parte de la energía eléctrica en forma de calor, y necesitan ser mucho más grandes que los imanes superconductores. Un gran paso para el uso comercial de la tecnología Maglev se dio en 1990, cuando se convirtió en un proyecto financiado a nivel estatal en Japón. El Ministro de Transporte autorizó la construcción de la línea de pruebas de Maglev en Yamanashi, que se abrió el 3 de Abril de 1997. En Diciembre de 2003, el vehículo de pruebas MLX01 alcanzó una increíble velocidad de 581 km/h.

Aunque la tecnología está actualmente probada, el uso más amplio de vehículos Maglev ha sido restringido por asuntos políticos y medioambientales (los fuertes campos magnéticos pueden constituir un riesgo biológico). El primer tren Maglev en entrar en servicio comercialmente, una lanzadera en Birmingham, Inglaterra, cerró en 1997 después de funcionar durante 11 años.

Un tren Maglev alemán (construido por un consorcio de las firmas Thyssenkrupp, Siemens y el gobierno alemán) está actualmente operativo desde 2002 en un recorrido de más de 30 km entre el Aeropuerto Internacional Pudong de Shanghai (China) y la propia ciudad de Shanghai. Con una velocidad punta de 400 km/h, tarda 8 minutos en realizar el trayecto hasta el centro de la ciudad, mientras que el viaje en automóvil se puede demorar más de una hora.

Quiero citar como ejemplo un prototipo de transporte alemán basado en la levitación por anclaje de flujo, que utiliza pastillas SAT de YBCO, y cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el que explico en el audiovisual de mi proyecto.



Fig. 18. *Supratrans: prototipo de transporte alemán basado en la levitación por atrapamiento de flujo de pastillas SAT de Y-123 sobre imanes de Nd-Fe-B. Para transportes cortos como en aeropuertos. [14]*

El principal problema de esta tecnología es el elevado precio, que hace dudosa la rentabilidad de las líneas de trenes de levitación magnética. Sin embargo, su menor ruido, la flexibilidad en su trazado (pueden ascender por rampas de hasta el 10 % de pendiente y dar curvas mucho más cerradas que los trenes convencionales), la seguridad y la baja

contaminación, hacen que la tecnología MAGLEV sea una de las aplicaciones con más futuro de los materiales superconductores.

3.2.4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO DE CÁTEDRA

Para la realización de este experimento, he partido de un carril ya construido y que se ha utilizado en muchas ocasiones ante los estudiantes para mostrar el efecto de levitación. Este carril se realizó como trabajo de curso por estudiantes del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y específicamente en la asignatura de Electricidad y Electromagnetismo.

En mi proyecto lo que he realizado ha sido limpiarlo, arreglar distintos desperfectos e introducir mejoras.

El carril consta de dos capas superpuestas de imanes permanentes de neodimio-boro, ver Fig. 14, con un total de 180 imanes por capa de dimensiones 9x30 mm. y 2mm. de espesor. Tiene una dimensión de 100 mm. de longitud y puede girar 360° grados sobre sí mismo, para poder mostrar el enclavamiento de la pastilla superconductora en el campo magnético formado por los imanes. La parte inferior del carril está constituido por láminas de poliespan para protegerlo de posibles derramamientos de nitrógeno líquido, el cual emplearemos para enfriar la pastilla superconductora, ver Fig. 15.



Fig. 14. Detalle de los imanes que forman el carril.

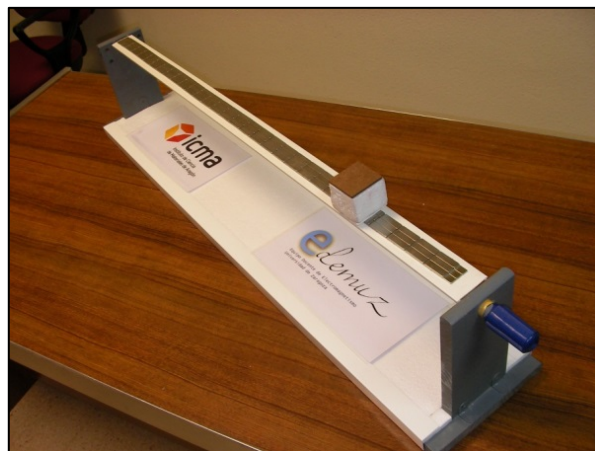


Fig. 15. Carril de Imanes Permanentes

También vamos a contar con una caja de poliespan cuadrada, material ligero y aislante que simulará el vehículo que se desplaza a lo largo del carril, la cual he mejorado, haciéndola estanca con teflón y silicona, evitando que cuando giramos el carril el nitrógeno líquido salga de la misma, ver Fig.16.

Dentro de la caja va incorporada la pastilla superconductora, formada por una combinación de Ytrio, Bario, Cobre y Oxígeno ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), diámetro 20 mm. y espesor 4mm. Para que este material se comporte como superconductor es necesario que se encuentre extraordinariamente frío, por debajo de 180 °C bajo cero, unos 90 K en la escala absoluta, que es la Temperatura Crítica de este superconductor. Para enfriar la pastilla a esa temperatura

emplearemos el Nitrógeno líquido cuya temperatura es de 196 °C bajo cero, o 77 K en la escala absoluta, ver Fig.17.



Fig. 16. Caja de poliespan, simulará el vehículo por el carril de imanes.

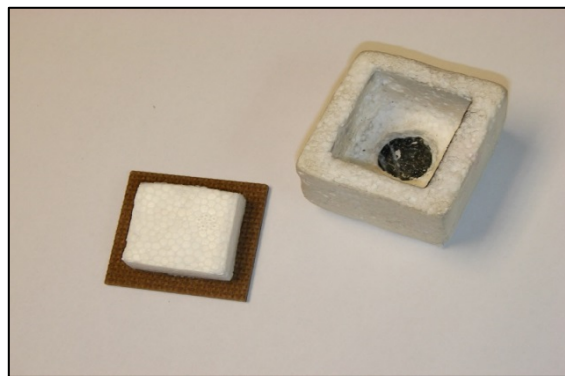


Fig. 17. Detalle Caja de poliespan con pastilla superconductora incorporada.

3.2.5. ELEMENTOS EMPLEADOS Y DETALLES TÉCNICOS

- Imanes permanentes de neodimio-boro, conocidos también como imanes de tierras raras.
- Una pastilla formada por una combinación de Ytrio, Bario, Cobre y Oxígeno ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Para que este material se comporte como superconductor es necesario que se encuentre extraordinariamente frío, **por debajo de 180 °C bajo cero, unos 90 K en la escala absoluta, que es la Temperatura Crítica de este superconductor.**
- Nitrógeno líquido cuya temperatura es de 196 °C bajo cero, o 77 K en la escala absoluta, para enfriar nuestra pastilla.
- Contenedor Poliespan, material muy ligero y aislante del calor.
- Siete brújulas de pequeño tamaño.

El coste aproximado de todos los elementos, excluyendo la pastilla superconductora, es de unos 250.- euros.

3.2.6. GUION DEL VIDEO DIVULGATIVO

Vamos a dividir el video en dos partes, en la primera hacemos una descripción de los distintos elementos que vamos a utilizar, damos algunos datos técnicos necesarios y colocamos el vehículo sobre el carril, entonces procedemos a verter el nitrógeno líquido dentro de la caja de poliespan para enfriar la pastilla.

Debemos dejar que el material alcance su temperatura crítica y se convierta en superconductor, en ese momento retomamos la filmación para realizar la segunda parte.

Ahora procedemos a explicar científicamente las causas y efectos que se producen en el efecto de Levitación.

Primera parte del video

Locución: “A continuación les voy a mostrar un experimento de Superconductividad que podría aplicarse al transporte de personas y mercancías.”

Plano Cámara: Vista general del carril y entorno.

Locución: “Disponemos de un carril de un metro de longitud, constituido por dos capas superpuestas de imanes permanentes de neodimio-boro, conocidos también como imanes de tierras raras.”

Plano Cámara: Acercamos Plano para comprobar imanes.

Locución: “Cada capa está constituida de 3 hileras de imanes con un total de 180 por capa. Los imanes se orientan alternando polo norte y polo sur, dando origen a un campo magnético que se extiende en toda la longitud del carril.”

Plano Cámara: Plano de las dos capas superpuestas de los imanes, para comprobar la orientación de los imanes tenemos un grupo de 7 brújulas pequeñas. Las pasamos transversalmente al campo formado por los imanes y éstas cambian su orientación, no así si las movemos longitudinalmente al campo.

Locución: “Contamos también con una pastilla formada por una combinación de Ytrio, Bario, Cobre y Oxígeno ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Para que este material se comporte como superconductor es necesario que se encuentre extraordinariamente frío, por debajo de 180 °C bajo cero, unos 90 K en la escala absoluta, que es la Temperatura Crítica de este superconductor. Para enfriar la pastilla a esa temperatura emplearemos el Nitrógeno líquido cuya temperatura es de 196 °C bajo cero, o 77 K en la escala absoluta.”

Plano Cámara: Plano de cámara enseñas la pastilla y el contenedor de Nitrógeno líquido.

Locución: “La pastilla se encuentra ya insertada en la base de una pequeña caja de poliespan, material muy ligero y aislante del calor, que simula el vehículo que se desplazará a lo largo del carril. Situamos la caja sobre los imanes permanentes, intercalando entre las dos superficies de contacto una pequeña lámina aislante de separación. En este instante la pastilla no está en estado superconductor y se encuentra en el interior del campo magnético creado por los imanes permanentes. Cuando esa pastilla se enfríe a la temperatura del nitrógeno líquido, pasará a comportarse como material superconductor.”

Plano Cámara: Enseñamos caja de poliespan, lámina aislante y procedemos a colocar todo el conjunto sobre el carril de imanes. Llenamos de Nitrógeno líquido el vehículo, la cámara filma todo el proceso de llenado, el burbujeo del nitrógeno y procedo a tapar la caja. Termina la primera parte.

Segunda parte del video

Hemos esperado un tiempo necesario para que la pastilla se enfríe por debajo de su temperatura crítica y se convierta en material superconductor.

Locución: “Al retirar la lámina aislante y separadora entre los imanes y nuestro vehículo, observamos que la pastilla, ya superconductora, está suspendida sobre el carril. Esto es debido a un efecto de memoria, que consiste en que la pastilla recuerda el campo magnético inicial que tenía cuando no era superconductora. El efecto es que la pastilla atrapa el campo y cualquier cambio en su posición que modifique o que intente modificar dicho campo magnético provocará la reacción de la pastilla para que el campo magnético permanezca constante en su interior, apareciendo fuerzas que recolocan la pastilla en su posición original.”

Plano Cámara: Plano de cámara muy cerca visualizando la retirada de la lámina aislante y la caja suspendida sobre el carril.

Locución: “El efecto de memoria origina el enclavamiento de la pastilla superconductora en la posición inicial antes de enfriarse, dando lugar al efecto de levitación.”

Plano Cámara: Procedo a mover el vehículo transversalmente al campo con la pastilla ya superconductora y esta vuelve a su posición inicial.

Locución: “Esto ocurre en todas las direcciones, excepto en la dirección del carril, porque en esa dirección el campo permanece constante esto lo comprobamos dando un pequeño impulso a nuestra caja, la cual se desplazará sin rozamiento a lo largo del carril.”

Plano Cámara: Doy un pequeño empujón a la caja, la cámara sigue a la caja a lo largo del carril

Locución: “Si ahora giramos 90° grados el carril, comprobamos de nuevo el fenómeno de atrapamiento del campo magnético de nuestro material superconductor. Si seguimos girando el carril, podemos situar la caja boca abajo, apreciando mejor este fenómeno. Cuando el nitrógeno se evapora, la pastilla superconductora se va calentando, y cuando supera su Temperatura Crítica de 180 °C bajo cero, el efecto de superconductividad desaparece y la caja cae sin ningún tipo de resistencia.”

Plano Cámara: Transcurridos unos segundos, giro el carril 90° grados, seguidamente 180° grados, la cámara recoge todo este proceso, hasta que el vehículo se precipita al suelo. Fin de la segunda parte y del video.

4. CONCLUSIONES.

Durante la realización de este trabajo he realizado un breve resumen de las propiedades y de la historia de los materiales superconductores como base teórica para mis discursos en la realización de los audiovisuales.

He construido una maqueta-demostrador para visualizar el efecto más conocido y sencillo de entender asociado a la superconductividad, el de la resistencia cero. He intentado que fuese muy sencilla y a su vez estéticamente agradable, para lo que busqué elementos eléctricos antiguos y una disposición espacial clara y ordenada.

También he mejorado la maqueta empleada en la demostración de la levitación por enclavamiento magnético, ocupándome, entre otras labores, de buscar contenedores alternativos para incorporar la pastilla de YBCO junto con el nitrógeno líquido

El resultado son dos audiovisuales en castellano que pueden resultar herramientas muy útiles tanto para la docencia en cualquier nivel de la enseñanza de la física y la tecnología, como en actividades de divulgación científica.

5. BILIOGRAFÍA.

- [1] www.ph.utexas.edu/~phy-demo/resources/resources.html
- [2] tsgphysics.mit.edu/front/index.php?page=list.php&letter=G
- [3] A. Usón, J.S. Artal, J. Mur, J. Letosa, M. Samplón. “Incorporación de experimentos en las clases teóricas de electromagnetismo” XI Congreso Universitario de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CUIEET'03). Escola Universitaria Politécnica de Vilanova i la Geltru. Julio 2003. ISSN/ISBN: 84-688-2216-7.
- [4] www2.physics.ox.ac.uk/accelerate/resources/demonstrations/superconductivity
- [5] www.youtube.com/user/edemuz
- [6] www.facebook.com/pages/Edemuz/112933328772022
- [7] www.unizar.es/icee04/innovadoc/index.htm#page=page-1
- [8] Fanlo Burriel, G. “Estudio de métodos de recubrimiento de láminas con material superconductor Bi-2212”. Proyecto Final de Carrera. Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Industriales. Universidad de Zaragoza.
- [9] I.C.M.A. Nuevos Materiales para la sociedad.
- [10] www.magnetismo.es
- [11] Diego Sánchez Estevan “Medidor de nivel de nitrógeno líquido mediante superconductores”. Proyecto Final de Carrera. Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Industriales. Universidad de Zaragoza.
- [12] http://centrodeartigo.com/articulos-informativos/article_69563.html
- [13] C. Lebigond-Harnois, R. Caillard, I. Monot-Laffez, G. Desgardin and B. Raveau. “Texturing process, superconducting and mechanical properties of Ag-doped top-seeded meltgrown”. Physica C 341-348 (2000) pp. 2439-2440
- [14] www.supratrans.de