



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Profesional Culhuacán
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

INVESTIGACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD Y SUS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

Tesis que para obtener el grado de
Maestra en Ciencias de Ingeniería en Sistemas Energéticos

P R E S E N T A

ING. ANA DULCE CONSUELO IBARRA VELAZQUEZ

Asesores: M.C. Iryna Ponomaryova
Dr. Florencio Sánchez Silva



México D.F. Enero del 2011

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por ser mi casa de estudios y por el apoyo económico.

A CONACyT por el apoyo económico.

A mis asesores, M.C. Iryna Ponomaryova y Dr. Florencio Sánchez por su confianza y guía.

A grupo CRYOINFRA por la donación del Nitrógeno líquido necesario para la experimentación, así como por la valiosa asesoría técnica especializada.

Al Dr. Rafael Baqueropor sus amenas pláticas sobre la física de los superconductores y por el material que tan amablemente me compartió.

Al personal del laboratorio de física de la ESIME Culhuacan por apoyarnos con las instalaciones y el equipo para el desarrollo experimental.

A mi hijo, Cesar Ortiz por darme la principal razón para continuar.

A mi familia, por tenerme paciencia y ser un apoyo fundamental.

A ti, Lalo.

A los amigos y profesores que compartieron estos años conmigo.

Y principalmente, agradezco a Dios que permitió llegara este momento.

ÍNDICE

NOMENCLATURA.....	i
RESÚMEN.....	ii
ABSTRACT	iii
INTRODUCCIÓN.....	iv

CAPÍTULO 1

SUPERCONDUCTORES

1.1	Concepto	2
1.2	Desarrollo histórico.....	2
1.3	Clasificación	6
1.3.1	Superconductores tipo I y tipo II	6
1.3.1	Superconductores según su temperatura crítica.....	9
1.4	Efectos en la superconductividad.....	10

CAPÍTULO 2

APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

2.1	Aplicaciones en electrónica	17
2.1.1	Películas delgadas.....	17
2.1.2	Uniones de Josephson.....	21
2.1.3	SQUID	22
2.2	Aplicaciones de grandes longitudes.....	25
2.2.1	Cables y sistemas eléctricos	25
2.2.2	Generación de energía	30
2.2.3	Grandes campos magnéticos	33
2.2.4	Levitación magnética.....	37
2.3	Manufactura de superconductores de alta T_C	45

CAPÍTULO 3

LEVITACIÓN MAGNÉTICA

3.1	Concepto de levitación magnética	49
3.2	Modelo matemático del sistema magnético: Anillo superconductor–Imán permanente	51
3.3	Experimentos precedentes	55

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1	Instalación experimental	58
4.1.1	Ambiente criogénico.....	59
4.1.2	Piezas superconductoras e imanes	61
4.2	Desarrollo experimental.....	62
4.2.1	Mediciones estáticas durante el periodo de transición	62
4.2.2	Mediciones en función de la distancia.....	63
4.3	Notas sobre los superconductores	69
CONCLUSIONES.....		72
BIBLIOGRAFÍA.....		73
APÉNDICE A: TABLA PERIODICA DE LOS ELEMENTOS		75
APÉNDICE B: MEDICIONES EXPERIMENTALES		76
APÉNDICE C: PUBLICACIONES		79

NOMENCLATURA

R	resistencia [Ω]
T	temperatura [K]
T_C	temperatura crítica [K]
J	densidad de corriente [A/cm^2]
J_C	densidad de corriente crítica [A/cm^2]
H	campo magnético [A/m]
H_C	campo magnético crítico [A/m]
B	inducción magnética [T]
λ_L	profundidad de penetración de London [Å]
ξ	Longitud de cohesión [Å]
CA	corriente alterna
CD	corriente directa
FEM	fuerza electromotriz
N_L	nitrógeno líquido
I	corriente eléctrica [A]
ϕ	flujo toral que va del polo N al S
C	número de conductores conectados en serie
S	velocidad [rpm]
	[MVA]
c	velocidad de la luz [3×10^8 m/s]
HTSC	superconductores de alta temperatura (High Temperature Superconductors)
L	inductancia [H]
L_0	inductancia interna [H]
W	energía magnética
d	diámetro del conductor
Ψ	flujo magnético superficial
m	masa de la partícula [kg]
q	carga de la partícula [C]
V	velocidad de la partícula [m/s]
μ_0	permeabilidad magnética del vacío [H/m]
Ψ	es el flujo magnético
d l	es el elemento del arco del anillo superconductor [m],
ϵ_0	es la permisividad dieléctrica del vacío [F/m]
a	radio del anillo [m]
r	radio de la trayectoria circular de la partícula
X	distancia entre el imán permanente y la bobina superconductor
D	distancia entre el superconductor y los sensores de medición
	\vec{R} [m] es la distancia del punto de observación donde se aplica $d\vec{l}$ del anillo superconductor hasta el punto de localización de la carga,
	\vec{V}' [m/s] es la velocidad de la partícula que se determina en el instante t' ,
	\vec{R}' [m] es la distancia del punto de observación donde se aplica $d\vec{l}$ del anillo superconductor hasta el punto de localización de la carga que se determina en el instante t' ,

RESÚMEN

El objetivo principal de esta tesis es dar evidencia de la relevancia de las aplicaciones potenciales de los materiales superconductores. Además, se explican de una forma teórica y experimental los principios de la fenomenología de la superconductividad. Se sientan de esta manera las bases para una nueva línea de investigación en el área de Sistemas Energéticos.

En el primer capítulo se hace una recolección de los datos más importantes en la historia de los superconductores: su descubrimiento de forma experimental, su largo estudio teórico que llevó, después de medio siglo, a la comprensión de su comportamiento, la revolución causada por el descubrimiento de los superconductores de tipo II y el camino a los nuevos materiales que presentan este estado a temperatura ambiente. También se presentan de forma teórica los conceptos básicos referentes a los materiales superconductores, para tener una comprensión adecuada de los temas desarrollados posteriormente.

Mediante una extenuante búsqueda en referencias bibliográficas, se presentan en el segundo capítulo las formas más viables de aplicación de los superconductores. Se plantea que existen muchos desarrollos tecnológicos que usan los materiales superconductores como principio básico de funcionamiento, ya que los efectos que presentan serían imposibles de encontrar en otros materiales. El propósito de divulgarlos se cumple en la medida de la extensión del escrito, eligiendo de entre todas las aplicaciones posibles, las más representativas por el desarrollo tecnológico que implican, en un marco de cuidado al medio ambiente.

El capítulo tres está destinado a reunir los trabajos teóricos y modelos matemáticos que se tienen como precedente en sistemas levitatorios autoestables. Se da vital importancia al efecto Pozo de Potencial Magnético (MPW por sus siglas en inglés) como la región óptima de levitación para un sistema de varios elementos en interacción magnética. En base a este efecto se presenta el comportamiento de una carga eléctrica en levitación en un anillo superconductor, su evolución en el caso de varias cargas y el sistema de interacción de dos anillo superconductores.

El último capítulo presenta el desarrollo del experimento de levitación, que se llevó a cabo con superconductores de alta temperatura enfriados con nitrógeno líquido, sosteniendo sobre sí un imán permanente de neodimio. Se llevan a cabo mediciones de fuerza magnética e inducción magnética, ambas en función de la distancia de separación entre los elementos del arreglo. Ya que para la maestría en cuestión son experimentos pioneros, se describe detalladamente el proceso de diseño del experimento. Se presenta un análisis de los datos obtenidos en experimentación, comprobando la presencia del efecto MPW y arrojando nuevos datos acerca del comportamiento de la inducción en función de la distancia.

El efecto MPW da las bases para crear sistemas superconductores autoestables. Ya que se tiene la teoría y la posibilidad de hacer los arreglos experimentales, se puede proceder a diseñar el modelo teórico y el prototipo de un generador superconductor, así como otras formas de aplicación de los superconductores en materia de generación y almacenamiento de energía. Este primer trabajo de investigación en materiales superconductores da la entrada a una nueva línea de investigación en la Maestría de Sistemas Energéticos.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to provide relevant evidence of the potential applications of superconducting materials. Furthermore, it is explained, in a theoretical and experimental form, the principles of superconductivity's phenomenology. In this way, the foundations of a new line of research in the area of Energy Systems are given.

The first chapter contains a collection of the most important details in the history of superconductors: their experimental discovery, their long theoretical study that led, after half century, to understand their behavior), the revolution caused by the discovery of type II superconductors and the way to the new materials that exhibit this state at room temperature. It is also presented in a theoretical way the basic concepts related to superconducting materials for a proper understanding of the issues developed later.

Through a strenuous search in references, are presented in the second chapter the most viable applications of superconductors. It is established the existence of many technological developments that use superconducting materials as a basic principle of operation, since the effects that occur, would be impossible to find in another materials. The purpose of disclose it is fulfilled with the restriction of the writing longness, choosing from all possible applications, the most representative because of the technological development that involve, in the framework of environmental care.

Chapter three is designed to meet the theoretical and mathematical models that are the precedent in self-control systems. It is given vital importance to the Magnetic Potential Well effect (MPW) as the optimal region of levitation for a system of several elements in magnetic interaction. Based on this effect, it is presented the behavior of an electric charged particle levitating on a superconducting ring, its development in the case of multiple particles and the system of interaction between two superconducting rings.

The final chapter presents the development of the levitation experiment, which was done with high-temperature superconductors cooled with liquid nitrogen, holding on a neodymium permanent magnet. Measurements of magnetic force and magnetic induction are carried on in terms of the separation between the system elements. Since these experiments are pioneering in the Master, it is described in detail the experiment design process. It is presented an analysis of experimental data, proving the presence of MPW and giving new data about the induction behavior depending on the distance.

MPW effect provides the basis to create superconducting self-control systems. Since it is had the theory knowledge and the possibility of make the experimental arrangements, it is possible to proceed to design the theoretical model and the prototype of a superconducting generator as well as other forms of application of superconductors in generation and energy storage. This first research in superconducting materials leads into a new line of research on the Master of Energy Systems.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de materiales que presenten propiedades superconductoras a temperatura ambiente y el desarrollo de las aplicaciones que se les puedan dar, han hecho que estos materiales se encuentren en la mira de centros de investigación y laboratorios universitarios alrededor del mundo, ya sea en competencia o colaboración por el desarrollo tecnológico.

A la fecha, en Europa se trabaja en redes de investigación conformadas por más de ochenta laboratorios universitarios en varios países, que buscan beneficiarse mutuamente de los adelantos que dentro de la red se puedan lograr, y un panorama similar se encuentra en Estados Unidos y Japón.

Si hay tanta inversión en el desarrollo de estas áreas en países con alto crecimiento tecnológico, es porque se ha podido concientizar a la sociedad y a los medios científicos de la necesidad de buscar formas alternas de energía. Hay estimaciones de que utilizando superconductores en la generación y distribución de energía, podría reducirse el consumo de una ciudad hasta en un 20%. Esto implica no solo costos más bajos de producción, sino también una disminución en la generación de contaminantes producto del actual sistema de generación de electricidad. Aun aplicando los superconductores solo en una parte de los sistemas de generación, la eficiencia de prácticamente un 100% hace increíblemente atractiva esta tecnología.

Sin embargo, en países como México existen muchos problemas para que pueda llevarse a cabo la inserción de este tipo de desarrollo tecnológico. La falta de divulgación sobre las posibilidades que ofrecen estos materiales es el primero de ellos. Luego, el hecho de que los pocos centros de investigación donde puede llevarse a cabo investigación en el área están centrados en la física de la materia y en su estructura interna, pone en claro que no hay aún un desarrollo sólido en el campo de las aplicaciones para los superconductores. Además, como en cualquier nuevo campo de trabajo, toma tiempo y muchos recursos el consolidar una base científica que produzca al menos los prototipos y las patentes que hagan viable el seguimiento de la investigación. Todo esto, sin contar aún las dificultades burocráticas que se presentarán al intentar poner a prueba en escala real los dispositivos desarrollados, hablando de generadores o sistemas de almacenamiento de energía.

Sin embargo y pese a todo el mal panorama, hay que ser conscientes del mundo globalizado en que estamos, si no somos partícipes del desarrollo científico en estos momentos de crecimiento a nivel internacional, acabaremos por comprar los productos fabricados e importar la ciencia, por la que aún estamos en tiempo de competir.

CAPÍTULO 1

SUPERCONDUCTORES

En este capítulo se define lo que son los materiales superconductores, se hace un bosquejo histórico de su desarrollo, desde su descubrimiento, hace un siglo, hasta las propuestas e ideas más recientes con respecto a la teoría de la superconductividad y la fabricación de nuevos materiales. Se explican sus principales formas de clasificación y se habla de los efectos físicos más conocidos, dando una introducción al entendimiento de las aplicaciones únicas que se logran de este estado de la materia.

1.1 Concepto

Un material superconductor es un metal, aleación o cerámico que ha sido llevado a temperaturas muy bajas, haciendo que sus propiedades se modifiquen al pasar a un estado físico de la materia de menor energía, el estado superconductor. Una vez que el material ha rebasado su fase de transición, es decir, que su temperatura está por debajo del valor crítico característico de cada material, deja de oponer resistencia al flujo de corriente debido al desplazamiento de los electrones sin colisiones a través de los cristales del átomo. Además, presenta un diamagnetismo perfecto, es decir, no permite la existencia de campo alguno de inducción magnética en su interior. Hay tres parámetros principales que determinan el campo de acción de un material en estado superconductor: temperatura, campo magnético y densidad de corriente; por encima de los valores críticos de estos parámetros, el material vuelve a su estado normal o no superconductor.

1.2 Desarrollo histórico

Fue en 1908 cuando se observa por primera vez este fenómeno en metales de alta pureza; su descubridor, el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes estudiaba las propiedades de los metales a temperaturas extremadamente bajas. En 1911 hace la primera demostración de superconductividad en mercurio enfriado con helio líquido. Sin embargo, el mercurio de alta pureza era difícil y costoso de obtener, así que hubo que esperar el desarrollo de nuevos materiales con temperaturas críticas más elevadas (Ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Temperatura crítica y año de descubrimiento de varios elementos superconductores.

Elemento	Temperatura crítica T_C (K)	Año de descubrimiento
Mercurio	4,15	1911
Estaño	3,69	1913
Plomo	7,26	1913
Tantalio	4,38	1928
Niobio	9,2	1930
Aluminio	1,19	1933
Vanadio	4,3	1934

La resistencia eléctrica del Hg a temperaturas menores a 4,22 K era menor por un factor de 10^{-11} que su valor correspondiente a $T=4,22$ K; pensó que había comprobado la hipótesis de que si la temperatura desciende, la resistencia también ($R=kT$) pero después concluyó que la resistencia no disminuye de forma proporcional y continua, sino que abruptamente desaparecía a 4,15 K (Ver Fig. 1.1). Después demostró, mediante el uso de una corriente fluyendo en una espira a 4 K, que un año después la corriente aún estaba fluyendo sin pérdidas significativas. Onnes llamó a esta propiedad “Corriente persistente”, que es una corriente eléctrica que continúa fluyendo sin un potencial eléctrico dirigiéndola [1].

En 1933 dos físicos alemanes, Walter Meissner y R. Ochsenfeld descubren que un superconductor es más que un conductor perfecto, también tiene la importante propiedad de expulsar los campos magnéticos de su interior; ahora se conoce a este fenómeno como “Efecto Meissner”. La primera explicación teórica del comportamiento de un superconductor en un campo magnético fue dada en Inglaterra en 1935 por dos físicos alemanes, F. London y H. London. En 1945 se usa por primera vez este fenómeno a modo demostrativo por el físico ruso V. K. Arkadyev.

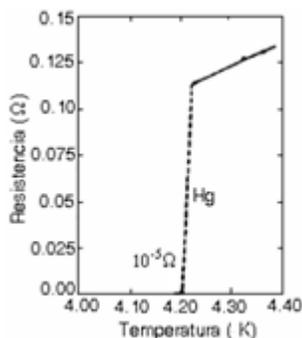


Fig. 1.1 Datos de los primeros trabajos de Onnes acerca de la superconductividad, se observa la caída drástica de la resistencia del mercurio al llegar a los 4,22 K.

En 1950 L. D. Landau y V. L. Ginzburg escriben un artículo sugiriendo una teoría general de la superconductividad, usada hasta la fecha. En 1954 (EUA, Chicago) reportan por primera vez un A-15, compuesto de V_3Si con una temperatura de transición de 16,9 K, y se descubre el Nb_3Sn , con temperatura de transición de 18,5 K, récord conservado hasta la aparición de los superconductores de alta temperatura [2].

En las tres décadas siguientes las investigaciones se orientan a descubrir teóricamente los fundamentos de la superconductividad. En 1957 el científico soviético Abrikosov publicó un estudio teórico en que predice otra clase de superconductores con propiedades diferentes a los estudiados experimentalmente hasta entonces. En octubre de este mismo año, tres físicos americanos, Juan Bardeen, Leon Cooper y Juan Schrieffer proponen, a través del Journal Physical Review, la “Teoría de la Superconductividad” conocida como teoría BCS por las siglas de sus descubridores, que explica cómo se da la superconductividad en las temperaturas cercanas al cero absoluto; sería quince años después que les otorgan el premio Nobel de física por su teoría de la superconductividad o teoría BCS. El físico soviético L. P. Gor’kov demostró la relación entre la teoría BCS y los conceptos precedentes de superconductividad. En 1962 un físico inglés, B. Josephson, predice teóricamente un inusual fenómeno que ocurre entre dos superconductores en contacto; posteriormente el fenómeno fue confirmado y lo llamaron Efecto Josephson; que rápidamente tuvo aplicaciones prácticas.

Por el lado experimental, en 1960 J. Kunzler y sus colaboradores comienzan a trabajar con las densidades de corriente en diversos materiales superconductores (i.e. Nb_3Sn a $J=100 \text{ kA/cm}^2$). En 1969 ya existen materiales superconductores a 20K, lo que permite usar otro elemento refrigerante, hidrógeno líquido. En estas fechas queda establecido que el elemento puro que tiene la temperatura crítica más alta es el Niobio, con 9,2 K.

En 1986 el descubrimiento de una nueva clase de superconductores llamados “de alta temperatura” marca una revolución en las actividades de investigación de este campo: en los laboratorios de IBM, en Suiza, se fabricó un material nuevo con propiedades superconductoras a 30 K. Son aleaciones cerámicas a base de óxidos de cobre mezclados con bario o estroncio y tierras raras (La, Y, Nd). Müller y Bednorz sintetizaron el primer material cerámico superconductor (BaLaCuO) que es, junto con otras cerámicas superconductoras, un material inorgánico constituido por elementos metálicos [3].

Aquí se da un salto enorme en las temperaturas críticas, llegando en 1987 al anuncio en la American Physical Society de superconductores a temperaturas críticas superiores a 90K; estas temperaturas permiten utilizar nitrógeno líquido como refrigerante, que tiene un punto de ebullición alrededor de los 77 K (Ver Tabla 1.2). Las ventajas de utilizar este elemento son: fácil de transportar en simples termos aislados, abundante en la tierra, fácil de licuar y barato en su obtención. Las primeras muestras se presentan en enero de 1987 en la universidad de Huntsville; Ching Wo Chu y sus colaboradores aumentan la temperatura crítica de una cerámica hasta los 92 K al aumentar la presión aplicada en la fabricación del material superconductor. Las propiedades superconductoras de este compuesto de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ dependen críticamente de la cantidad y ordenamiento del oxígeno, que a su vez depende críticamente de los detalles del proceso para su obtención. Este material, ampliamente utilizado hasta la fecha, es conocido como el 1-2-3 debido a su composición química, o simplemente YBCO. Después de éste se han descubierto nuevos óxidos de cobre superconductores, más complejos y con T_C más altas.

Tabla 1.2 Temperaturas de ebullición de diversas sustancias a presión atmosférica.

Sustancia	Temperatura de ebullición T_E (K)
Helio	4,2
Hidrógeno	20,3
Neón	27,2
Nitrógeno	77,4
Oxígeno	90,2

En 1988 se obtienen óxidos de cobre con calcio, bario y talio con temperaturas críticas superiores a los 100 K, pero con el problema de ser altamente tóxicos debido al talio. También cabe mencionar el caso particular de una muestra de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ que es superconductor a 110 K, siendo el primer superconductor de alta temperatura que no tiene tierras raras en su composición. El superconductor con bismuto tiene muchas aplicaciones en la industria a gran escala, pero se conoce menos por su naturaleza tóxica. En 1993, en la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París, se obtienen películas de óxido mixtas de cobre y mercurio con $T_C=133$ K.

La aplicación de altas presiones durante el proceso de fabricación es una técnica poderosa para inducir la superconductividad en algunos materiales, e inclusive algunos materiales sólo pueden ser superconductores cuando la presión los convierte en una fase metálica más densa, por ejemplo: Se, Ge, As, P, Ce, Ba e Y. La principal ventaja de implementar el aumento de la presión en la producción de superconductores es que su T_C aumenta ventajosamente (Ver Fig. 1.2). En agosto de 1993 Chu produce, bajo altas presiones (más de 150 kbar), una muestra con $T_C=153$ K de $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$, y ese mismo año A. Svilling y su equipo adicionan talio a este compuesto y bajo presiones de más de 300 000 atmósferas consiguen temperaturas de hasta 168 K [4].

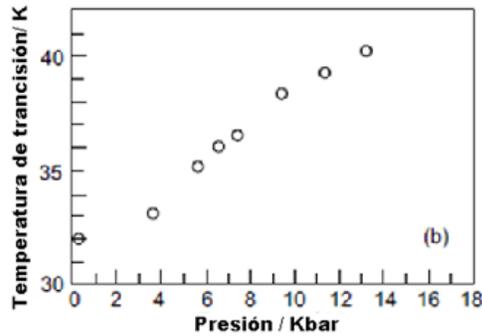
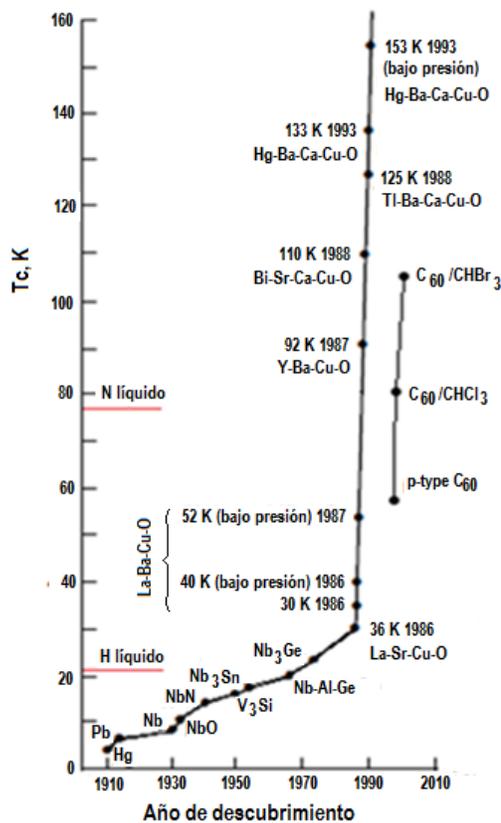


Fig. 1.2 Dependencia de la temperatura contra la resistividad eléctrica a determinadas presiones para una muestra de LaBaCuO (Chu et al 1987).



Formula	T _C
(La _{2-x} Sr _x)CuO ₄	38
(La _{2-x} Sr _x)CaCu ₂ O ₆	60
Tl ₂ Ba ₂ CuO ₆	0-80
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	108
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₃ O ₁₀	125
Bi ₂ Sr ₂ CuO ₆	0-20
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₆	95
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
YBa ₂ Cu ₄ O ₈	80
Y ₂ Ba ₄ Cu ₇ O ₁₄	40
TlBa ₂ CuO ₅	0-50
TlBa ₂ CaCu ₂ O ₇	80
TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	110
TlBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₁	122
HgBa ₂ CuO ₄	94
HgBa ₂ CaCu ₂ O ₆	127
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133

Fig. 1.3 Izq. Año de descubrimiento y temperatura crítica de algunos materiales superconductores. Der. Los materiales superconductores pueden tener diferentes T_C según su composición.

Después del establecimiento de los óxidos cerámicos como el YBCO, el problema fue determinar su composición, estructura y propiedades básicas. El estudio cristalográfico ha sido altamente utilizado para los óxidos cupratos, y los últimos adelantos en se han hecho a base de cupratos con Hg; actualmente hay más de 50 de estos últimos, con la característica común de ser óxidos de cobre planos ligeramente dopados (Ver Fig. 1.3).

Mientras más complejos se vuelven los compuestos, también es más difícil hacerlos y optimizar sus propiedades. Aunque hay problemas en la teoría BCS para aleaciones y superconductores

complejos, experimentalmente se cree que aún es el mejor camino para entenderlos. Se conocen más de 1000 materiales superconductores, elementos puros y compuestos [5]. Actualmente los esfuerzos se centran en desarrollar nuevos materiales, métodos de manufactura, aplicaciones eléctricas más prácticas, menos costosas y el desarrollo de una nueva teoría para los superconductores de alta temperatura (un requisito básico sería la posibilidad de predecir qué compuestos serán superconductores). La historia de los superconductores a penas se está escribiendo.

Uno de los orgullos que pertenecen a la superconductividad es la cantidad de Premios Nobel entregados en el área de la física [3i]:

- 1913 Heike Kamerlingh Onnes. Por sus investigaciones en las propiedades de la materia a bajas temperaturas lo cual permitió, entre otras cosas, a la producción de helio líquido.
- 1962 Lev Davidovich Landau. Por sus teorías pioneras en materia condensada, en particular, del helio líquido.
- 1972 John Bardeen, Leon N. Cooper y Robert Schrieffer. Por el desarrollo de la teoría de la superconductividad, usualmente llamada teoría BCS.
- 1973 Leo Esaki e Ivar Giaever. Por sus descubrimientos experimentales sobre el fenómeno de tunelaje en semiconductores y superconductores, respectivamente. Y a Brian David Josephson. Por sus predicciones teóricas de las propiedades de la supercorriente a través de un túnel-barrera, en particular el fenómeno generalmente conocido como efecto Josephson.
- 1987 Alex Müller y George Bednorz. Por sus contribuciones decisivas en el descubrimiento de la superconductividad en materiales cerámicos.
- 2003 Vitaly Ginzbur, Alexei Abrikosov y Anthony Leggett. Por sus contribuciones originales concernientes a la teoría de los superconductores y superfluidos.

1.3 Clasificación

Para clasificar a un material como superconductor, se exige estrictamente hablando que tenga una resistividad menor a $10^{-23} \Omega\text{cm}$ (aunque siempre se conserva una resistividad residual que también depende del grado de perfección y composición de la muestra) en un campo magnético nulo [1], además de presentar el efecto Meissner, es decir, que el superconductor expulse el campo magnético de su interior y en consecuencia un imán pueda levitar sobre él (Ver Fig. 1.4); este fenómeno será descrito a detalle más adelante.

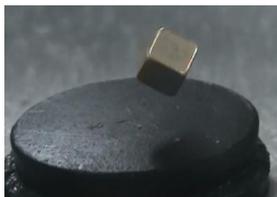


Fig. 1.4 Imán levitando sobre una pastilla superconductora debido al efecto Meissner.

1.3.1 Superconductores tipo I y tipo II

Los superconductores tipo I son metales o elementos puros que presentan una exclusión de flujo completa (efecto Meissner) y que tienen valores de temperatura crítica (T_C) cercanos al cero

absoluto, así como bajos valores de campo magnético crítico (H_C) y densidad de corriente crítica (J_C); es decir, son diamagnetos ideales (presentan una exclusión completa del flujo magnético) siempre y cuando no se rebase una determinada intensidad llamada punto crítico (Ver Fig. 1.5), distinto para cada superconductor. Una vez que cualquiera de las tres propiedades ha rebasado su valor crítico, el material vuelve a su estado normal perdiendo sus propiedades superconductoras. Son nombrados superconductores ideales o suaves [4 i].

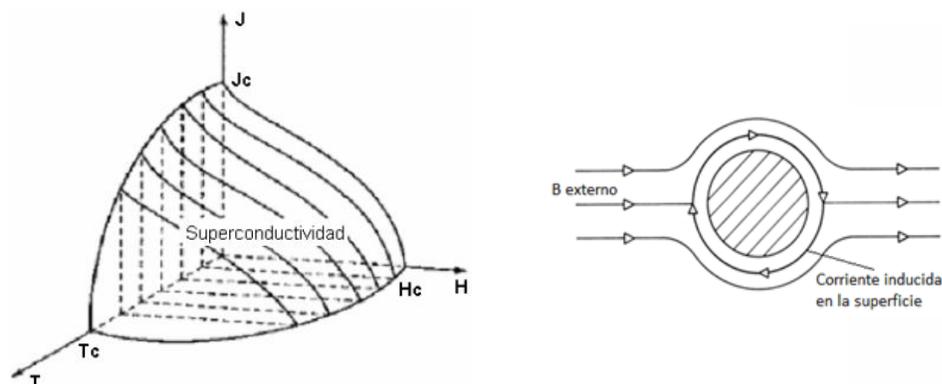


Fig. 1.5 Izq. Diagrama de fase del estado superconductor [6]. Der. Muestra cilíndrica superconductora tipo I en el interior de un campo magnético perpendicular al cilindro.

Los superconductores tipo II generalmente son aleaciones o metales de transición. Estos materiales pueden permitir la introducción del campo magnético y simultáneamente seguir siendo superconductores. Los parámetros de temperatura, campo magnético y densidad de corriente críticos se presentan en dos etapas: por debajo del H_{C1} el material se comportará como los superconductores tipo I, pero al ir aumentando la fuerza del campo, el flujo empieza a penetrar al material en líneas de flujo y al llegar al segundo valor crítico (H_{C2}), perderá las propiedades superconductoras (Ver Fig. 1.6 Izq.).

La razón por la que existe un estado mixto en los superconductores tipo II es la presencia de interfases entre las regiones normal y superconductoras; esto se explica mejor de la siguiente manera: una vez que el campo magnético se ha incrementado más allá del H_{C1} , el compuesto es atravesado por líneas de flujo, alrededor de cada línea, pequeñas corrientes circularán como vórtices diminutos, entonces el centro de cada vórtice deja de ser superconductor; cada vórtice captura e introduce en el superconductor una línea de campo equivalente a la introducción de un cuanto¹ de flujo (estas líneas o ejes de vórtice quedan orientados paralelamente a las líneas del campo, con un diámetro fijo de aproximadamente 10^{-7} cm). Si la fuerza del campo va aumentando, el tamaño de los vórtices no cambiará, pero el número de éstos aumentará; cada vez serán más próximos, hasta que fluyan uno junto al otro y la transición al estado normal ocurra (Ver Fig. 1.7). La J_C en un superconductor tipo II depende no solo del número de vórtices, sino también de su habilidad para moverse. Experimentalmente se encontró que los vórtices forman un arreglo triangular tipo enrejado [7].

En los superconductores tipo I, aun cuando el H es incrementado, es completamente expulsado del interior de la muestra; por su comportamiento como diamagneto, la magnetización es tomada

¹ El cuanto de flujo magnético es una constante física: $\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067833636 \times 10^{-15} \text{ Wb}$

como negativa. Llegando al H_C la muestra se vuelve al estado normal y la magnetización se vuelve extremadamente pequeña. En cuanto a la magnetización de un superconductor del tipo II, se puede observar entre el H_{C1} y el H_{C2} un descenso lento, no de una manera drástica como en los anteriores (Ver Fig. 1.6 Der.).

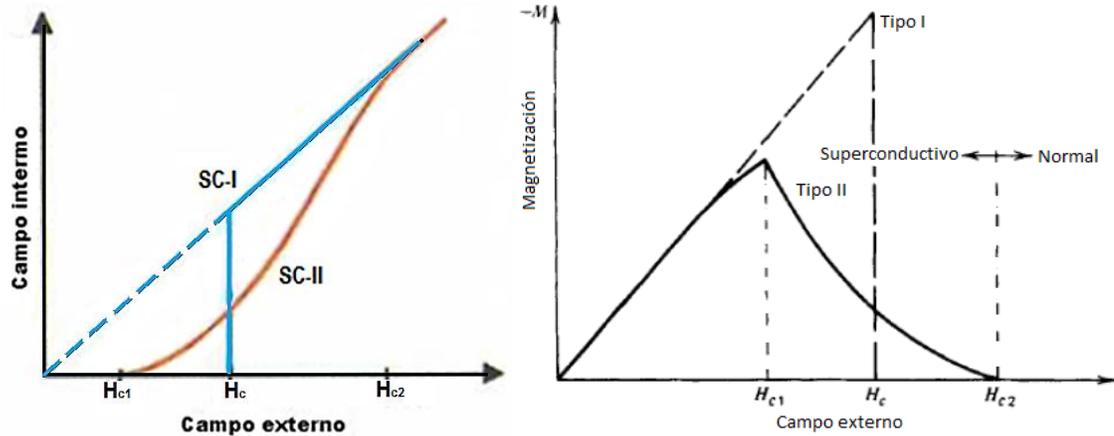


Fig. 1.6 Comparación entre los superconductores tipo I y tipo II. Izq. Muestra la diferencia de comportamientos del flujo magnético en el interior de la muestra: el tipo I tiene un solo valor crítico y deja de ser superconductor al sobrepasar ese valor, el tipo II tiene dos valores entre los cuales puede haber flujo en su interior y seguir siendo superconductor. Der. Comparación de la magnetización contra el campo magnético externo para los superconductores tipo I y tipo II.

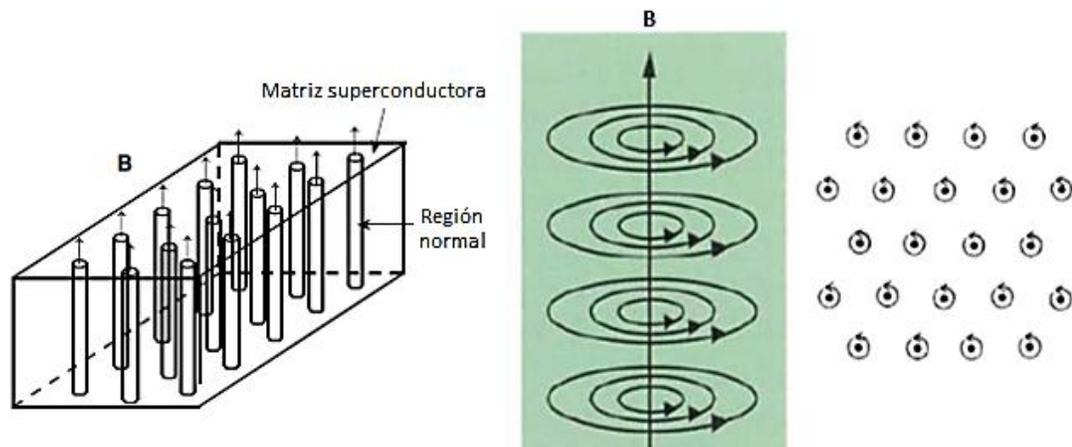


Fig. 1.7 Izq. El arreglo de vórtices formado en un superconductor tipo II se ejemplifica como una región tubular, en regiones paralelas al campo magnético que no presentan características superconductoras. Cada tubo equivale a la introducción de un cuanto de flujo. Al centro, un esquema de un vórtice en un superconductor tipo II, el eje del vórtice es paralelo al campo magnético externo y las pequeñas corrientes eddy son las flechas circulares que se encuentran a su alrededor. Der. Arreglo triangular de los vórtices visto en la dirección del campo magnético.

Como resultado de los diferentes comportamientos entre los superconductores tipo I y tipo II, la levitación se presenta de dos formas distintas: en el primer tipo, al haber una completa exclusión del flujo magnético, un imán puede permanecer levitando por sobre una muestra superconductora por efecto de la repulsión (efecto Meissner); mientras que en uno del tipo II habrá dos formas de levitación: un efecto de repulsión para mantener levitando encima un imán y uno de atracción,

que pueda sostener un imán por debajo, permaneciendo en levitación al estar sujeto con las líneas de flujo (Ver Fig. 1.8).

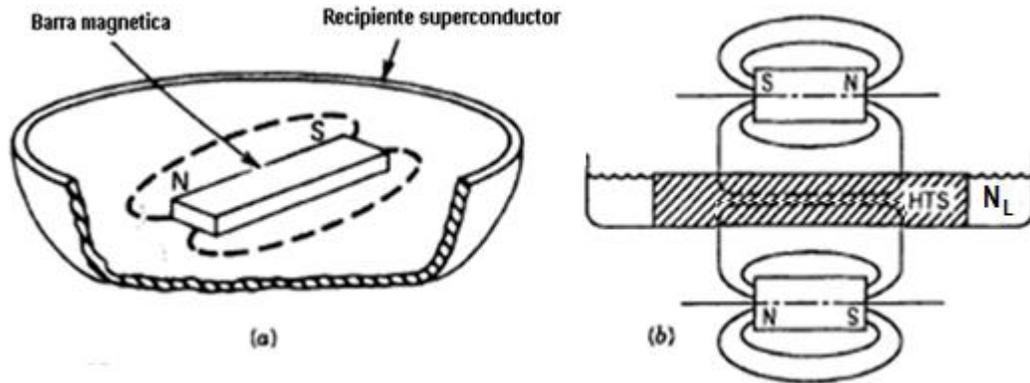


Fig. 1.8 Levitación en materiales superconductores a) Tipo I o de Meissner, b) Tipo II.

La teoría BCS permite calcular la T_C a partir de las propiedades básicas físicas y atómicas de los elementos. Un material superconductor convencional puede ser explicado mediante la teoría BCS, mientras que, estrictamente hablando, uno no-convencional necesita un mecanismo diferente, como en el caso de los cupratos.

1.3.1 Superconductores según su temperatura crítica

En forma común se suele clasificar a los superconductores en función de su temperatura crítica como de alta y baja temperatura, haciendo la división a los 30 K, con las cerámicas superconductoras. Desde su descubrimiento se han clasificado varias familias de superconductores de alta temperatura crítica, una lista muy completa se puede encontrar en la referencia [8].

Actualmente, los cables con los que más se trabaja están hechos de la aleación Nb-Ti ($T_C = 9,8$ K) utilizados en medicina y en laboratorios, esto sucedió porque en el auge de los superconductores, a mediados de los 80's, ya había una considerable cantidad de aplicaciones trabajando con helio líquido y todos los requerimientos que esta clase de medio criogénico necesita, con la ventaja de los enormes campos magnéticos que son capaces de generar fue posible encontrarle ventajas aun antes de que se descubrieran los compuestos cerámicos de altas temperaturas.

A pesar de que la principal división fue hecha por el descubrimiento de Bednorz y Muller (cerámicas superconductoras con $T_C \geq 30$ K), las aplicaciones de los superconductores que tienen T_C mayores al punto de ebullición del nitrógeno (77 K) hacen posible su utilización en la industria con costos realmente competitivos: la obtención de un litro de nitrógeno es 100 veces más barato que uno de helio, y se necesitan 10 veces menos para enfriar la misma masa (el calor específico de vaporización del N es mucho más alto que el del He) y el equipo criogénico es mucho más sencillo y barato. Por estas razones, generalmente las aplicaciones que hacen referencia a los superconductores de alta temperatura se refieren al uso de materiales por encima del límite del nitrógeno.

Los superconductores cerámicos dependen de la estructura fundamental del material, no solo en cuanto a la T_C , también dependen de ello la J_C , la magnetización y las fuerzas de levitación. Como un ejemplo, el material YBCO de estructura 123 (en referencia a su composición química $YBa_2Cu_3O_x$) fue mejorado al tener inclusiones del mismo en estructura 211, que actúa como centros de anclaje del flujo magnético, y mejoran la J_C intragranular (a mayor tamaño de grano, mayor fuerza de levitación).

Macroscópicamente hablando, dado un volumen de material superconductor ¿Qué cantidad de material se necesita para obtener la mayor fuerza de levitación? En un superconductor tipo I con un imán pequeño se necesita a penas una muy delgada película, ya que no permite el paso de flujo; pero, ya que en los cerámicos existe la penetración parcial del flujo, trabajando en YBCO se encontró un aumento de la fuerza de levitación en muestras con espesores de 3-5 mm [9].

En algunas áreas es ya indispensable el uso de los superconductores, por ejemplo en el diseño y la creación de los dispositivos de levitación: resulta crucial para la creación de campos magnéticos enormes, para repulsión en levitación y para producir materiales con densidad de corriente máxima que crean grandes fuerzas de suspensión. Se piensa que en los cupratos el campo magnético podría llegar al rango de los 30-200 T. Además de aumentar el tamaño de grano, la J_C ha sido aumentada por procesos de manufactura que crean anclaje del flujo. En la última década se agregan los compuestos de tipo metal-orgánicos C_{60} y C_{70} a los superconductores de alta temperatura [10].

1.4 Efectos en la superconductividad

La ley de inducción magnética describe en general la relación entre los campos eléctrico y magnético, y es sabido que una variación en el campo magnético induce una corriente; sin embargo, para que exista una corriente continua en un superconductor, no es necesario un campo eléctrico, y en una situación de equilibrio, el campo eléctrico es igual a cero. Un conductor perfecto se caracteriza porque su campo eléctrico interno desaparece y su campo magnético es constante. En los superconductores, el campo magnético disminuye hasta cero, de ahí, son diamagnetos ideales.

Es posible considerar la transición al estado superconductor por dos caminos, en el primero se baja la temperatura por debajo de la T_C , causando que la transición ocurra, y luego se aplica el campo magnético, el cual es forzado a pasar solo alrededor de la muestra. En el segundo camino, se aplica primero el campo, el cual penetra en la muestra, luego se hace descender la temperatura por debajo de la T_C , causando que el campo sea expulsado fuera del cuerpo (Ver Fig. 1.9) [11].

Un metal puede existir en un estado normal ($T > T_C$) y en estado superconductor ($T < T_C$), estados que son llamados fases, cuyo nombre enfatiza que la sustancia está en equilibrio, es decir, un estado de mínima energía. Una “ola” de capacidad calorífica es un signo típico de la fase de transición. Un superconductor es más ordenado que un metal normal, tiene menos entropía: cuando un material se hace superconductor, los electrones deben ser condensados en un estado ordenado; la esencia del modelo BCS explica cómo los electrones interactúan para formar este estado.

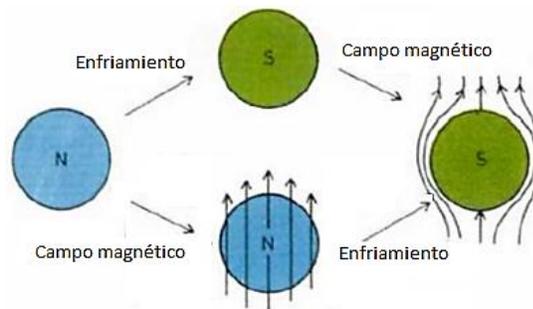


Fig. 1.9 Transición al estado superconductor.

En un sólido, no todos los electrones del átomo participan en la conducción, sólo los que están más alejados del núcleo son libres para moverse; sin embargo, siempre experimentarán colisiones y solo mediante la aplicación de un campo eléctrico, los electrones se pueden acomodar para transportar corriente; en los superconductores, hay un acomodo particular que no permite pérdidas por colisionamiento. El sistema, al pasar al estado superconductor, va a cambiar de manera radical, va a formar pares de Cooper con todos los electrones que sientan la interacción activa. Así, el movimiento de un electrón puede estar pareado a otro mediante la interacción de deformidades en la red (Ver Fig. 1.10). Los electrones normalmente se repelen entre ellos, pero a una temperatura suficientemente baja, la red crea un lazo o una fuerza atractiva entre ellos (pares de Cooper) que hacen posible el movimiento colectivo de los electrones sin pérdidas debidas a colisiones y sin la necesidad de un campo eléctrico externo para producir una corriente eléctrica. Un par de Cooper está formado por electrones con espín directamente opuesto, es decir, se encuentran moviéndose en direcciones contrarias. En un par de Cooper los electrones están a grandes distancias, que pueden ser miles de veces mayores que la distancia media entre electrones. La teoría de la longitud de cohesión determina la separación de los electrones en los pares de Cooper (aproximadamente 10^{-4} cm [12]). Un par no se considera una partícula puntual, de hecho su influencia se extiende a 10^{-4} cm o un volumen de 12^{-12} cm³; pero hay aproximadamente 1×10^6 pares de electrones sobrepuestos en esa región que interactúan intercambiando parejas, lo que produce la cohesión y el estado condensado de un superconductor. La longitud de cohesión en los materiales metálicos tipo I es mayor que en los nuevos óxidos.

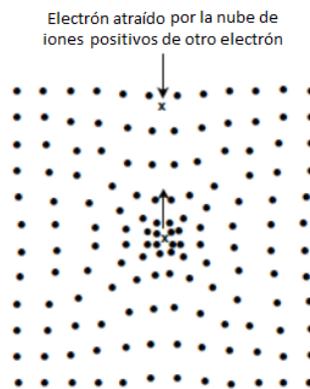


Fig. 1.10 Atracción entre electrones, es posible debido a la nube de iones positivos que rodean a uno de ellos con fuerza suficiente para atraer al otro a grandes distancias.

Hay un tipo de corriente que fluye en la superficie del superconductor llamada corriente de apantallamiento, es la que provoca el efecto Meissner y solo fluye si existe un campo magnético

que deba ser expulsado. Una corriente conducida por un superconductor creará su propio campo magnético, el cual tendrá el mismo efecto destructivo de la propiedad superconductiva. Al ser la corriente de apantallamiento distribuida sobre un cierto espesor de la pared del superconductor, su campo magnético penetra en el material y decrece gradualmente en forma exponencial; la distancia a la cual su fuerza decae e veces ($e =$ base del logaritmo natural) es definida como la profundidad de penetración de London λ_L (Ver Fig. 1.11).

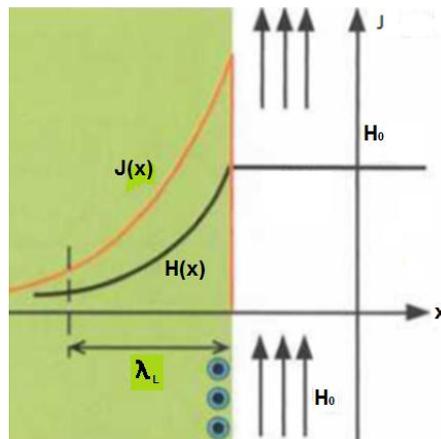


Fig. 1.11 Se observa la capa entre un superconductor (el área sombreada) y el campo magnético (las líneas de la derecha indican las líneas de flujo magnético). Los círculos indican la corriente superconductora de superficie. El campo puede penetrar solo hasta una muy pequeña profundidad en el cuerpo superconductor y va decreciendo exponencialmente. La línea superior denota la dependencia de la densidad de corriente con la distancia desde la superficie del superconductor [5].

El espesor o profundidad de penetración depende de las propiedades del material, sin embargo, experimentalmente se han encontrado que su valor oscila en el rango de 100 a 500 Å (angstrom, $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$), y que aumenta en relación directa a la temperatura.

Estos parámetros son utilizados además para determinar si un superconductor es tipo I o tipo II: comparando la profundidad de penetración (λ_L) y la longitud de cohesión (ξ) de acuerdo al criterio de Ginzburg-Landau:

$$\text{Tipo I } (\lambda_L / \xi) < \frac{1}{\sqrt{2}} < (\lambda_L / \xi) \text{ Tipo II} \quad (1)$$

Por otro lado, cuando se ponen dos superconductores separados por una muy delgada barrera aislante, se forman túneles a través de los cuales pasa la corriente. Esto sucede porque las ondas del electrón de un metal no se cortan bruscamente en la superficie, sino que continúan fuera una pequeña distancia; cuando una pieza de superconductor se coloca muy cerca de otra los electrones tienen la posibilidad de penetrar la barrera potencial formada por la capa aislante (longitud aproximada de 20 Å) entre los superconductores (Ver Fig. 1.12). Una pequeña corriente de túnel puede ser causada a través de la unión, aplicando un voltaje entre los superconductores [1]. Dicho efecto túnel fue predicho en el trabajo teórico de Brian Josephson.

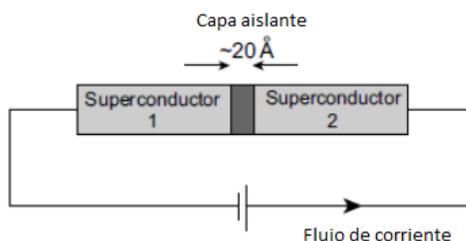


Fig. 1.12 El principio de un experimento de predicción de Josephson acerca del efecto túnel a través de una unión aislante entre dos superconductores.

Entonces, si un superconductor es cubierto con una delgada película de metal normal o aislante, de espesor menor a su ξ , esta película adquirirá propiedades superconductoras, esto es un efecto de proximidad. Se le puede llamar superconductor débil o eslabón débil. En cada uno de los superconductores en contacto, el movimiento de los electrones es controlado y los pares se mueven en fases; estas fases son diferentes y su diferencia determina el movimiento de los pares a través del contacto. El efecto Josephson estacionario se da cuando una corriente superconductoras espontáneamente atraviesa el contacto sin un voltaje aplicado. El efecto no estacionario ocurre si un voltaje es aplicado al contacto o si una corriente mayor a la corriente crítica es conducida a través de él (la corriente crítica en un eslabón débil es mucho menor que la corriente crítica del superconductor completo); el contacto adquiere una resistencia y una inductancia y fluye una CA, donde el voltaje no determina la corriente, sino la frecuencia: un voltaje del rango de los mV conduce a frecuencias de miles de GHz, que caen en un rango de SHF (Super High Frequency). Entonces, el contacto de Josephson de dos superconductores no solo convierte un voltaje directo en una corriente alterna, sino que también trabaja como un circuito oscilatorio [10].

Por otro lado, regresando a los efectos de la vorticidad de los superconductores tipo II, se verá un efecto por demás relevante. Con altos campos magnéticos, los materiales existen en un estado mixto, con líneas de vórtices; recordando que estas líneas de flujo sufren bajo la fuerza de Lorentz, se tiene como consecuencia que tienden a moverse, el movimiento implica fricción y ésta, una pérdida de energía y una resistencia al flujo de corriente, perdiéndose así el objetivo principal de los superconductores de no tener pérdidas; entonces, para tener grandes valores de densidad de corriente, los vórtices no se deben mover. Experimentalmente se descubrió que el movimiento de las líneas de flujo (vórtices) encuentra resistencia en los defectos de la red, que actúan como puntos de anclaje del flujo magnético en varios puntos a lo largo del vórtice, resultando en fuerzas de fijación; estas fuerzas dependen del campo magnético, la temperatura y la naturaleza de los defectos. Compañías industriales se esfuerzan en hacer alambres superconductores de alta temperatura con un número máximo de anclajes para lograr una densidad de corriente máxima. Este “apuntalamiento” se logra insertando en el material dislocaciones, bordes de grano o defectos, lo que garantiza preservar la no-pérdida de energía (Ver Fig. 1.13). Los materiales con estas características son conocidos como superconductores duros y actualmente son utilizados para generar grandes campos magnéticos como imanes comerciales.

Otra de las grandes aportaciones de la ingeniería de materiales además de la creación de dislocaciones controladas en el material, ha sido el dopado de ciertos materiales: la propiedad de conductividad eléctrica necesaria para la superconductividad es inducida por dopado con un

elemento impuro apropiado. Si progresivamente se aumenta la concentración de impurezas, una serie de distintas fases con fascinantes propiedades se revelará. A medida que la temperatura y las concentraciones de impurezas aumentan, aparecen secuencialmente varias fases: aislante, anti-ferromagnético, vidrio de spin, metálica y superconductora.

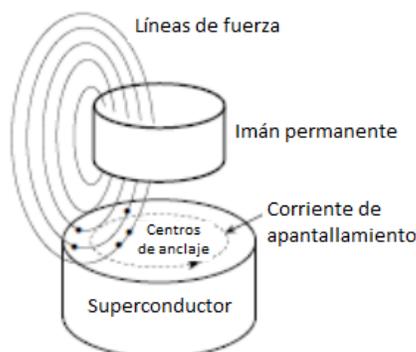


Fig. 1.13 Anclaje de las líneas de fuerza en los defectos del superconductor.

Por otro lado, investigaciones recientes sobre el uso de superconductores como imanes permanentes han dado excelentes resultados. Se han mejorado las propiedades de magnetización del YBCO fabricado por el método “melt-growth”, después se carga magnéticamente el cuerpo hasta un determinado nivel y una vez que el campo aplicado es removido, la pieza retiene una magnetización remanente (Ver Fig. 1.14). En la universidad de Houston se han creado imanes superconductores de magnetización remanente de 4 T desde 1992. Ante esta situación, se tienen que valorar directamente las capacidades de los imanes permanentes convencionales contra los superconductores: a) los primeros pesan demasiado y generan campos magnéticos de apenas medio Tesla; b) ya que la presión magnética es proporcional al cuadrado del campo magnético, los imanes permanentes superconductores generan diez veces más la presión de levitación que los imanes de tierras raras, y sin la desventaja del peso de estos últimos; c) si un imán superconductor es magnetizado a temperatura del N_L , y luego se quita el campo manteniendo la temperatura, este imán sería colocado en un módulo criostato debajo del Maglev sin necesidad de llevar corriente alguna a bordo.

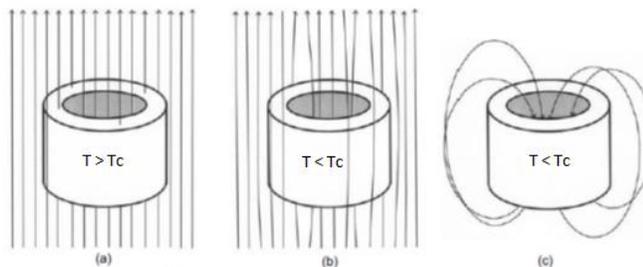


Fig. 1.14 Una muestra superconductora en un campo magnético, a) en estado normal las líneas de flujo lo atraviesan, b) en estado superconductor el flujo es expulsado del interior del cuerpo pero pasa por el interior del anillo, c) aun cuando el flujo magnético es removido, la corriente inducida en el anillo y el flujo magnético permanecen en el mismo valor.

Los trabajos teóricos más extenuantes en materia de superconductores de alta temperatura crítica se enfocan en averiguar cómo funcionan los óxidos cupratos, esto es debido a que son los de uso más común, y el tener una teoría al respecto permitiría plantear el camino para el descubrimiento de nuevos materiales de más alta temperatura crítica.

Aun sin predecir la composición de los materiales, la teoría más aceptada para describir el funcionamiento de los superconductores de alta temperatura fue desarrollada por G. M. Eliashberg [13], que hizo una extensión de la teoría BCS a un rango más amplio de aplicación, es decir, el origen de la superconductividad sigue siendo la interacción de los pares de Cooper con su estructura cristalina, pero se introduce una mayor información acerca del sistema.

A pesar de que hay varias teorías al respecto, aún no hay una que pueda predecir la composición de los nuevos materiales, sin embargo se necesita hacer un trabajo integral entre las diferentes disciplinas que tienen interés en los superconductores, díganse la física del estado sólido, la química, la ingeniería de materiales y la ingeniería magnetomecánica, ya que la contribución de cada área por separado ha dado avances concisos pero lentos.

Resumiendo, un material debe cumplir con dos propiedades básicas para clasificarse como superconductor: resistencia cero al flujo de corriente eléctrica y diamagnetismo perfecto (efecto Meissner) y deben ser llevados a temperaturas criogénicas para que estas propiedades aparezcan.

Se presentaron los descubrimientos más importantes en la historia de los superconductores, comenzando en 1911 con la primera demostración del fenómeno en mercurio de alta pureza, el paso a la superconductividad en aleaciones y compuestos, el desarrollo de la teoría BCS y el descubrimiento y fabricación cada vez más compleja de materiales compuestos, en la búsqueda de la superconductividad a temperatura ambiente.

Se dio un panorama de las dos clasificaciones más importantes que se dan a los superconductores, de acuerdo al criterio Ginzburg-Landau como de tipo I y tipo II, y de acuerdo a la temperatura en que pierden sus propiedades superconductoras, como de alta y de baja temperatura crítica.

Se presentaron las propiedades y efectos físicos más interesantes y funcionales que han hecho de los superconductores una tecnología única, altamente prometedora para las aplicaciones de este siglo y se planteó la posibilidad de desarrollo de una nueva teoría de la superconductividad que permita predecir la composición de materiales que sean superconductores a temperaturas cada vez más altas.

Con este panorama general se da una introducción al entendimiento de los materiales superconductores, es un camino resumido que intenta provocar el interés en materia de la física y la ingeniería de estos materiales. Ahora que ya ha pasado el ¿Qué son? y ¿De dónde vienen? Se dará el siguiente paso al ¿Para qué sirven?

CAPÍTULO 2

APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

El estudio de la superconductividad es un campo relativamente nuevo en la física, y más nuevo aún en la ingeniería. En muchas universidades y centros de investigación a nivel mundial se invierten grandes sumas en investigación y desarrollo de nuevos materiales superconductores y de tecnología que la utilice, que produzcan menos contaminación térmica y química, menos ruido y tenga mayores beneficios económicos. (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Perspectivas económicas de las aplicaciones de la superconductividad a escala mundial (en millones de euros)

Años	1997	2000	2003	2010
Aparatos científicos destinados a la investigación	355	415	550	840
Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM)	1400	1900	2100	2750
Nuevas aplicaciones electrónicas	35	25	55	980
Nuevas aplicaciones electrónicas	20	30	75	680
Estimación del mercado mundial global	1810	2370	2780	5250

[Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity, 2001]

A pesar de que tiene ya más de un siglo que se descubrieron los superconductores, hasta ahora no ha sido posible fabricar fácilmente piezas grandes que puedan ser uniformemente manufacturadas y enfriadas, únicamente han sido construidos prototipos que están en prueba; en principio solo se ha llegado a trabajar con piezas pequeñas que tienen su principal aplicación en electrónica y cómputo. Bajo estas circunstancias, la información será dividida en dos áreas: electrónica, donde es común el uso de películas delgadas, y aplicaciones de grandes longitudes, que requieren el uso de alambre, cables o cintas. Las aplicaciones más extensas comercialmente hablando se enfocan en la electrónica, ya que los problemas tecnológicos de fabricación en pequeños dispositivos son menores que los de manufactura de alambres y cintas.

2.1 Aplicaciones en electrónica

2.1.1 Películas delgadas

Para iniciar, se debe saber que existen complejas complicaciones en la manufactura de las películas superconductoras: las propiedades de alta anisotropía², la dificultad de obtener cupratos compuestos laminados (que contienen de tres a cinco elementos metálicos además del oxígeno), la sensibilidad de los compuestos a la estructura cristalina y al nivel de oxígeno que contienen, y que en general son muy reactivos (eso limita la elección de los sustratos). Todos estos factores no eran problema en los superconductores de baja temperatura, pero no alcanzan los parámetros críticos que los de alta. Además, los procesos de manufactura de los nuevos materiales se realizan a temperaturas entre 700 y 900 °C y sin ninguna garantía, en las primeras etapas de fabricación, de haber producido un material superconductor. Todas estas dificultades han hecho que el trabajo

² Propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas según la dirección en que son examinadas.

de descubrimiento y manufactura sea meramente experimental y de alta dificultad. Existen varias técnicas para la fabricación de este tipo de películas:

- Evaporación. Fue la primera técnica utilizada en un superconductor de YBCO, comienza con varias fuentes separadas, una para cada material, entonces se producen vapores en la relación adecuada de la composición mediante el calentamiento de las fuentes contando con niveles constantes de oxigenación (Ver Fig. 2.1).
- Epitaxia. Es una técnica de muy alta calidad en que se fabrican películas capa por capa mediante una evaporación en vacío; la temperatura aplicada a cada componente determina el número de moléculas que irán a dar a la superficie del sustrato, que está bajo calentamiento y en rotación constante. Ya que los superconductores son materiales de tipo laminar o estructurados en capas, esta técnica produce películas prácticamente perfectas en cuanto a su estructura cristalina (Ver Fig. 2.2).

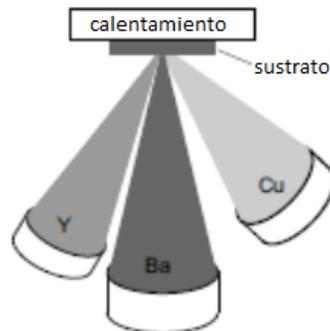


Fig 2.1 Método empleado para fabricar películas superconductoras de alta temperatura, como YBCO, por evaporación desde diferentes fuentes controlando el flujo desde cada fuente para asegurar que la película depositada en el sustrato tenga la composición adecuada.

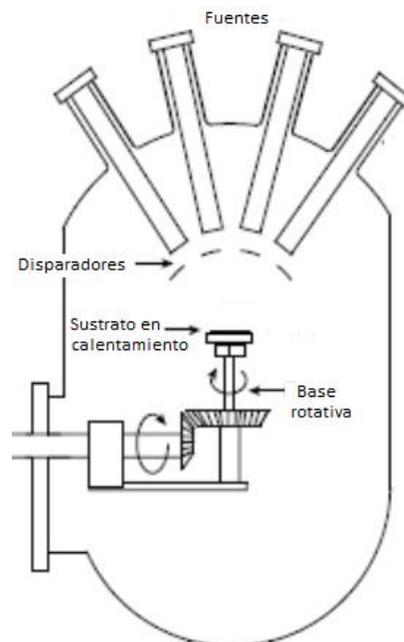


Fig. 2.2 Máquina para fabricación de películas delgadas por el método de epitaxia.

- Sputtering. En esta técnica los átomos son arrojados desde un cátodo por el bombardeo con iones producidos en un gas plasma, estos átomos son depositados sobre el sustrato que se encuentra justo enfrente. Tiene la desventaja de que la película puede ser dañada por iones de plasma y que es posible que no tenga la misma composición en toda su geometría, sin embargo, es una técnica muy económica y por lo tanto muy usada.
- Depósito por láser pulsado. Un pulso de láser vaporiza una pequeña cantidad de cada material necesario para el compuesto, produce películas de alta calidad y es una técnica muy veloz. Ya que produce películas multicapas de alta calidad, permite trabajar con óxidos, que tienen una estructura laminada o en capas.
- Depósito de metal-orgánicos mediante evaporación química. Los cationes son liberados hacia un sustrato calentado como los componentes de un vapor metal-orgánico, el sustrato causa la salida de los compuestos para agregarse en la superficie de la pieza que crece epitaxialmente³. Es una técnica muy utilizada en los semiconductores, pero presenta deficiencias en la proporción de los materiales [14].

En las aplicaciones de la electrónica se pueden llegar a necesitar sustratos de gran tamaño (hasta de varios centímetros), con la superficie perfectamente lisa, ya que es posible que se afecte el desempeño del dispositivo y deben tener una adecuada estructura cristalina, con el espaciamiento requerido entre átomos, de tal forma que se eviten esfuerzos y torcimientos que darían lugar a defectos y dislocaciones. El sustrato es obtenido de un cuerpo cristalino, cortado y pulido mecánica y químicamente, con el fin de obtener una superficie limpia, plana, libre de pasos, hendiduras o islas; debe ser una adecuada base mecánica a la película pero sin intervenir químicamente con ella, sin olvidar que sea ambientalmente estable. Todas estas características son difíciles de encontrar, ya que los compuestos de superconductores de alta temperatura son muy reactivos y porque a más de 700° C es difícil tener una sustancia físicamente inerte.

La elección del tipo de sustrato que se va a utilizar depende del superconductor y de su aplicación final. A la fecha, el superconductor más usado en electrónica es el YBCO, y con las técnicas antes mencionadas es posible producir películas de alta calidad con densidades de corriente de hasta 10^6 A/cm². Para este superconductor, se han utilizado cristales de Estroncio de Titanio (SrTiO₃) y Lantano de Aluminio (LaAlO₃) que son perovskitas⁴ (mineral del grupo IV (óxidos) y otros cristales de la misma estructura: alcalino, metal de transición y O₃) de un arreglo similar a los superconductores.

Para el correcto funcionamiento de las películas también deben considerarse las capas de amortiguamiento, que reducen la expansión térmica, disminuyen la interdifusión y otras reacciones químicas entre la película y el sustrato. En electrónica, el uso de las películas superconductoras puede ser pasivo, cuando modifica una señal o entrada (aplicaciones de microondas), o activo, en que modifica la entrada de una manera no lineal (uniones de Josephson). Las películas delgadas tienen un espesor de 1 μ o menos, pero tienen un H_C mucho mayor que una muestra mayor del mismo material, incrementándose en proporción inversa a las veces que la profundidad de penetración, λ, excede el espesor [15].

³ A partir de una cara de un cristal o sustrato se hace crecer una capa uniforme y de poco espesor con la misma estructura cristalina que éste.

⁴ Mineral del grupo IV (óxidos) con estructura: alcalino + metal de transición + O₃.

Existen ciertas aplicaciones de los superconductores en tecnología de microondas, en este caso lo que se hace es reemplazar en los circuitos los metales ordinarios por películas superconductoras; la ventaja de hacer esto es que las películas tienen una menor resistencia en su superficie, cerca de un 30 % menos. Algunos ejemplos de los dispositivos en los que esta tecnología se ha utilizado son: osciladores de bajo ruido, circuitos filtro, líneas de retardo y arreglos de antenas. De hecho, los experimentos con microondas son de muy alta importancia en la tecnología de los superconductores, ya que proporcionan información importante sobre el desempeño de los cupratos: las mediciones de la resistencia superficial a las microondas se han convertido en una técnica estándar para determinar la calidad de los superconductores de alta temperatura.

Las líneas de transmisión superconductoras son usadas para transportar señales de alta frecuencia de una parte del sistema a otra; estos dispositivos sirven para conectar los chips de silicón en las computadoras (Ver Fig. 2.3).

Las líneas de retardo con tecnología superconductora son usadas para almacenar una señal por determinado periodo de tiempo (menor que un mili-segundo) para recobrarlo después con la mínima distorsión y utilizarlo subsecuentemente en pantalla o en operaciones de computadoras, radares y tecnologías de la comunicación.

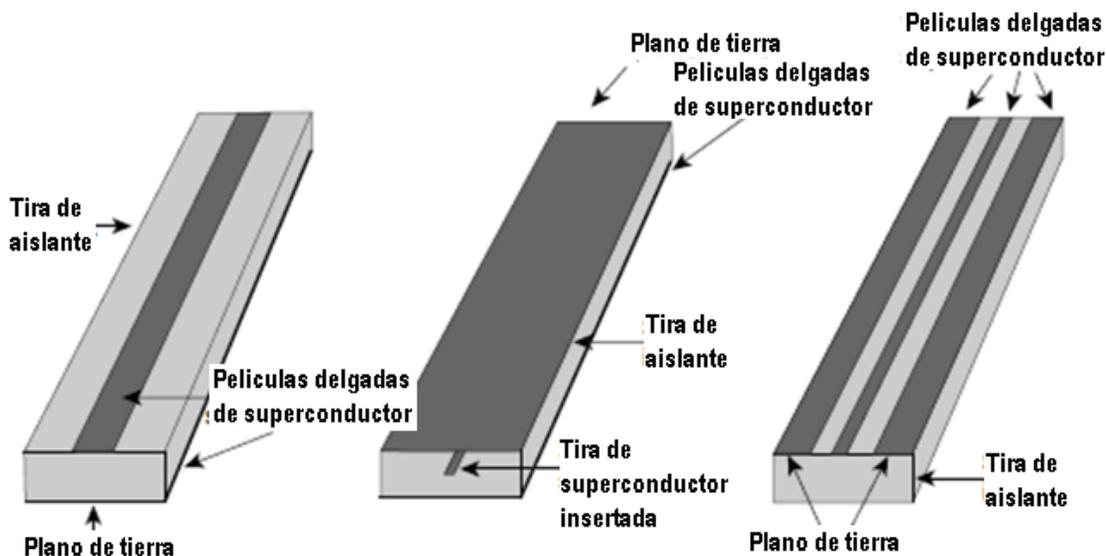


Fig. 2.3 Tipos de dirección de ondas superconductoras. Las líneas conductoras, incluyendo aquellas de tierra están hechas de películas superconductoras (sombreado gris oscuro): Izq. micro-tira. Centro, tira insertada a lo largo del centro del aislante. Der. coplanar. En cada caso, el dieléctrico es mostrado en sombreado gris claro.

Los filtros son una red selectiva hecha con resistencias, condensadores, bobinas, circuitos integrados y sus combinaciones. Están diseñados para dejar pasar señales eléctricas comprendidas en determinada banda de frecuencia, mientras atenúa o bloquea el paso de otras. Un filtro convencional tiene un factor de calidad de 2500, mientras que en uno superconductor alcanza un factor de 40 000, además de permitir su miniaturización. En la telefonía celular, donde hay un crecimiento en la industria del 30 % anual, se usarán para evitar las interferencias entre señales con una respuesta más rápida; en las estaciones base se pueden instalar fácilmente con tecnología criogénica. Se pronostica que será el primer mercado a gran escala de los

superconductores de alta temperatura, con ventas potenciales superiores a los 100 millones de dólares al año [16].

Otro campo de aplicación de esta tecnología es en las comunicaciones espaciales, donde se requiere que el consumo de energía sea mínimo, debido a que el costo de poner una nave en órbita es directamente proporcional a su peso, cada Watt ahorrado y cada dispositivo miniaturizado sería un ahorro considerable. Además de esto, la detección de radiación ha resultado un campo muy interesante que fue aumentando su precisión con la aparición de los nuevos materiales. Por ejemplo, un bolómetro superconductor es un dispositivo que se utiliza para detectar la radiación; trabaja mediante un sensor con alta dependencia a la temperatura que es capaz de medir incrementos de temperatura muy pequeños producidos por incidencia de radiación electromagnética. Pueden medir longitudes de onda de rayos infrarrojos en un rango de 20-100 μ . Se utilizan en astronomía con la finalidad de investigar la formación de las galaxias [17].

2.1.2 Uniones de Josephson

Las uniones de Josephson tienen una amplia gama de usos en la tecnología computacional, hay muchos aparatos electrónicos que pueden utilizarlos como interruptores de altísima velocidad. Cuando la corriente excede los valores críticos, la unión de Josephson pasa a un estado de voltaje finito en el cual ocurre el efecto túnel con electrones simples. Entonces, existe un estado “cero” cuando hay una corriente sin voltaje aplicado y, al rebasar la corriente crítica, un estado “uno” de características normales, dando paso a un voltaje. Se ocupan en computadoras de muy alta velocidad ya que el paso del estado 1 al 0 y viceversa se da en cuestión de pico segundos (10^{-12} s). El valor de la corriente crítica depende del tamaño de la unión, del material superconductor y de la temperatura.

La estructura básica de las uniones de Josephson es: un sustrato, metal evaporado, aislante de 10^{-9} m y una segunda capa de metal; es decir, un sándwich metal-óxido-metal; sin embargo, existen otras construcciones que permiten tener el mismo principio de funcionamiento y su elección dependerá de la aplicación que se le dé y del material utilizado (Ver Fig. 2.4 y 2.5). En una unión de Josephson no se necesita un voltaje para mantener una corriente, pero si éste es aplicado, cada electrón ganará una energía de $2 eV^5$ que no usa y entonces será expulsada en forma de radiación; una onda electromagnética es asociada con los fotones emitidos y puede ser detectada, ya que emite ondas electromagnéticas. El funcionamiento de la unión de Josephson es tomado por un oscilador cuando se le aplica un voltaje (por ejemplo, un micro-volt denota una frecuencia de 484 MHz) y se usa también como fuente de radiación o como detector. Mantener un voltaje constante a través de la unión causa que la amplitud de onda de corriente oscile en el tiempo, además de la corriente directa, hay un efecto de corriente alterna. De forma contraria, la radiación especialmente del régimen infrarrojo puede ser absorbida por la unión y provocar un voltaje, esto se hace para usarlo como detector; es decir, puede medir el voltaje y arrojar la frecuencia, o viceversa [18].

⁵ $1 eV = 1,602176462 \times 10^{-19}$ Joules

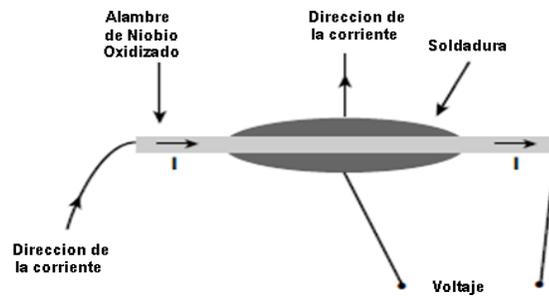


Fig. 2.4 Una forma temprana de la unión de Josephson fue el galvanómetro superconductor de baja inductancia (SLUG) hecho de una soldadura de plomo-estaño de aproximadamente 5 mm depositada en un alambre de Niobio. La corriente fluyendo a través del alambre crea un campo magnético circular alrededor de él. Cuando los dos finales del alambre de se unen para formar un anillo superconductor, el SLUG puede ser usado como un magnetómetro muy sensible. Este invento ha sido sustituido por uno mucho más sensible, el SQUID (Ver sección 2.1.3).

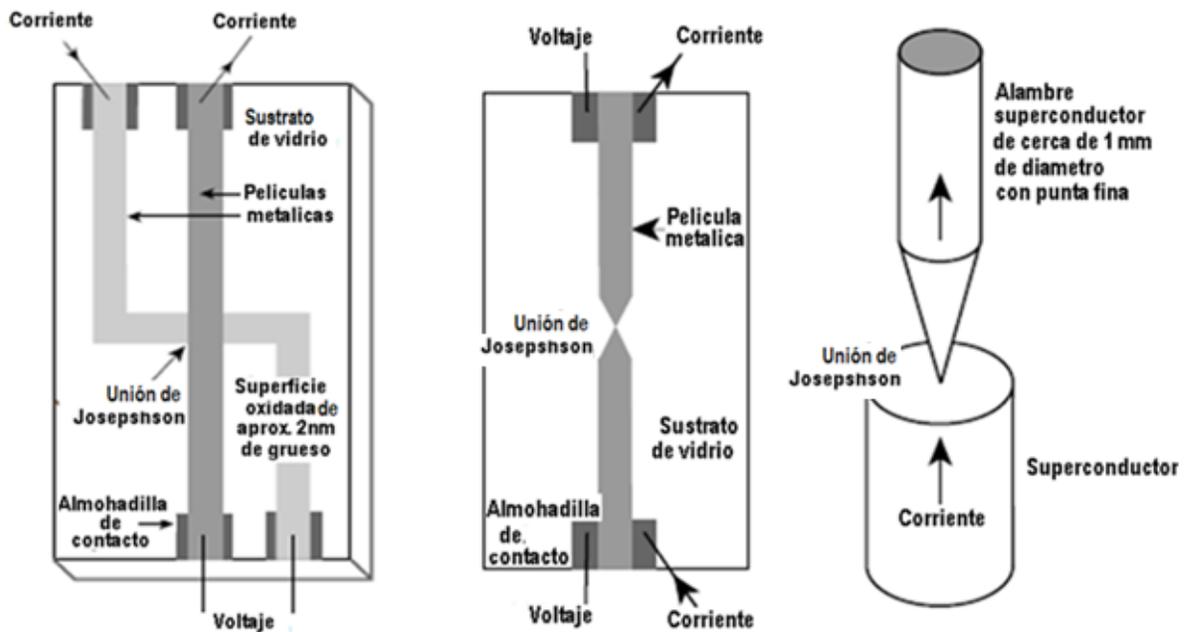


Fig. 2.5 Diferentes tipos de construcción de una unión de Josephson hecha mediante la evaporación de dos tiras metálicas sobre un sustrato; después de la película o alambre metálico se hace un ligero oxidado para lograr una delgada capa aislante. La unión es el área donde la capa superior cruza el aislante hasta la capa inferior.

2.1.3 SQUID

Los llamados SQUID (Dispositivos Superconductores de Interferencia Cuántica, por sus siglas en inglés) miden solo unas decenas o centenas de micras, y convierten cambios del campo magnético extremadamente pequeños en voltajes medibles. El funcionamiento se puede ver en un anillo que tiene dos brazos con uniones Josephson: se divide en dos la corriente inicial I , cuando un H pasa dentro del anillo se adiciona una corriente i , dando como resultado una alteración en el voltaje, que se mide al final (Ver Fig. 2.6). Un SQUID tiene la capacidad de detectar variaciones de campo del orden de 10^{-15} T, es el detector de campo magnético más sensible y puede medir

cualquier cantidad física que pueda ser convertida en campos magnéticos: medicina, geología, gravedad, etc. En los superconductores de alta temperatura hay límites de grano entre las regiones de los cristales simples que pueden actuar como uniones débiles y ser usados como SQUID's; explotando esta propiedad, se trabaja en técnicas para introducir límites de grano artificiales [5].

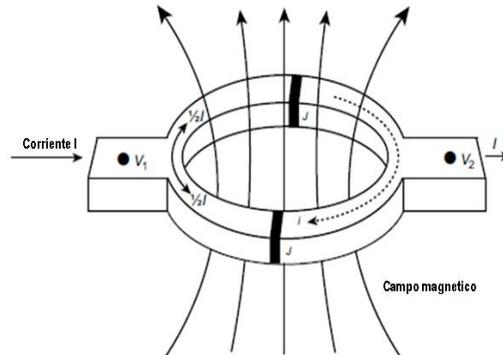


Fig. 2.6 El SQUID consiste en un anillo simétrico de dos brazos, cada uno con uniones de Josephson.

Aplicaciones médicas de los SQUID's: Se utilizan en pruebas no invasivas que permiten la observación de órganos como el cerebro y el corazón, que producen diminutos campos magnéticos, perceptibles mediante los superconductores. Usando un arreglo de SQUID's es posible generar un mapa espacial de los cambios del campo para correlacionarlos con anomalías. El magnetoencefalograma (MEG) emplea arreglos de más de 300 SQUID's para detectar campos de 10^{-15} T que son el rango de los impulsos eléctricos entre neuronas; están siendo utilizados para estudiar la interacción de los sentidos en el cerebro. Se ha desarrollado esta tecnología en una estructura parecida a un casco con la finalidad de estar lo más cerca posible de la cabeza, pudiendo obtener todos los campos magnéticos, sus gradientes y establecer cualquier dirección en que se generen; también se estudia cómo los centros cerebrales pueden operar y combatir enfermedades como epilepsia y tumores (Ver Fig. 2.7). Se ha descubierto que la fuerza de los campos magnéticos en las distintas áreas del cerebro reflejan las habilidades que son generadas en ese punto. También se conoce ahora que las partes del cerebro que procesan cierta información (habilidades) son capaces de ser reorganizadas mediante su entrenamiento. El uso de los nuevos superconductores de alta temperatura (con enfriamiento en N_2) facilita el uso de los SQUID's, ya que permite posicionarlos muy cerca del cuerpo humano.

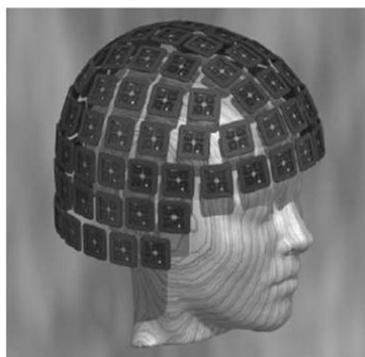


Fig. 2.7 Arreglo de sensores SQUID tipo casco para una magnetoencefalografía de 306 canales que ha sido utilizada en la unidad de investigación del cerebro en la universidad tecnológica de Helsinki [19].

Otros estudios eléctricos que utilizan SQUID's para grabar señales magnéticas del cuerpo humano ya han obtenido magnetogramas de casi todos los órganos humanos, recolectando señales de 5×10^{-7} Oe⁶, aunque aún están lejos de llegar al límite de precisión de los dispositivos (Ver Fig. 2.8). Por sobre otras técnicas exploratorias, ésta no es agresiva y permite trabajar directamente con el órgano o región afectada; por ejemplo, el magnetograma de un embrión puede diagnosticar tempranamente una arritmia, disminuyendo el riesgo de daño al cerebro del feto pero de no contar con esta tecnología, un electrocardiograma tendría que trabajar a través de los órganos de la madre.

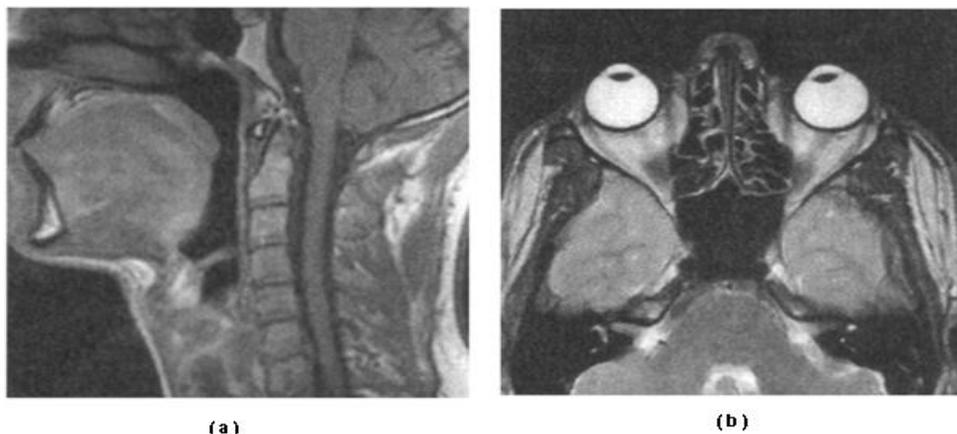


Fig. 2.8 (a) Ejemplo de una imagen sagital del cuello, mostrando los discos. (b) Imagen transversal de la cabeza [20].

Aplicaciones geofísicas de los SQUID's: Estas aplicaciones ya están comercialmente disponibles y son muy importantes ya que son necesarias en áreas remotas. Un arreglo de SQUID's puede producir un mapa magnético de una determinada región de la Tierra, encontrando depósitos de petróleo, minerales y fuentes geotérmicas. Trabajan midiendo la impedancia de la superficie de la tierra a diferentes frecuencias (magnetotelurgia) conociendo también la estructura de la corteza terrestre. Además del mapeo, los sensores basados en SQUID's son muy usados en geofísica para medir las oscilaciones del campo magnético, ya que pueden medir oscilaciones de 1×10^{-18} T.

Aplicaciones en análisis de fractura: En la industria aeronáutica es especialmente importante el mantenimiento de las aeronaves, ya que están sometidos a cambios climáticos extremos que provocan fracturas y corrosión aún por debajo de la superficie. Un sistema que genera corrientes eddy es usado en conjunto con SQUID's para analizar el mapa de campo magnético del avión en regiones no visibles y encontrar anomalías que pudieran dar aviso de un desperfecto en la nave.

Otros instrumentos han sido creados o modificados para hacerlos mucho más sensibles: flujómetro de turbina operado en helio, sensores infrarrojos para las aplicaciones en naves espaciales (Ver Fig. 2.9), sistemas aisladores de vibración y en turbo bombas de los motores de cohetes, voltímetros, termómetros (sensibles hasta 10^{-6} K), detectores de radiación electromagnética, así como los mejores estándares de voltaje y otras constantes físicas dando como consecuencia mediciones 10 veces más precisas que con los instrumentos convencionales [21].

⁶ Unidad del campo magnético en el sistema cegesimal. $1 \text{ Oe} = 1 \times 10^{-4} \text{ T} \approx 79,577 \text{ A/m}$.

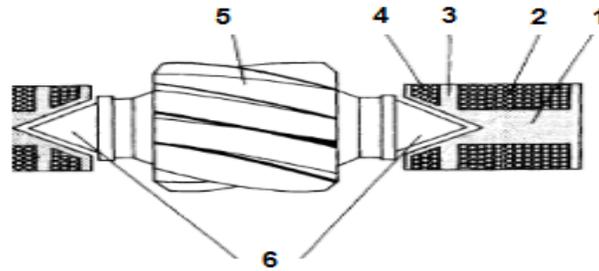


Fig. 2.9 Flujómetro de turbina con rodillos superconductores. 1, Soporte fijo de acero inoxidable; 2, bobina principal; 3, separación entre bobinas; 4, bobina radial; 5, rotor de aluminio; 6, tapas de niobio.

2.2 Aplicaciones de grandes longitudes

Los imanes han sido la base de las aplicaciones de grandes longitudes de este tipo de tecnología. A partir del siglo XIX se comenzaron a reemplazar los imanes permanentes por electroimanes, ya que estos últimos son más prácticos y logran alcanzar rangos de varias docenas de miles de Oe, inimaginable en ese entonces para los imanes permanentes. Un electroimán es una bobina de alambre con corriente; el campo magnético que genera es directamente proporcional al a fuerza de la corriente y al número de vueltas que tiene (ver Fig. 2.10).



Fig. 2.10 Solenoides superconductores en el instituto de energía atómica I.V. Kurchatov, Moscú.

Es importante recordar el fenómeno de cero resistencia de los superconductores: una vez que el campo magnético ha sido cargado mediante una corriente en un alambre superconductor, sin resistencia no se necesita más potencial eléctrico para mantenerlo, ya que no habrá pérdidas de energía. Cuando se comenzaron a utilizar los superconductores con este fin, los del tipo I presentaron problemas inmediatamente, al encontrar un límite en un campo crítico demasiado bajo; después del descubrimiento de los superconductores de tipo II, los intentos comenzaron de nuevo. Compuestos como el Nb_3Sn permitieron la fabricación de un amplio rango de electroimanes compactos, capaces de generar campos magnéticos muy grandes y a un costo mucho menor que con los superconductores convencionales.

2.2.1 Cables y sistemas eléctricos

El valor de la corriente crítica en un superconductor es de gran interés técnico en cuanto al uso del campo magnético; para las aplicaciones prácticas es muy importante obtener las corrientes más altas posibles, pero siempre se debe dejar un límite de seguridad antes del valor crítico, ya que si las bobinas regresaran a su estado normal, se provocaría una reacción en cadena que

destruiría el sistema. Repentinos cambios locales en la corriente, ya sea de temperatura o de campo magnético pueden causar inestabilidades conocidas como saltos de flujo, es decir, si una pequeña región vuelve a ser normal, ocurrirá un efecto avalancha que afectaría toda la bobina volviéndola inestable rápidamente, además de provocar un sobrecalentamiento del nitrógeno, éste llega a ebullición rápidamente y los gases aumentando su volumen pueden provocar un grave accidente. La solución que se ha dado es darles un recubrimiento estabilizador a los cables superconductores con un material que tenga mejores propiedades conductivas que el material superconductor en estado normal, este sistema en un ambiente criogénico permite enfriar rápidamente la región que se calentó y regresarla a su estado superconductor.

El alambre superconductor es muy diferente al que se usa actualmente en el campo eléctrico, como se verá a continuación. El material superconductor más usado para la fabricación de alambre es la aleación NbTi de tipo filamento continuo y que tiene una cobertura de Cu o CuNi, ya que presenta un comportamiento plástico adecuado para su manufactura e inclusive ya es fabricado a gran escala en algunos países (Ver Fig. 2.11). Se puede encontrar en rangos comerciales de 0,1 - 0,5 mm de diámetro cada filamento, y en cable, cada 400 filamentos transportan 200 A (aprox. 1 T), hasta los 6 000 A. Hay otra aleación que presenta mejores rangos, Nb₃Sn, soporta hasta 100 000 Oe y $J > 10\,000\text{ A/mm}^2$ (contra un cable de cobre de uso normal que soporta una $J < 2\text{ A/mm}^2$), sin embargo sus propiedades físicas lo hacen poco apto para su manufactura en alambre, es muy frágil, difícil de trabajar y el costo de su obtención es más alto que el NbTi [22].

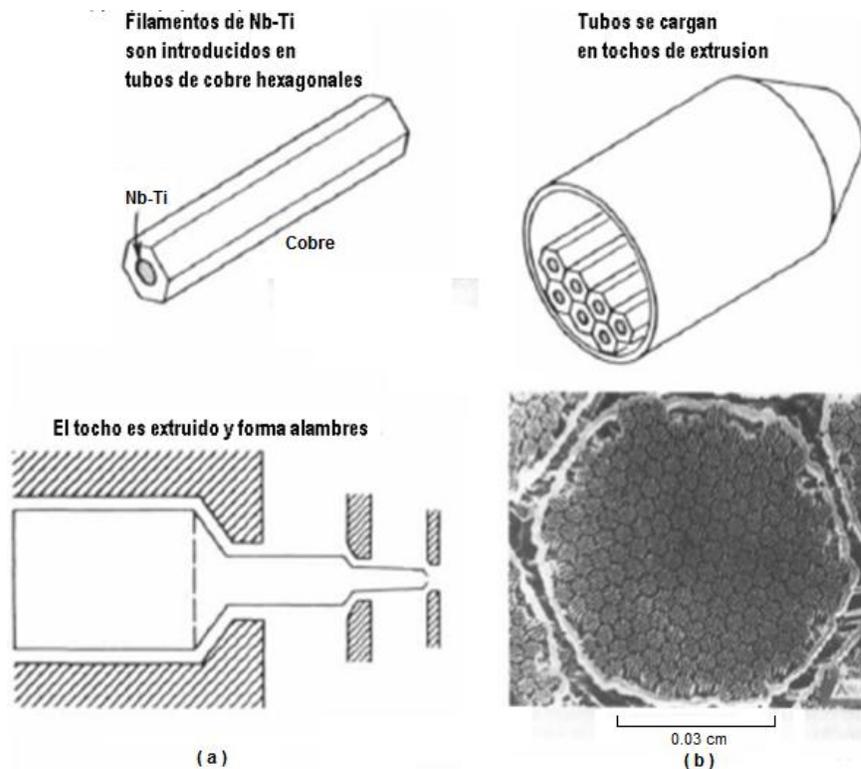


Fig. 2.11 (a) Pasos en la manufactura de superconductores compuestos de dos temperaturas. (b) Fotografía de la sección transversal de un superconductor compuesto multifilamento.

Entonces, el diseño de cables se ha convertido en un punto crucial en el desarrollo de la tecnología superconductor, se necesita cubrir requerimientos contradictorios y encontrar el equilibrio adecuado entre ellos: los recubrimientos de cobre le dan una mayor estabilidad al sistema, pero implican más peso y disminuyen la densidad de corriente media, además de esto, la baja resistividad del cobre elimina las inestabilidades por calentamiento, pero incrementa las pérdidas por un campo magnético variable. También hay una amplia creencia que el costo de un cable superconductor es mucho más alto que uno de cobre, esto está fundado en el hecho de que un kilo de material superconductor cuesta mil veces lo que uno de cobre, sin embargo, esta visión es muy limitada: en realidad, es mucho mayor el costo de todo el alambre de cobre que se necesita para transportar corrientes de la misma fuerza que transporta uno superconductor, aunado al peso y a las dimensiones totalmente imprácticas.

Hay varias técnicas de fabricación de cable superconductor de baja temperatura, aunque de manera general se puede describir como un proceso de estirado que forma un paquete de hilos muy delgados de alambre (diámetros incluso menores a 0,1 mm), este paquete es cubierto de cobre y entrelazado con otro paquete; esta operación se repite hasta que se tiene un compactado de decenas de miles de hilos; debido a que el cable entero será enfriado por medios líquidos, se deben dejar canales especiales en la matriz de cobre (Ver Fig. 2.12, 2.13).

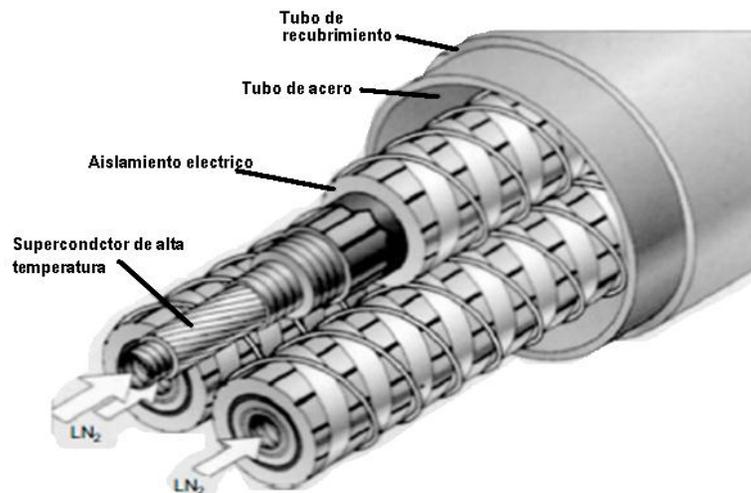


Fig. 2.12 Diseño para un cable comprimido de enrollado espiral, temperaturas y cintas superconductoras. El nitrógeno líquido fluye en ductos a lo largo del núcleo.

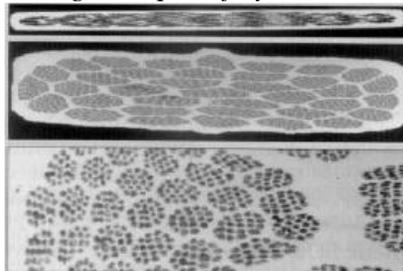


Fig. 2.13 Sección transversal de superconductores de alta temperatura de alambres multinúcleo. Arriba, una cinta de BSCCO de dimensiones 4.1 mm x 0.2 mm. Centro, una cinta comprimida de YBCO de dimensiones 3x0.6 mm de 36000 filamentos. Abajo, vista aumentada de un paquete de filamentos. Las cintas fueron hechas por “American Superconductor Corporation” [23]

En los superconductores de alta temperatura, la evolución de los procesos de manufactura de cables avanza cautelosamente, por ejemplo, en relación a la generación y distribución de electricidad en los últimos años se ha estudiado el uso de los cupratos de base Y y Bi, que ya han sido fabricados en proporciones de varios kilómetros por algunas compañías; también son mencionados en la literatura los de base Tl y Hg. Al igual que los de baja temperatura, los cerámicos superconductores también necesitan un recubrimiento de metal conductor debido a su naturaleza quebradiza y no dúctil. Las opciones económicamente más viables son matrices de aluminio y cobre, pero se han encontrado propiedades poco satisfactorias al estar en contacto con las perovskitas a las temperaturas de manufactura de los superconductores; por el contrario, la plata ha funcionado bastante bien y permite al oxígeno difundirse fácilmente a través de ella, lo que además de beneficiar el proceso de manufactura, da mayor estabilización y alineamiento de grano.

Para trabajar con cerámicos superconductores, el proceso de manufactura es diferente al descrito anteriormente: los componentes son completamente pulverizados y mezclados en proporciones adecuadas, son acomodados en una especie de contenedor cilíndrico de plata y son estirados y distendidos hasta que forman filamentos de 1 mm de espesor, varios de éstos son puestos juntos y enrollados para formar cintas de 4 a 6 mm de espesor, se enrollan en un ovillo y se les aplica un proceso de templado o recocido por varios días bajo una atmósfera al alto oxígeno. Los materiales que han dado mejores resultados debido a la alineación de grano es el de base Bi en cubierta de Plata (Ver Fig. 2.14).

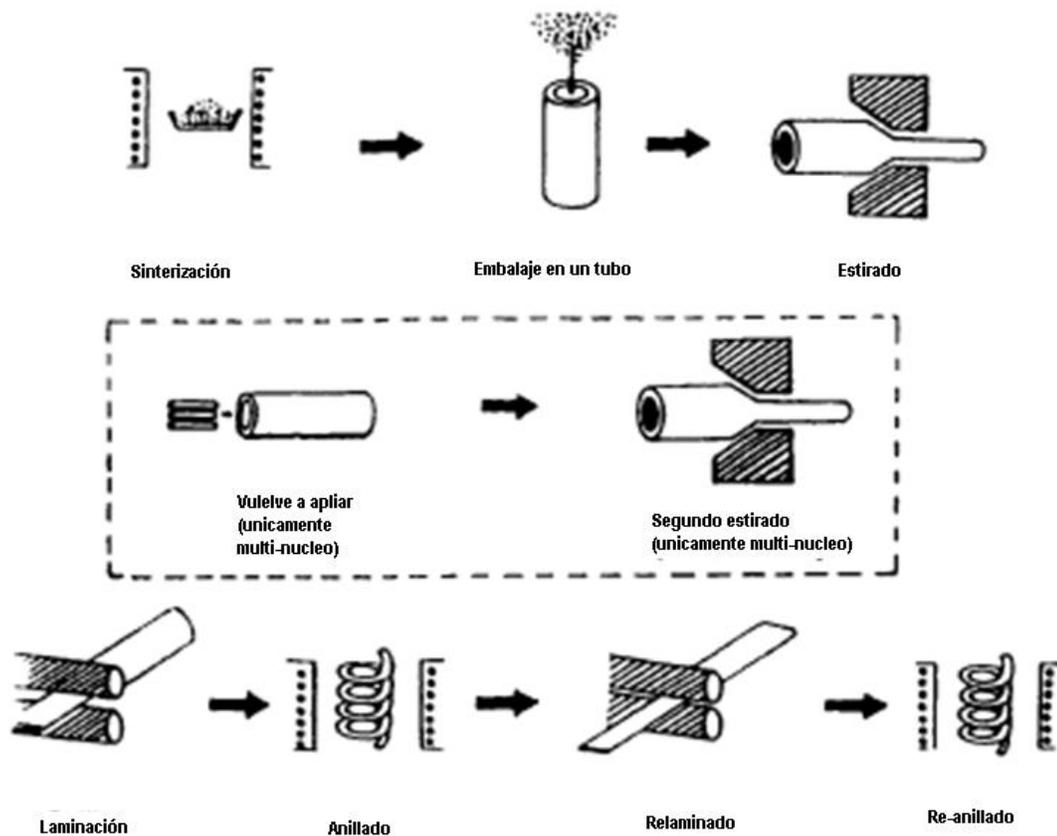


Fig. 2.14 Esquema de pasos en el proceso de elaboración del alambre superconductor base bismuto BSCCO con recubrimiento de plata.

Pensando en la infraestructura necesaria para la distribución de la electricidad, existen dos formas en que se pueden utilizar los cables superconductores: a) en líneas continuas sostenidas por torres, de una manera económica, prácticas en su colocación y mantenimiento, pero altamente expuestas a las inclemencias del medio ambiente, desagradables a la vista y rechazadas por la población (bajo la idea de ser afectados por la radiación electromagnética); y b) por vías subterráneas, que evita la mayoría de los problemas expuestos, pero cuyos elevados costos la pueden llegar a hacer impensable. En algunos pequeños poblados de Europa se ha utilizado la infraestructura ya existente para la distribución convencional de energía (subterránea y con enfriamiento por aceite) y se han instalado prototipos a escala real con la esperanza de su lanzamiento en forma comercial dentro de unos años; utilizando los cables superconductores se ahorra espacio y se puede transportar una densidad de corriente mayor en las mismas instalaciones, permitiendo distribuir una mayor cantidad de energía que con la red eléctrica existente (Ver Fig. 2.15).

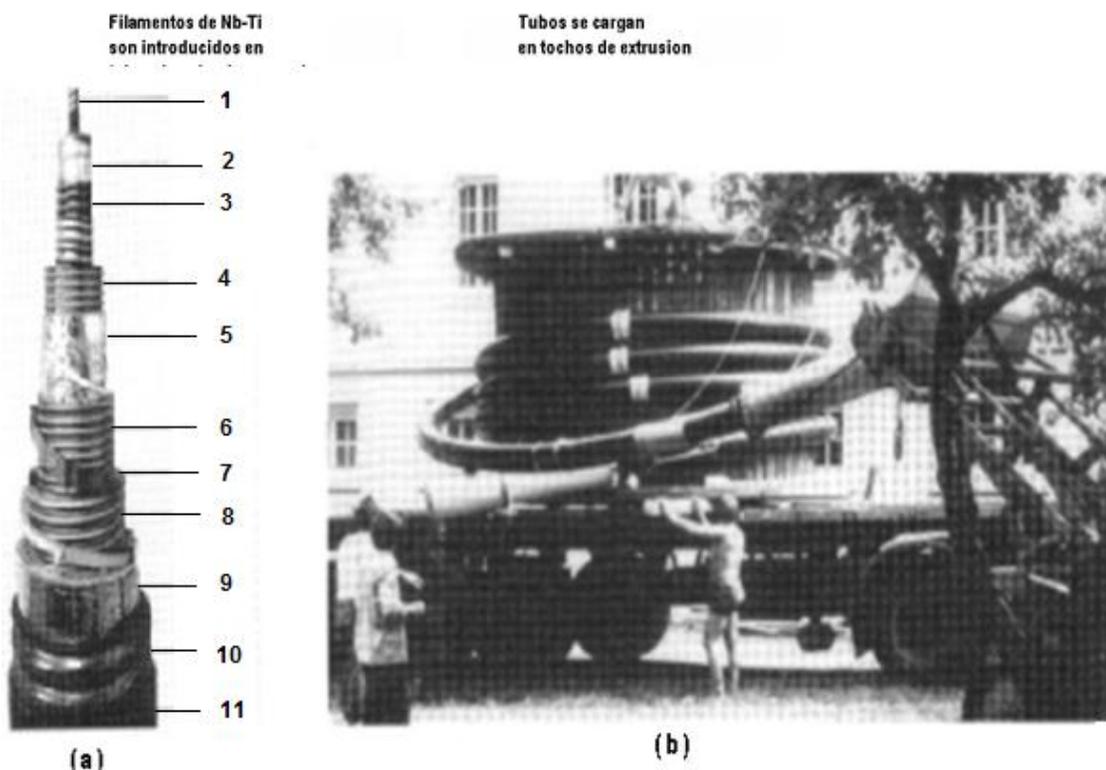


Fig. 2.15 Prueba al aire libre de cable de corriente alterna en Arnstein. (a) El cable totalmente flexible: 1, conductor activo; 2, aislamiento; 3, escudo protector; 4, núcleo de aislamiento; 5, aislamiento + espaciador al vacío; 6, 7, 8, ductos de nitrógeno líquido; 9, aislamiento + espaciador al vacío; 10, tubo exterior con funda anticorrosión; (b) El tamaño del cable.

Cualquier diseño de cables necesita al menos dos cables para hacer posible el transporte hacia y desde determinados puntos; cada cable es enfriado con nitrógeno líquido fluyendo a través del centro del mismo y en cada subestación, a kilómetros de distancia, se colecta el nitrógeno y se vuelve a enviar a la siguiente subestación con una bomba.

Otra aplicación posible en la distribución de energía es en los transformadores de corriente; se disminuirían las pérdidas debidas al calentamiento y el tamaño y peso de estos dispositivos también disminuirían considerablemente. En materia de protección al ambiente, el refrigerante en los transformadores es potencialmente peligroso y contaminante, en comparación con el nitrógeno que es relativamente inofensivo y forma de por sí parte natural del medio ambiente.

Los usos de los superconductores en una línea de poder no están limitados a las ventajas de enfriamiento, como es apreciable en los limitadores de corriente, una más de las aplicaciones prácticas de las propiedades de estos materiales. Cualquier corto circuito dentro de una línea de poder puede producir una rápida reducción de la impedancia de la red y su correspondiente oleada de corriente (conocida como falla de corriente). Ya que un corto circuito se puede producir por efecto de un rayo o de una rama caída, las líneas de transmisión deben ser capaces de reaccionar muy rápidamente. Idealmente debería tener cero impedancia en operación normal y una muy grande en situaciones extremas, debe tener una rápida detección y respuesta a oleadas de corriente y ser capaz de recobrase casi de inmediato. Como se puede apreciar, la propuesta de implementar el material superconductor es altamente viable al ser considerado como ideal un limitador de corriente así, debido a su rápido cambio de cero impedancia en estado superconductor a una alta impedancia en estado normal y a su capacidad de pasar rápidamente de un estado a otro (menos de un ciclo) en función de su J_C .

2.2.2 Generación de energía

Una de las más interesantes aplicaciones de los superconductores son los motores y generadores eléctricos. El factor clave en el diseño de estos mecanismos es la alta densidad de corriente que pueden llevar, en comparación con las bobinas fabricadas de cobre. Al poder cumplir con los requerimientos de corriente con longitudes menores de alambre, los motores y generadores son más compactos y ligeros (Ver Fig. 2.16). Los generadores de CA producen energía eléctrica de forma más eficiente que cualquier otro medio, y pueden generar potencia a voltajes normales de transmisión, eliminando la necesidad de transformadores especiales en las estaciones. Actualmente hay muchos proyectos de diseño de generadores superconductores en el mundo entero.

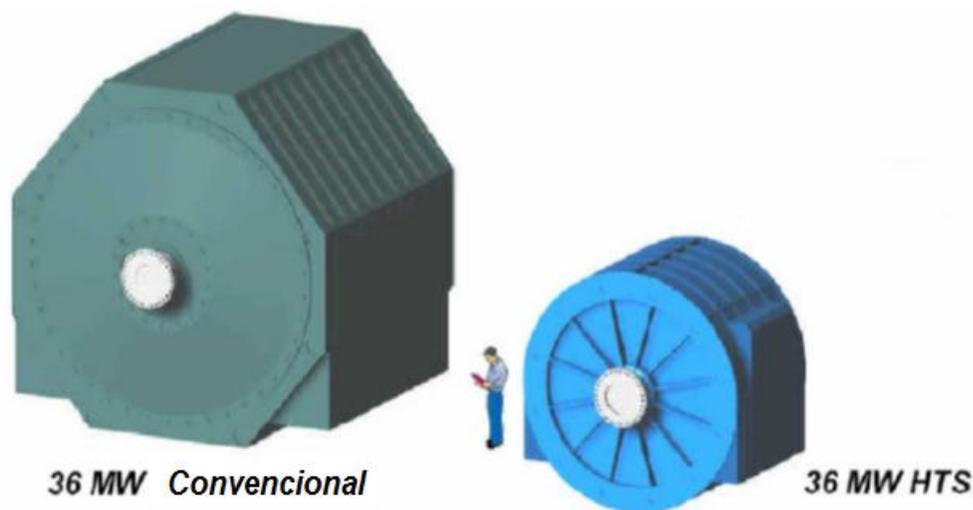


Fig. 2.16 Comparación del tamaño de un generador convencional y otro con tecnología superconductora, ambos generando la misma potencia.

El funcionamiento de aparatos de energía eléctrica tales como el generador de CD, el alternador y el transformador se basan en el principio de la inducción electromagnética: se induce un voltaje cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético; también se puede inducir una FEM en un conductor estacionario si se tiene un campo magnético que se mueve de forma que sus líneas corten al conductor. La cantidad de FEM inducida en cualquier conductor es proporcional a la velocidad con que éste corta las líneas: cuando un conductor corta 100 millones de líneas por segundo, se induce una FEM de 1 V. Puesto que se trata de una velocidad de corte de líneas, la velocidad de rotación y el número de líneas afectarán la FEM inducida.

Para hacer el análisis del principio de inducción electromagnética, se puede pensar en un generador fundamental con dos polos, N y S, que crean el campo magnético. La bobina se monta sobre un eje de forma que pueda girar dentro del campo magnético; esta parte se llama inducido; sus conductores, que realmente son los dos lados de la bobina, cortan las líneas del campo magnético y se induce un voltaje en ellos. En los generadores reales las bobinas tienen un gran número de vueltas y por lo tanto un gran número de conductores. Esto da lugar a una mayor FEM inducida, ya que cuando se conectan los conductores en serie, sus voltajes se suman. Cada conductor cortará dos veces al flujo en una revolución [24]. Entonces, para obtener la FEM inducida en el generador, se usa la fórmula:

$$FEM = \frac{2\phi S}{60 \times 10^8} \quad (2)$$

El funcionamiento del generador requiere del giro del inducido por medio de una fuerza mecánica externa, obteniéndose entonces energía eléctrica en las escobillas del generador. Con el fin de tener un campo magnético más fuerte, se utilizan electroimanes, que se denominan bobinas inductoras y constan normalmente de muchas vueltas de alambre muy fino. El inducido consiste en unas cuantas bobinas situadas en las ramas de un núcleo.

En un motor convencional las bobinas de campo son puestas en las ranuras del rotor. El rotor es hierro puro y el estator es un comprimido de hojas de hierro magnético. En la versión superconductora las diferencias en el diseño son enormes: las bobinas de campo están apoyadas en tubos de torque coaxial, el estator de hierro magnético ha sido eliminado, los tubos de torque sirven de soporte a la torsión, pero también contienen las fuerzas centrífugas de las bobinas de campo y las enormes fuerzas magnéticas resultantes de los intensos campos magnéticos, y las bobinas de armadura (contenidas en las ranuras del estator en un generador convencional) es ahora un núcleo de aire. Se adiciona un escudo magnético externo que confina el flujo magnético rotativo al generador, principalmente por razones de seguridad y un escudo magnético interno que previene la introducción de corrientes eddy en el rotor (Ver Fig. 2.17) [25].

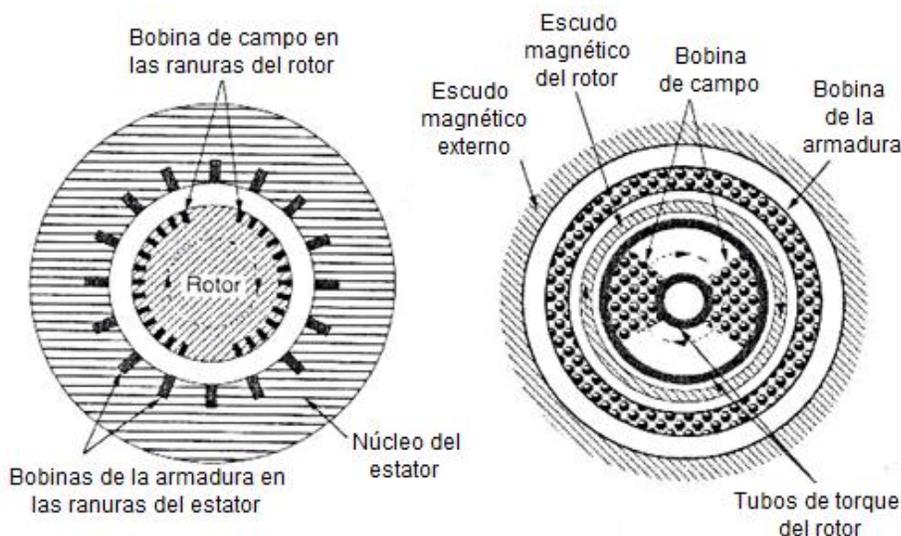


Fig. 2.17 Izq. Generador convencional; Der. Generador superconductor.

De todas estas modificaciones se consiguen ventajas en diversas formas: una bobina de campo superconductor mejoraría la eficiencia de un generador, reduciría el peso y tamaño de la maquinaria y permitiría densidades de corriente mucho mayores, todo lo cual es de enorme importancia en materia energética. Además, la eliminación del hierro magnético provee varias ventajas:

- La inductancia reactiva de la armadura es reducida, resultando en un mejor desempeño dinámico del generador y mayor regulación del voltaje.
- El espacio para las bobinas de la armadura se incrementa, lo que aumenta la densidad de potencia y la eficiencia del generador.
- Las necesidades de aislamiento en la armadura se reducen y puede ser entregado un voltaje más alto a las terminales. Una terminal con voltaje más alto puede eliminar la necesidad de un transformador de paso.

También se podría pensar en simplemente reemplazar las bobinas de cobre por un material superconductor y mejorar la eficiencia debido a la resistencia cero al flujo de corriente, pero eso no afectaría el límite que se tiene en cuanto a la densidad de flujo máxima, ya que esas son características de saturación del hierro; entonces se utiliza un núcleo de aire, que es capaz de producir densidades de flujo mucho mayores que el acero.

Los generadores superconductores, aunque se benefician mucho de las altas densidades de corriente que los superconductores pueden lograr, no necesitan las más altas densidades que son posibles en estos materiales ($100\ 000 - 200\ 000\ \text{A/cm}^2$), solo necesitarían unos $15\ 000\ \text{A/cm}^2$. Están planeados para dar abasto a grandes necesidades de suministro de energía, por sobre los 500 MVA, pero esto se irá desarrollando con el paso de los años [26].

Mientras que el uso de los superconductores de baja temperatura es un hecho en los generadores, los de alta temperatura aún no han dejado de ser prototipos debido a varios factores, principalmente la necesidad de la manufactura de los cuerpos superconductores que permitan las

mismas cantidades de densidad de corriente en altos campos magnéticos. Aun así, existen numerosas ventajas de usar los de alta temperatura, como ya se ha mencionado anteriormente.

Se están construyendo generadores experimentales en muchas partes del mundo: EUA con GE ha construido uno de 20 MVA y el MIT, con apoyo del departamento de energía, han construido diez generadores listos para operar en un ambiente real; en Japón Hitachi construyó uno de 50 MVA y Mitsubishi tiene seis de 30 MVA; en Europa hay muchos prototipos que han sido presentados y están en periodo de prueba, pero aun de pequeñas capacidades (300 kVA), y así un sinnúmero de proyectos en etapa de investigación se presentan prometedores ante una nueva etapa de la tecnología.

Para los momentos pico del día en que las estaciones llegan a ser insuficientes, hay necesidad de utilizar ciertas reservas que fueron guardadas en horas de baja demanda, para esto se utilizan unos rotores de alta velocidad conocidos como volantes, los cuales proveen un sistema natural de almacenamiento de energía y movimiento angular. Los sectores de potencia comenzaron hace años a utilizar el volante, ya que este tipo de almacenamiento economiza la generación de energía, ya sea eólica o nuclear, permite generar energía en un momento y utilizarla en otro, y mejorar la calidad de la potencia al evitar las fluctuaciones. Un rotor volante posee y puede almacenar energía cinética debido a su velocidad de rotación; este almacenamiento es particularmente útil porque puede convertirse fácilmente en energía eléctrica y viceversa. Uno de los límites en el uso de estos cuerpos rotativos son las pérdidas por fricción y calentamiento en los cojinetes convencionales. En la búsqueda de disminuir las pérdidas por fricción, en los 90's se construyeron gran variedad de rotores superconductores que usaban anillos de YBCO; se usa este material porque puede permanecer en estado superconductor a un campo magnético superior al del BSCCO. Su manufactura es relativamente económica ya que se pueden fabricar de fibra de carbono y materiales epóxicos; además, es capaz de almacenar energía cinética de varios kW*h presentando vibraciones en el límite de las 30 000 rpm. La posibilidad de sacar provecho de los periodos de baja demanda mediante los volantes es un atractivo y más eficiente uso de la infraestructura [27].

2.2.3 Grandes campos magnéticos

Las aplicaciones de imanes de alto campo magnético (aunque hasta ahora la mayoría se hacen solamente con propósitos de investigación, para trabajar dentro de los laboratorios) comprenden: dispositivos de almacenamiento de energía magnética, diagnóstico médico por imagen por resonancia magnética, imanes para uso en física nuclear (aceleradores de partículas y botellas magnéticas), sistemas de transporte por levitación magnética, sistemas de potencia por fusión, mecanismos magneto-hidrodinámicos y separación magnética de materiales.

Una de las más importantes y lucrativas aplicaciones de los superconductores es en el campo médico, la Resonancia Magnética Nuclear (NMR⁷ por sus siglas en inglés) es una herramienta de diagnóstico muy importante que ha llevado a la medicina a dar enormes avances en el entendimiento del cuerpo humano. Esta técnica aprovecha la propiedad de algunos núcleos como el de hidrogeno para mostrar una respuesta de resonancia a la radiación electromagnética débil.

⁷ Fue descubierta en la década de 1940 por Félix Bloch, de Stanford y Edward Purcel, de Harvard; los hizo acreedores al premio Nobel de física en 1952.

El análisis de respuesta nuclear de diferentes partes del cuerpo permite obtener una lámina de contraste de los tejidos, aun los más suaves. Una de las causas más importantes para utilizar un diagnóstico de este tipo es el cáncer; Paul Lauterbur y Peter Mansfield obtuvieron el premio Nobel en psicología o medicina por su experimentación en este tema de diagnóstico. La NMR también ha sido una excelente herramienta de investigación en los campos de física, química y biología.

Haciendo una comparación con los rayos X, estos últimos no dan una imagen 3D (no distinguen profundidad), no distinguen los tejidos suaves, y no tienen la capacidad de distinguir las diferentes densidades de los tejidos, es decir, no proveen información cuantitativa. Los rayos X han evolucionado a tomografías asistidas por computadora, pero siguen presentando el mismo problema básico que en un principio: exponen a cuerpos vivos a peligrosas radiaciones iónicas. Por otro lado, la técnica de NMR es más poderosa e inofensiva; se han estudiado por años las posibles complicaciones después de una irradiación por fuertes campos magnéticos sin haberse relevado alguna aun. De su nombre se eliminó la palabra “nuclear” para incrementar su aceptación general, adquiriendo el nuevo nombre de imagen por resonancia magnética (MRI por sus siglas en inglés).

Para una imagen completa, pequeñas secciones a través del cuerpo se examinan independientemente. El núcleo de interés de la MRI es el protón de hidrógeno contenido en las moléculas de agua del cuerpo: un fuerte campo es aplicado a lo largo del objeto de investigación, para que los núcleos se alineen con el momento magnético a lo largo del campo, algunos de los núcleos de hidrogeno preceden⁸ (precesión: movimiento asociado con el cambio de dirección en el espacio que experimenta el eje instantáneo de rotación de un cuerpo) juntos en fase, y cuando la radiofrecuencia es apagada, el núcleo continua precediendo y genera una radiofrecuencia similar, la cual puede ser detectada por un receptor colocado cerca; después de un tiempo la precesión termina y el núcleo se alinea una vez más con el campo; el tiempo que esto toma, conocido como tiempo de relajación, es medido y provee la información requerida acerca de la naturaleza del tejido bajo estudio. Un electroimán superconductor crea un campo magnético en el interior de una cavidad cilíndrica de la MRI, cuya fuerza es de 15000 a 20000 Oe [28]. Las primeras MRI usaban imanes convencionales, pero los superconductores son capaces de proporcionar campos más fuertes (de 1 a 2 Teslas) que son uniformes en un diámetro de un metro y estables a lo largo del tiempo. Su mantenimiento también ha sido todo un logro de simplicidad, ya que su control es completamente independiente y lo único que hay que vigilar es el nivel de Nitrógeno líquido.

El uso de los superconductores en la MRI fue sugerido idealmente en 1971, manufacturándose la primera MRI superconductora en Oxford Instruments Ltd. y utilizada en el Hammer Smith Hospital (UK, 1979); su producción a gran escala comenzó en 1982, y para 1985 ya había 300 piezas, doblando esta cantidad al año siguiente y llegando a 5000 piezas en la década siguiente; el día de hoy hay miles de estos instrumentos alrededor del mundo, siendo ésta la primera aplicación a gran escala de los superconductores (Ver Fig. 2.18).

⁸ Precesión: movimiento asociado con el cambio de dirección en el espacio que experimenta el eje instantáneo de rotación de un cuerpo.



Fig. 2.18 Imagen por resonancia magnética.

Hay investigaciones e inventos que solo han sido posibles después de conseguir campos magnéticos extremadamente fuertes mediante sistemas superconductores, tal es el caso del Tokamak-15, que fue construido con la finalidad de obtener y estudiar plasma a muy altas temperaturas, que sirve para la fusión termonuclear (Ver Fig. 2.19). Este tipo de reactores comenzaron a construirse en la década de 1950.

La demanda de energía a nivel mundial en los últimos años se ha incrementado de una manera alarmante y aun una tercera parte de la población mundial no cuenta con energía eléctrica. Está estimado que los combustibles fósiles durarán aun cerca de 200 años mas, pero los niveles de contaminación, el calentamiento global y las repercusiones a la salud que el uso de estos combustibles tienen como consecuencias, nos obliga a investigar formas alternas de producción de energía eléctrica. Por otro lado, los desastres de Chernobyl y Three Mile Island dejan claro que la fisión nuclear (energía nuclear) tampoco es la solución más viable ya que produce efectos radioactivos que afectan a la vida por cientos de años. Y otras fuentes como el viento y el sol solo se han podido aprovechar para cubrir pequeños porcentajes del total de la energía utilizada.

Pero hay otra alternativa, la fusión nuclear. Este tipo de generación tiene un gran potencial y no es dañina al ambiente, es barata y prácticamente no tiene límites, es decir, no se agotaría. El proceso de fusión se lleva a cabo cuando los núcleos ligeros de los átomos se unen para producir núcleos más pesados, pero el producto final tiene levemente menos masa. Se basa en la famosa $E=mc^2$ (si ocurre una reacción nuclear y la masa es menor que la de los componentes, entonces la pérdida de masa será convertida en energía). Ya que la velocidad de la luz, es muy grande y su cuadrado aún más, la conversión de pequeñas cantidades de masa dan como resultado grandes cantidades de energía, es por eso que hay tantos esfuerzos en volverla una realidad. Los productos finales de la fusión no son radioactivos, el problema es que este proceso solo ocurre en condiciones extremas. En los 30's se apreció que la fusión es la fuente de energía del sol al convertir hidrógeno a helio. Se intenta producir reacciones similares en los laboratorios como una fuente barata y abundante de energía eléctrica (en el proceso se siguen utilizando turbinas convencionales).

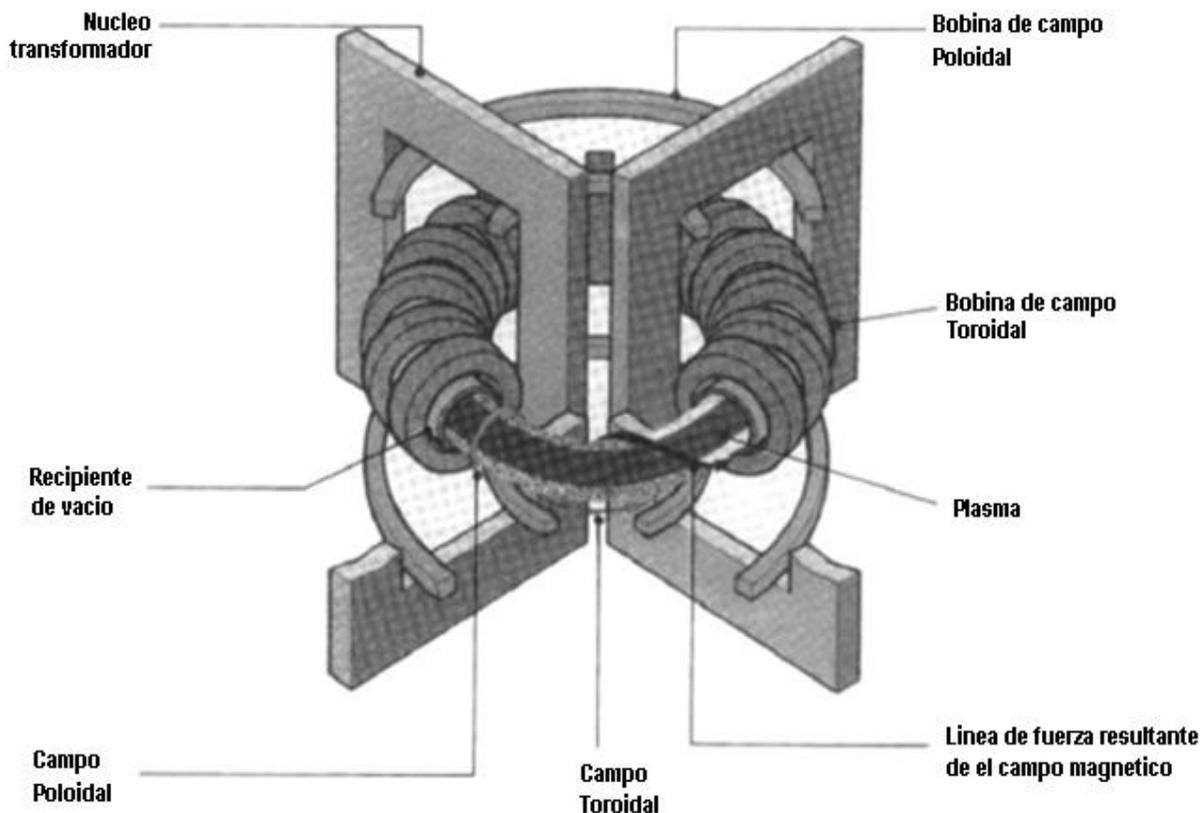


Fig. 2.19 Representación de un Tokamak.

La fusión ha demostrado prácticamente no tener límites al economizar la energía, pero la principal dificultad radica en que solo se puede llevar a cabo a temperaturas extremas de millones de grados centígrados. A estas temperaturas, los electrones de las orbitas externas de los átomos son removidos y la colección resultante de electrones e iones forman un plasma, caracterizado por tener una alta conductividad térmica y eléctrica. El plasma tiene que estar confinado dentro de un contenedor sin tocar las paredes, ya que serían inmediatamente vaporizadas. Ya que es un buen conductor, puede ser contenido por el tiempo suficiente para que el proceso de fusión se realice en una “botella magnética” creada por un arreglo conveniente de fuertes imanes; los iones y electrones no viajan en línea recta, sino que siguen la órbita en espiral del campo magnético, evitando de esta forma que se “escapen”. Es necesario que estén confinados en sistemas superconductores, ya que solo éstos pueden proveer el campo necesario de varios Teslas y los gradientes de campo requeridos.

La configuración más simple de este arreglo es un anillo llamado “Torus”. El Tokamak tiene un anillo de 2,5 m de diámetro que es un sistema magnético superconductor dentro del cual es confinado el plasma; el anillo consiste en un gran número de vueltas de alambre cubierto con un armazón y enfriado con Helio líquido. La corriente que puede ser obtenida alcanza los 3 700 A y la fuerza radial actuando en una bobina puede alcanzar los 98 kN [29].

Hay una parte de la investigación en física nuclear cuyo estudio no estaría completo sin la utilización de los superconductores, esto es, el trabajo realizado en la cámara de burbujas y los aceleradores de partículas. Este tipo de trabajos tienen como objetivo aumentar el conocimiento de la naturaleza de las partículas fundamentales y las condiciones del principio del universo.

En la década de 1950 Donald Glaser trabajó en un proyecto que le hizo ganar el Premio Nobel: la cámara de burbujas. En un líquido supercalentado, el paso de rayos cósmicos u otras radiaciones provoca una ebullición que hace visible el camino de las partículas; en presencia de un campo magnético, la partícula puede ser identificada por su tipo de trayectoria en la cámara. Mientras que esta observación necesite mas y mas energía para funcionar, serán necesarios cada vez imanes más poderosos, lo cual es relativamente fácil de lograr con electroimanes superconductores.

Por el lado de los aceleradores de partículas, los dos complejos más grandes que funcionan exitosamente son los del CERN en Ginebra y el FERMILAB, en Chicago; la mayoría de los aceleradores hacen uso de enormes imanes y bobinas superconductoras para buscar los destellos de las partículas. El campo magnético fuerte y estable que presentan los superconductores es una ventaja decisiva en comparación con los imanes convencionales, ya que es necesario experimentar con partículas colisionando en el rango de los TeV (10^{12} eV). Uno de los colisionadores más importantes es el Large Hadron Collider (LHC) en el CERN, Ginebra; tiene un anillo de 27 km de circunferencia que hace colisionar a los electrones a 14 TeV, es la aplicación de imanes superconductores más grande del mundo. Y el diseño del acelerador más ambicioso es el Superconducting Super Coilled (SSC), tiene dos enormes anillos magnéticos de mas de 90 km de circunferencia y podría acelerar los protones a 20 TeV en direcciones opuestas antes de colisionarlos; las orbitas circulares usan imanes superconductores para generar un campo magnético de 6,6 T; sin embargo, este proyecto quedó parado hace algunos años debido al alto costo de construcción y los pocos resultados satisfactorios que mostró en sus etapas de prueba. La construcción de imanes es una operación internacional: además de los miembros del CERN, Canadá, Japón, India, Estados Unidos y la ex Unión soviética participan activamente en estos proyectos. Por ahora esta tan solo en consideración el uso de los superconductores de alta temperatura, ya que la mayoría de los aceleradores utilizan materiales tipo II [30].

Ahora hay que regresar a las aplicaciones fuera de los laboratorios y regresa a la industria. Actualmente ya se usan imanes superconductores en ambientes industriales para la separación magnética de materiales. Se suspenden en un líquido los materiales a separar para formar un compuesto acuoso y pasarlo a través de un campo magnético; las diferentes partículas son deflectadas por diferentes cantidades, resultando en la separación de los diferentes materiales. Por ahora la aplicación principal es la purificación de caolín, usado en cerámicas y en la industria del papel. También es posible purificar el agua por procesos que utilizan sedimentación por magnetismo, siendo expuestas y arrastradas algunas partículas por separadores de grandes campos magnéticos. Los superconductores pueden generar mayores campos magnéticos y sus gradientes consumiendo menos energía, pero el sistema criogénico llevado a las minas (curiosamente, método llevado a la práctica en Sudamérica) no es viable, aunque el avance a los superconductores de alta temperatura y enfriamiento con Nitrógeno, facilita esta tarea.

2.2.4 Levitación magnética

Comenzando ahora con las aplicaciones de la levitación, se verá una tecnología que ha sido relevada a segundo plano en la maquinaria, sin embargo, extremadamente importante: los cojinetes o asientos para el eje sin fricción. Hay de tipo lineal y rotativo, y su objetivo es permitir el movimiento entre dos partes de una máquina con un mínimo de resistencia, desgaste, ruido,

fricción y calor. En el tipo no magnético existen básicamente tres tipos de cojinetes: elementos rotativos (balines), basados en fluidos (hidrostático o hidrodinámico) (Ver Fig. 2.20) y basados en gas (aerostático o aerodinámico). Los cojinetes o rodamientos con sistemas electromagnéticos incluyen ferromagnéticos, sistemas de campo eléctrico, superconductores e híbridos. En los imanes permanentes, por el teorema de Earnshaw se concluye que al menos un grado de libertad será inestable, pero se soluciona normalmente por medios mecánicos (Ver Fig. 2.21). La controversia es en torno a si los cojinetes basados en superconductores pueden reemplazar a los sistemas electromagnéticos convencionales completamente desarrollados.

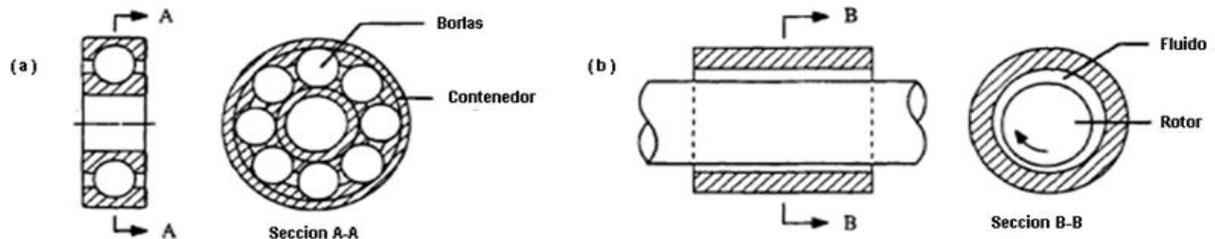


Fig. 2.20 Diagramas de dos sistemas de cojinetes convencionales: (a) cojinetes con balines, (b) cojinetes con fluido.

Como se vio anteriormente, la levitación se produce en los superconductores ya que la exclusión del flujo magnético induce una corriente de apantallamiento con un campo magnético asociado, que es exactamente igual pero opuesta al del imán permanente. Mientras más cerca del superconductor este el imán, más fuerte será la repulsión. El material superconductor más apto para esta función (conocido al momento) es YBCO, ya que es capaz de mantener la levitación hasta a 300 kPa [Japan Sumo Wrestler].

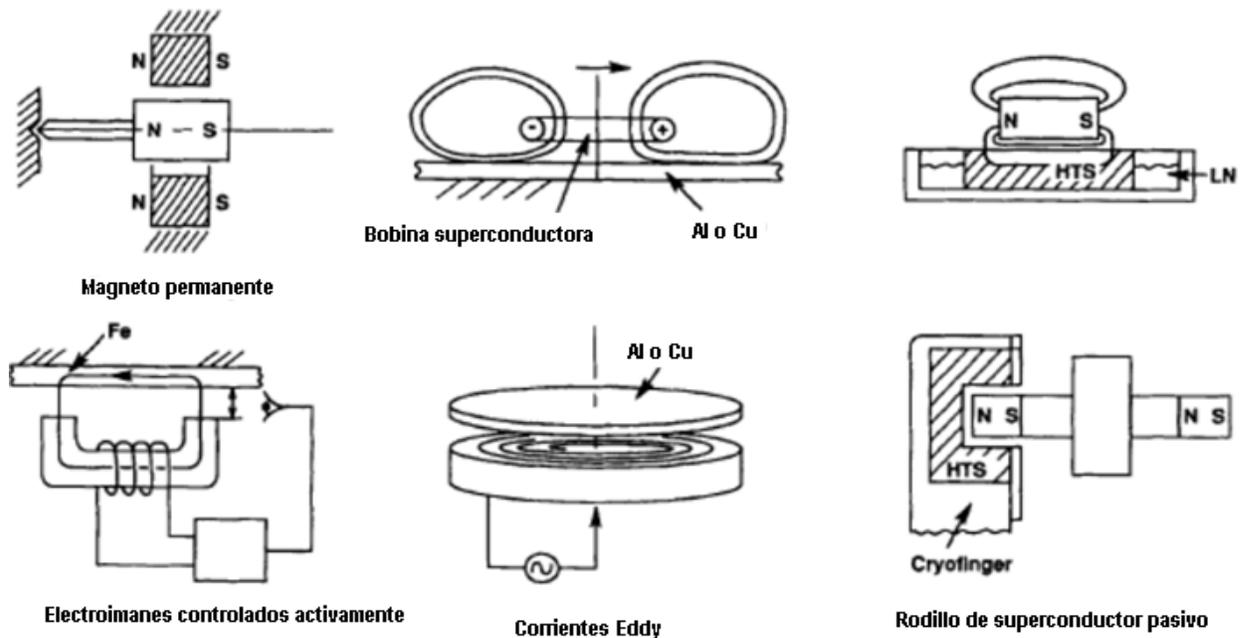


Fig. 2.21 Diferentes sistemas de cojinetes magnéticos.

Un cojinete magnético consiste de los siguientes subsistemas: rotor ferromagnético, estator ranurado multi-polo devanado con un conductor normal, medidores de proximidad sensibles a la

posición en dos planos, tablero electrónico de control, fuente de alimentación para proveer corriente a las bobinas del estator y la trayectoria del circuito, proveída por material acero-silicón o hierro-vanadio-cobalto. Se llegó a creer que no serían prácticos debido al arrastre de flujo, pero posteriormente se comprobó que una fuente magnética perfectamente simétrica puede rotar alrededor de su eje cerca de un superconductor tipo II sin resistencia al torque.

En cuanto a los cojinetes superconductores, a través de los años sus capacidades han ido en aumento de manera constante, ya sea aumentando su velocidad o su capacidad motora, desafiando las creencias que en un principio se tenían sobre las capacidades de la levitación. Un modelo de 1988 con un rotor de 5 g y dos cojinetes de YBCO rotó a velocidades de 120 000 rpm; en 1992, en rotores de 10 g se lograron 500 000 rpm por la Allied Signal Corporation y fueron confirmados por la construcción de varios otros rotores en rangos similares: Rigney & Trivedi, 1992, Crapo & Lloyd, 1990, Delprette et al, 1992, Fukuyama et al, 1991 y Rao & Bupara, 1992. Posteriormente otros laboratorios reportan velocidades de 5 000 - 30 000 rpm en rotores de 1-10 kg [31]; Allied Signal Co. (Tokio) levitó un componente de 120 kg sin rotación; actualmente hay laboratorios industriales que manejan rotores de 2 - 4 kg a 30 000 rpm y de hasta 100 kg a 10 000 rpm (Ver Fig. 2.22).

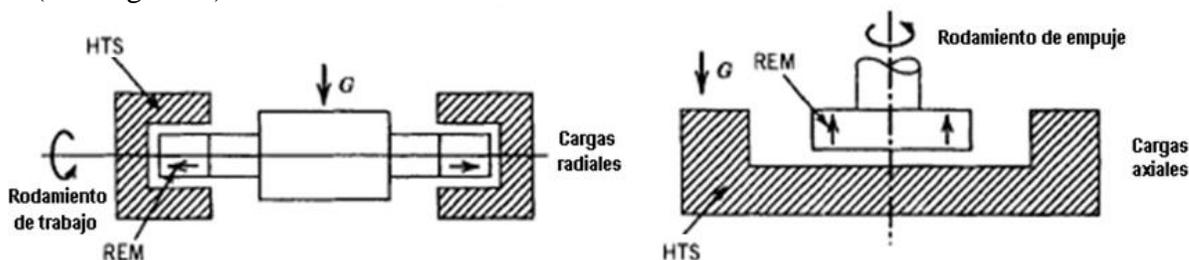


Fig. 2.22 Conceptos de cojinete superconductor pasivo. REM: imán de tierras raras; HTS: superconductor de alta temperatura.

A través de los años la tecnología magnética ha crecido en muchas áreas, y ahora esta tecnología es capaz de suspender trenes de 50 ton y rotores de 1 ton. Sin embargo, el problema principal de los cojinetes activos continúa siendo su inestabilidad pasiva, el uso de complejos sensores y actuadores, así como su costo. El desarrollo de los sistemas superconductores ofrece estabilidad a estos sistemas, pero aún no es comparable el tiempo de estudio de estos últimos con el de los sistemas magnéticos activos tradicionales.

Ya que la fuerza y la magnetización son cantidades vectoriales, uno puede definir la dirección de las fuerzas magnéticas relativas a la geometría magneto-superconductor. Hay 2 configuraciones básicas: Carga axial y carga radial (Ver Fig. 2.23). Es deseable tener una fuente de campo magnético que tenga una simetría respecto al eje de rotación. Si uno quiere diseñar un cojinete híbrido para ambas cargas, axiales y radial, el cojinete estator q es el superconductor no necesita ser simétrico y puede ser fabricado en configuraciones de monolítico o elemento discreto.

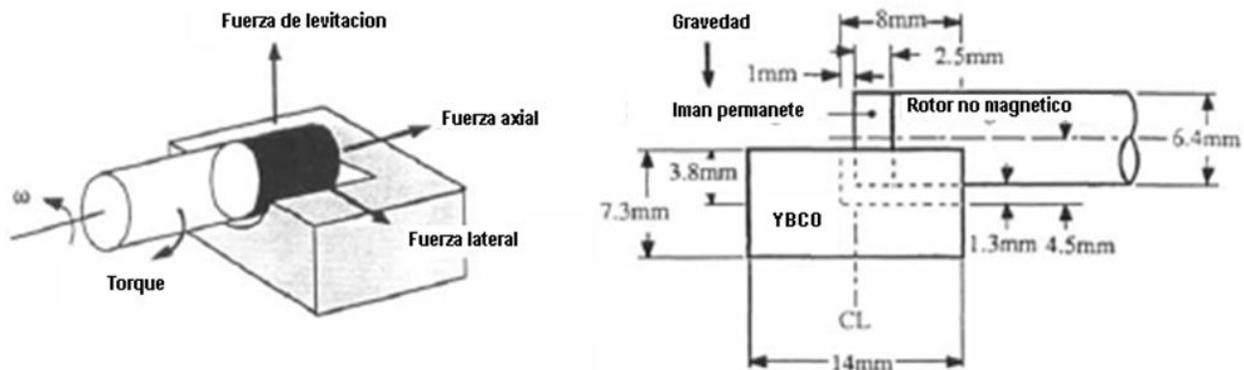


Fig.2.23 Diagrama de un cojinete superconductor YBCO. [31]

Uno de los parámetros de comparación de las propiedades de diversos superconductores es el promedio de presión de amortiguamiento, que es la fuerza de levitación dividida entre el área del imán proyectada en dirección de la fuerza. A ciertas J_C todos los superconductores tienen similares presiones de amortiguamiento, pero el mejoramiento de los procesos de fabricación de materiales optimiza la configuración del campo magnético.

La caracterización del material superconductor para aplicaciones de levitación depende de la intensidad del campo, distribución de las propiedades locales y su geometría. La fuerza de levitación entre la fuente de un campo y un superconductor es un efecto integral, se deben poder medir las propiedades del sistema integrado: relación fuerza-distancia, fuerza magnética (rigidez) y amortiguamiento. Existen sistemas completos de medición de las fuerzas de levitación [32, 33]. El desempeño de la fuerza de levitación depende de la historia del campo. En un sistema superconductor - imán, la fuerza de levitación aumenta al disminuir la temperatura. La forma de variar el campo en la superficie del superconductor es variar la distancia geométrica entre ambas.

Las aplicaciones potenciales de los cojinetes magnéticos lineales y rotatorios abarcan un amplio rango de tecnología: giróscopos, herramientas de alta velocidad, volantes de almacenamiento de energía, ruedas de momento angular para las naves espaciales, escáneres rotativos para dispositivos ópticos e infrarrojos, shutters ópticos de alta velocidad, centrifugadoras, cojinetes de micro-máquinas, turbinas criogénicas, bombas criogénicas de cohetes, vehículos espaciales y sistemas en tierra, lanzadores espaciales, cojinetes de motores de aviación, bombas de tuberías de gas subterráneas, husillos de alta velocidad para manufactura de textiles, cortador de haz de partículas, dispositivo de almacenamiento para computadoras, paletas de transporte lineal para procesos en vacío, etc. Las aplicaciones que crean productos de alto valor agregado podrían justificar el costo adicional por proveer un ambiente criogénico. Se estima, por ejemplo, que un cojinete superconductor reducirá las pérdidas de poder en un 70% en un enfriador criogénico de ciclo Brayton reversible. Algunos híbridos ya tienen aplicaciones en la NASA desde hace aproximadamente 15 años, como una bomba criogénica de 450 kg de fuerza de levantamiento que opera a 15 000 rpm. Las aplicaciones iniciales en EUA se enfocan en pequeñas turbinas levitadas para aplicaciones espaciales, ya que tienen un ambiente criogénico natural y pasan hasta 15 años sin necesitar mantenimiento alguno (Ver Fig. 2.24). También se propuso la utilización de cojinetes superconductores como amortiguamiento para las aplicaciones espaciales de microgravedad; es decir, aislar partes de maquinaria cuando la nave experimenta una gran aceleración (Ver Fig. 2.25).

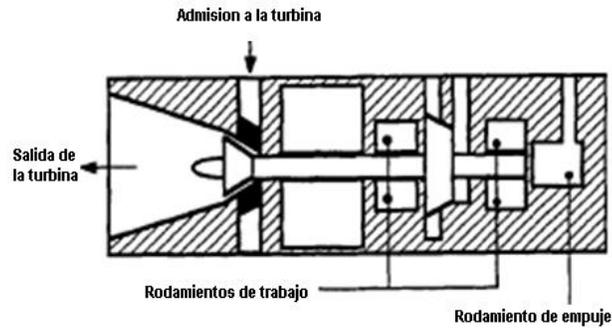


Fig. 2.24 Diseño de una turbina miniatura usando cojinetes superconductores de alta temperatura [5].

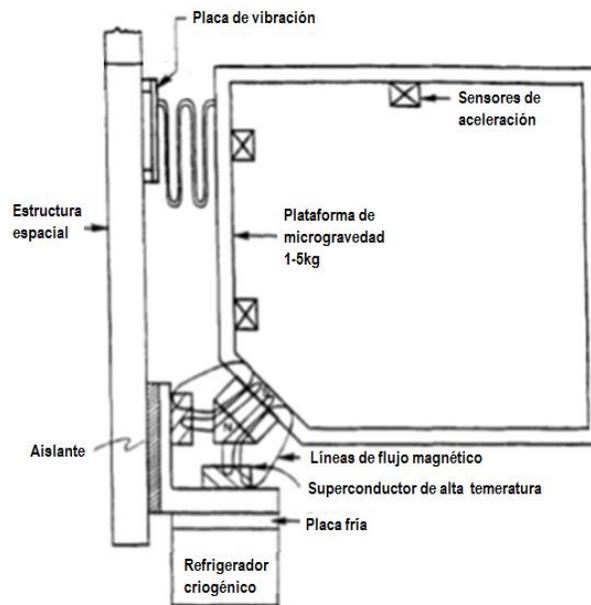


Fig. 2.25 Diseño para un amortiguador magnético superconductor para aplicación espacial en microgravedad.

Continuando con las aplicaciones de la levitación, a continuación se trata la más famosa de ellas: el tren Maglev (del inglés Magnetically Levitated Vehicles). Aunque el interés en los medios de transporte terrestre masivos se vio opacado por la introducción del Boeing 707, a la fecha, por factores más bien humanos, de preferencias personales, no han desaparecido las comunicaciones terrestres a cortas y grandes distancias: el Shinkansen (Japón), el Train à Grand Vitesse, TGV (Francia), el Atlantique, el Intercity Express (Alemania), el X-2000 (Suecia), el TALGO (España) y el Pendolino (Italiano) dan muestra de ello, aunque ninguno excede los 300 km/h y por lo tanto no son considerados de alta velocidad.

Los trenes no exceden una velocidad de 350 km/h debido a la fricción y a la necesidad de estabilidad contra vibraciones. Un conductor moviéndose a través de un campo magnético experimenta una fuerza de repulsión (Ley de Lenz) similar a un imán pasando sobre un conductor. En el Maglev hay una interacción entre los electroimanes superconductores puestos a bordo de un vehículo y las bobinas en el suelo que causa la levitación sobre la guía. Por este

sistema se pueden obtener velocidades mayores a los 500 km/h, que contaminan mucho menos y reducen el nivel de ruido (Ver Fig. 2.26).

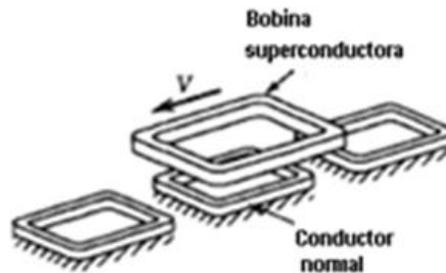


Fig. 2.26 Interacción de las bobinas superconductoras a bordo del tren Maglev y la vía.

Actualmente existen una variedad de proyectos pioneros de diseño y construcción de Maglev en Japón, Alemania y Estados Unidos: el Instituto Técnico de Ferrocarriles de Japón construyó el *Linear Motor Car* en una línea de prueba de 7 km y su última versión cuenta con una línea de 43 km uniendo Tokio y Osaka, alcanza los 500 km/h en una ruta directa a través de las montañas, pasando a través de túneles; en Alemania los estudios con imanes permanentes empezaron en Siemens hace más de 30 años, con la idea de unir Berlín y Hamburgo con el tren *M-Bahn* y luego con un sistema atractivo que fue construido para el *Transrapid-07 (TR-07)*, pero su viabilidad ha sido afectada por muchos factores: técnicos, de seguridad, económicos, ambientales y sociales, sin poder llegar hasta la fecha a volverlo una realidad de transporte comercial; Estados Unidos propuso en repetidas ocasiones la construcción de este tipo de trenes con el apoyo alemán para ciudades como Florida y California, incluso se llegaron a planear las rutas que atravesarían estos trenes y se construyeron 4 prototipos superconductores. Estos trenes tienen capacidades para poco más de 100 pasajeros, presentan una capacidad de inclinación de hasta 15°, tienen 4, 8 o 12 imanes superconductores en las orillas del tren (Ver Fig. 2.27) y algunos tienen amortiguamiento secundario con aire, se mueven en el rango los 500 km/h, pero aún no pueden transportar pasajeros (Ver Tabla 2.2). El primer Maglev comercial opera desde el 2004 entre el Centro de Negocios de Shangai y su aeropuerto internacional (Ver Fig. 2.28, Tabla 2.3), alcanza una velocidad mayor a los 430 km/h y cubre la distancia de los 30 km en 8 minutos (comparado con los 45 min de viaje en auto, es una enorme ventaja comercial) sin embargo, aun utiliza electroimanes convencionales creando un sistema de levitación atractiva.

Tabla 2.2 Especificaciones de diseño de Maglev.

Velocidad	134-150 m/s
Pasajeros por vehículo	50-120
Longitud del vehículo	30-38 m
Vehículos por tren	1-8
Potencia máxima por vehículo	4-5 MW
Empuje máximo	60-120 kN
Radio de curva máxima	400 m
Dimensiones frontales	3.5 m x 3.5 m
Velocidad de arranque	20-50 m/seg
Brecha magnética	40-75 mm
Masa magnética por vehículo	7-12 Mg

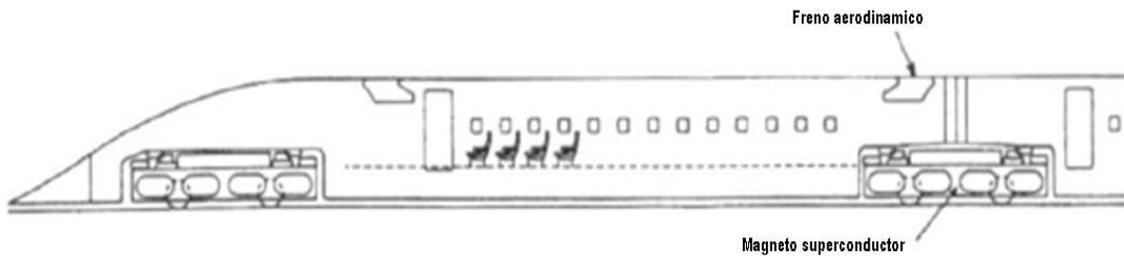


Fig. 2.27 Configuración del vehículo Maglev.



Fig. 2.28 Fotografía del vehículo Maglev Japonés; velocidad nominal de 500 km/h.

Tabla 2.3 Comparación del costo y desempeño de diferentes sistemas.

Parámetro	TGV	TR07	U.S. Maglev
Carriles guía (millones de usd)	22.3	19.6	17.6
Rango de costos capitales iniciales (millones de usd)	17.2-33.4	30.4-49.3	26.6-45.4
Velocidad crucero (mph)	200	311	300
Tiempos de aceleración con máximo empuje (s)			
0-180 mph	408	107	36
0-300 mph	-	240	58
Angulo total de banqueo (°)	7	12	30

[U.S. Mag-Lev Nacional Reporte final, septiembre 1993]

Los vehículos levitados magnéticamente tienen dos formas de trabajo básicas: levitación electromagnética (EML) o atractiva, que desarrollan una brecha de separación pequeña con los rieles ferromagnéticos (de aproximadamente 1 cm) y es relativamente inestable; y la levitación electrodinámica (EDL) o repulsiva, la cual emplea grandes imanes que generan un campo magnético de 2-3 T y pueden crear una brecha de hasta 30 cm, siendo su propulsión un motor lineal (Ver Fig. 2.29). En ambos casos, la interacción entre las corrientes de las bobinas guía-carril y las bobinas del vehículo crean elevación, arrastre y fuerzas de orientación. La guía debe estar equipada con una secuencia de bobinas de propulsión que son secuencialmente activadas

para producir un viaje o camino de ondas magnéticas. En muchos diseños, un bloque de guía (2-4 km) va siendo activado con un vehículo viajando a 100 m/s siendo energizado por 20 segundos. Cada bloque es alimentado por CA o CD desde una subestación local y cada una de las subestaciones son alimentadas en turno por una planta eléctrica regional [34].

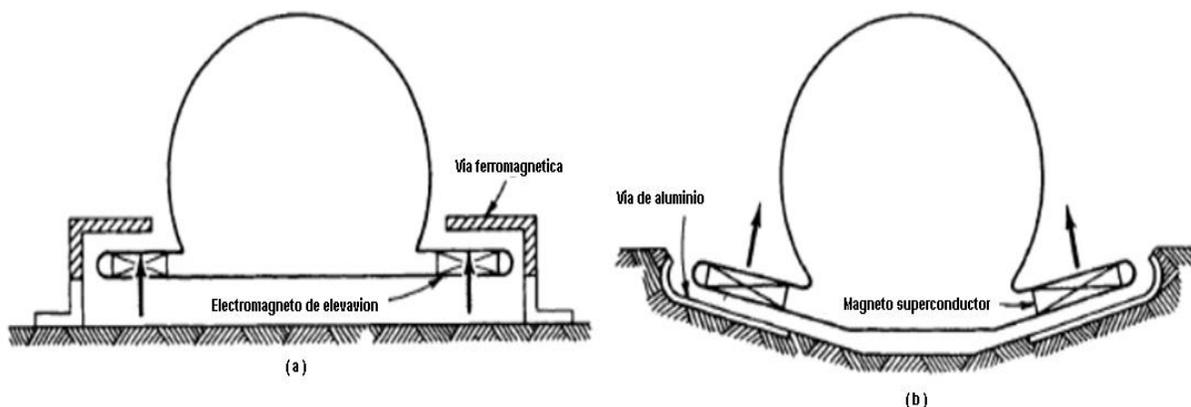


Fig. 2.29 Diagramas de dos sistemas de transporte Mag-Lev.
 (a) Levitación electromagnética (EML por sus siglas en inglés) o método atractivo.
 (b) Levitación electrodinámica (EDL por sus siglas en inglés) o método repulsivo.

Hay varios puntos que deben ser considerados a fondo cuando se plantea la construcción de un medio de transporte de esta naturaleza: a) ya que se estima que entre el 75-80% del costo de construcción de un sistema de transporte de alta velocidad será para la guía o riel, el costo y diseño del mismo es de importancia crítica, independientemente de si el vehículo es sostenido por ruedas de acero o por fuerzas magnéticas; b) en cuanto a la producción de ruido, a 400 km/h el TR-07 es poco más silencioso que el TGV (por 5dB), pero a 500 km/h la pequeña brecha desaparece, ya que la aerodinámica y la aeroacústica toman dominio. Las conclusiones de Harris-Miller muestran que la aceptación del público hacia nuevos sistemas de transporte depende principalmente de efectos ambientales y humanos tales como el ruido; c) la eliminación del compresor de helio y su refrigerante podrían significar pérdida de peso; y los costos se reducirían ya que el Helio resulta poco económico e ineficiente en masa si deseamos construir criostatos de menos de 1 m, mientras que por otro lado, el uso del Nitrógeno líquido en el Maglev incrementaría sustancialmente la aceptación de estas tecnologías en las compañías operadoras; d) otro parámetro de diseño es el campo magnético en el compartimiento de los pasajeros. No hay estudios claros del peligro de estar cerca de campos magnéticos bajos y estáticos, y de hecho las normas en cuanto a tiempos de exposición han ido disminuyendo a través de los años, pero la creencia general procura evadir una exposición prolongada; se ha utilizado hierro magnético como pantalla del campo, pero el peso es una gran desventaja. Los nuevos superconductores podrían utilizarse como película delgada y evitar el paso del campo magnético por el efecto Meissner. Otra solución sería inclinarse por los sistemas de atracción, ya que evita la dispersión del flujo en el área de pasajeros. También se busca mejorar otras características tales como: inclinación del vehículo, para que sea capaz de dar curvas a altas velocidades, menos peso para aminorar el gasto de energía, reducción en la resistencia aerodinámica y en la generación de ruido mediante métodos como superficies de control, el uso de superconductores de alta temperatura, aumento de la capacidad en subidas y costos equiparables al TGV o TR-07.

Como una proyección a futuro, la NASA está estudiando la utilización de tecnología Maglev para crear un sistema que asista en el despegue de una nave espacial. Una pista operacional tendría unos 2400 metros de longitud y sería capaz de acelerar al vehículo a unos 1000 Km/h en 9,5 s y luego debería cambiar a motores a bordo para completar la salida al espacio (Ver Fig. 2.30). La parte más costosa de una misión a una órbita terrestre baja son los primeros segundos, el despegue. La mayor parte de este gasto se debe al peso del propergol, y como un vehículo Maglev utiliza electricidad para acelerarse, el peso de la nave espacial al momento del despegue podría ser de hasta un 20% menos que en un cohete normal. Además, este sistema es reutilizable, ya que la pista que se usa para acelerar al vehículo se queda en el suelo. Otros beneficios son que la electricidad no contamina y es mucho más barata. Cada lanzamiento realizado utilizando tecnología Maglev (con vehículos a escala real) consumiría cerca de \$75 USD de electricidad en el mercado actual. Un sistema Maglev de este tipo sería no necesitaría (idealmente) ningún tipo de mantenimiento, ya que no hay partes movibles y no existe contacto entre el vehículo y la pista. Tanto es así que se espera que un sistema Maglev funcione durante 30 años. Dentro de unos 20 años esta tecnología sería utilizada para poner vehículos mucho más grandes en órbita por sólo cientos de dólares por kilo [6 i].

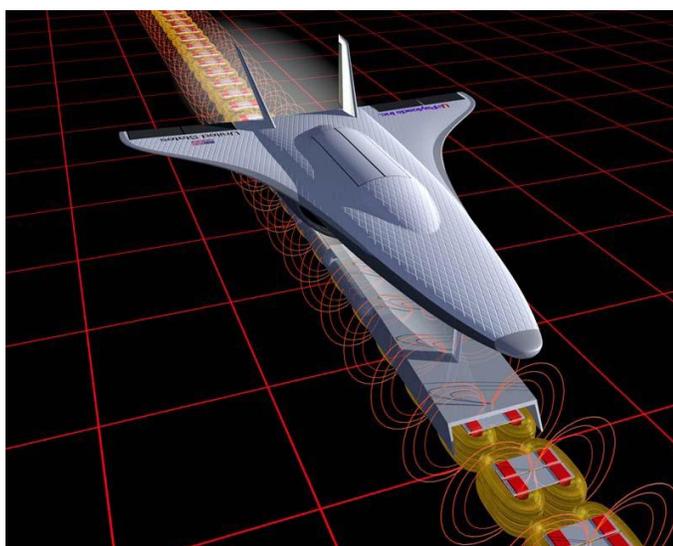


Fig. 2.30 Lanzadera espacial de levitación magnética.

2.3 Manufactura de superconductores de alta T_C

Actualmente los principales retos que afronta la producción comercial de los superconductores son: fabricar un material barato, que trabaje a temperatura ambiente y que sea fácil de manufacturar y de moldear en alambres o películas; de conseguirlo, la revolución habrá comenzado (Ver Fig. 2.31). En cuestión de precios, el poder trabajar con N es muchísimo más barato que con He: las instalaciones son menos complejas, el costo de criostato y materiales de alto aislamiento es eliminado y se gasta menos nitrógeno ya que permanece líquido por mas tiempo (debido a que el calor latente de vaporización del nitrógeno es 70 veces mayor que el del helio); de esta forma, los materiales superconductores irán bajando su precio en la medida que sean fabricados en serie, mientras esto no suceda, los precios pueden conservarse en rangos regulares por muchos años (en el 2005 el gramo de YBCO costaba \$3 USD, precio al que sigue siendo ofertado al día de hoy) [5 i]. En cuanto a la manufactura, el reto principal es en relación al

diseño de grandes piezas, ya que se necesitan formas que reduzcan la cantidad de material usado en grandes piezas cerámicas con formas complejas, que requieren la unión de varias partes pequeñas para formar una gran pieza.

En el Argonne National Laboratory se ha logrado la unión de dos piezas de YBCO mediante una capa intermedia de TmBaCuO que tiene una estructura y parámetros similares a los de las piezas a unir. Para este proceso, los materiales se calientan a una temperatura intermedia entre las dos temperaturas de descomposición y se unen en su enfriamiento, dándole a la pieza final la capacidad de flujo de corriente totalmente comparable a una pieza sin uniones; este proceso reduce significativamente los costos de manufacturación de grandes piezas.

La euforia tras el descubrimiento de los materiales de alta temperatura hizo pensar que habría un rápido cambio a la tecnología de los superconductores y que éstos reemplazarían a los de tipo II, pero la realidad ha sido diferente; a pesar de los progresos en las aplicaciones de grandes campos magnéticos, el cambio ha sido muy lento. Los parámetros críticos de temperatura y flujo magnético avanzaron rápidamente, pero no el de densidad de corriente crítica, que necesita valores mayores a 10^5 A/cm² para ser comercialmente viable; apenas hace poco se ha logrado esto en campos de varias Teslas. La razón del lento adelanto en cuanto a la densidad de corriente se debe a la estructura microscópica y naturaleza de los cerámicos. Toda la atención debe estar puesta en las condiciones para su manufactura, ya que un cambio tan simple como la oxigenación es esencial: un ligero decremento causa una baja en los parámetros críticos de temperatura, densidad de corriente, o incluso llegan a volver aislante a un material que se espera sea superconductor [35].

Se investiga también si los compuestos orgánicos pueden ser superconductores, los metales orgánicos es lo más cercano a esta variante que se tiene al momento; estos materiales desarrollan un comportamiento aislante hasta descender a los 12 K, en que se comportan como metales por tener una estructura casi unidireccional, y se vuelven superconductores a 1 K.

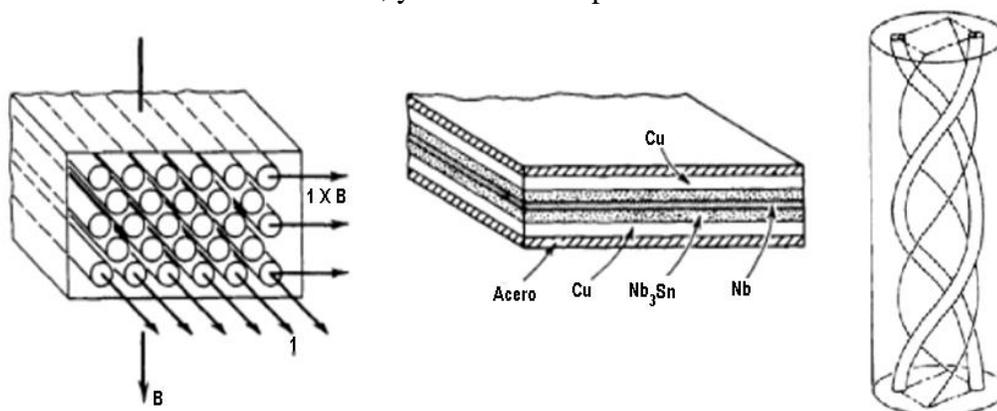


Fig. 2.31 Topologías diferentes para compuestos superconductores

Actualmente la carrera por lograr la supremacía del mercado tecnológico de los superconductores se da entre EUA y Japón, aunque también se desarrolla en muchas otras partes del mundo. Hay que reconocer que se han hecho enormes progresos en investigación fundamental, pero se necesita mucho trabajo para hacer productos superconductores comercialmente viables.

Resumiendo, en este capítulo se tratan las aplicaciones más importantes que se han dado hasta la fecha a los materiales superconductores. Algunas partes de maquinaria explotan los fenómenos de estos materiales por ser características únicas e imposibles de encontrar bajo otras circunstancias, mientras que en otros campos ha servido para mejorar las características de eficiencia, tamaño, precisión, etc.

En algunos casos se especifica la evolución que han tenido ciertas aplicaciones que comenzaron con materiales superconductores de baja temperatura y su evolución a lo largo de poco más de 20 años desde que salieron a la luz los superconductores de alta temperatura crítica.

Se hace mucho énfasis en la necesidad de unir esfuerzos de diferentes áreas de estudio para lograr acrecentar los pasos de la evolución de las aplicaciones, hay muchos campos de la tecnología que podrían resultar beneficiados con la aplicación de estas mejoras, pero principalmente es la sociedad en general que puede encontrar en la superconductividad un nuevo modo de ahorro de recursos, bajas a la contaminación y al ruido y otras formas de energía alternativa, poco desarrolladas pero muy prometedora.

Se espera dar una alternativa para los futuros estudiantes del área a la inmersión en alguna de las categorías en que se desarrolla la superconductividad, si algún tema es de interés en particular, podrá dar una continuación a este trabajo que plantea las bases de muchos posibles desarrollos tecnológicos. Este fue el primer paso de una nueva línea de investigación en sistemas energéticos, ya sea que se continúe con el desarrollo de un generador eléctrico superconductor o que se desarrollen cojinetes de levitación que reduzcan las pérdidas en maquinaria mayor, las bases para trabajarlo es lo que se plantea en este material escrito.

CAPÍTULO 3
LEVITACIÓN MAGNÉTICA

El concepto de estabilidad es de suma importancia para la creación de un dispositivo de levitación exitoso; por esta razón será analizado de forma teórica en este capítulo. Un sistema físico es estable cuando está en un estado de energía potencial mínima, que brinde estabilidad en el centro de masa, en la posición del objeto (orientación angular) y, si éste es deformable, la estabilidad de forma también será considerable. En el área práctica se enumeran los lineamientos para desarrollar y analizar este tipo de sistemas levitatorios, mientras que en el análisis teórico se busca el estado de mínima energía partiendo del análisis idealizado de una partícula y llegando hasta las aplicaciones macroscópicas con la medición experimental en cuerpos superconductores de longitudes milimétricas.

3.1 Concepto de levitación magnética

Levitación es definida como el equilibrio estable de un cuerpo sin contacto con la Tierra, y puede ser creada por campos eléctricos o magnéticos. El objetivo sería utilizar las fuerzas magnéticas para equilibrar las fuerzas gravitacionales en un cuerpo de manera tal que sus 6 grados de libertad sean estables. Hay varios tipos de sistemas de levitación parcial o total: imanes permanentes, materiales diamagnéticos en un campo magnético, electroimanes con control externo, electroimanes con corrientes dinámicas, corrientes eddy (dispositivos de CA), corrientes eddy con conductores activos, superconductores con magnetos permanentes, superconductores con imanes superconductores e híbridos de los anteriores.

La superconductividad es una de las exclusiones al Teorema de Earnshaw: una partícula cargada en el campo de un conjunto fijo de cargas no puede permanecer en equilibrio estable; sin embargo, hay circunstancias bajo las cuales algunos sistemas eléctricos y magnéticos pueden evadir las consecuencias: campos variantes en el tiempo, realimentación activa, sistemas diamagnéticos, ferrofluidos y superconductores. En general, los materiales que atraen el flujo magnético como los ferromagnéticos obedecen el teorema de Earnshaw, mientras que los materiales que repelen el flujo como los diamagnéticos, no lo obedecen.

Para diseñar un sistema de levitación seguro y exitoso, el sistema debe equilibrar las fuerzas gravitacionales, debe ser estable bajo pequeñas perturbaciones dinámicas, estable bajo ocasionales perturbaciones grandes y debe proveer suficiente amortiguamiento para asegurar la calidad de desplazamiento.

Los superconductores muestran varios tipos de levitación:

- Tipo I levitación repulsiva de Meissner, basada en la expulsión completa del flujo.
- Tipo II levitación por repulsión, basada en la expulsión parcial del flujo y efecto de anclaje del flujo magnético.
- Tipo II levitación por suspensión, basada en fuerzas de anclaje del flujo magnético.

Una expulsión de flujo produce presión magnética que resulta en levitación por repulsión; mientras que una atracción de flujo crea una tensión magnética que soporta la levitación por suspensión. Aunado a estos, el anclaje del flujo es considerado una fuente de levitación estable [36].

Entonces, la fuerza magnética entre dos cuerpos puede ser calculada sabiendo el campo magnético de uno y la corriente o magnetización del otro, pero el campo observado es la suma de los campos producidos por cada uno. Sin embargo, la levitación repulsiva requiere mayor expulsión del flujo, mientras que la levitación atractiva o suspensión de un imán por un superconductor requiere mayor captura de flujo.

Acerca de la estabilidad de los sistemas magnéticos existen varios estudios al respecto: Braunbeck habla de que la levitación magnética estable es posible en diamagnetos y superconductores en campos magnéticos estáticos [37]; Arkadiev comienza con estudios en levitación estable en superconductores [38]; Bourke describe la levitación de un cuerpo cilíndrico laminado en Aluminio a 4,2 K [39]; Woods [40], Marek [41] y Rashkovan [42] hacen estudios de levitación en anillos superconductores; y más recientemente, algunos estudios teóricos de la estabilidad de levitación dinámica para superconductores de alta temperatura son presentados por Davis [43] y Nemoshkalenko [44].

En la levitación magnética, además de la estabilidad, la dinámica es uno de los problemas de primer orden en el diseño de control. Los efectos más importantes en la dinámica son muy interesantes de observar: Si sobre un superconductor se pone un imán, en forma vertical se crea una “imagen congelada” que aun después de un movimiento lateral del imán, la imagen permanece en el mismo lugar, dando pie a la creación de una fuerza de restauración o rigidez magnética (ver Fig. 3.1). La levitación estable requiere que la fuerza de levitación cambie proporcionalmente al aumento o disminución de la distancia de separación; este cambio en la fuerza de levitación es la rigidez magnética (Ver Fig. 3.2).

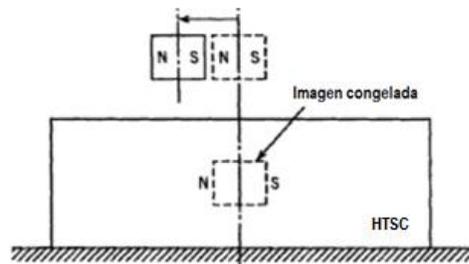


Fig. 3.1 Modelo de la imagen congelada para determinar la fuerza de restauración lateral de un imán permanente levitando sobre un superconductor de alta temperatura. [45].

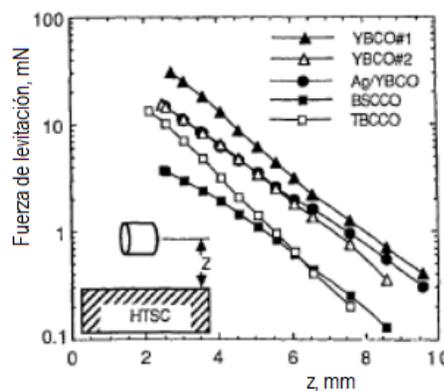


Fig. 3.2 Relación entre la fuerza de levitación y la distancia entre al superconductor y el imán, para diferentes materiales superconductores.

Existen otros efectos igualmente interesantes: fricción o resistencia magnética, torques rotacionales, auto oscilación de un imán en forma de disco sobre un superconductor de alta temperatura, etc. Una introducción a la dinámica de sistemas magnetomecánicos se puede ver en *Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems* [46].

3.2 Modelo matemático del sistema magnético: Anillo superconductor – Imán permanente

Las bases teóricas que han sido sentadas para el estudio de los sistemas superconductores en la SEPI-ESIME Culhuacan han sido en referencia a la estabilización de cargas puntuales en el campo magnético de un anillo superconductor, así como otros arreglos de anillos superconductores. Se describe el modelo matemático obtenido en esos sistemas con la finalidad de encaminar la investigación en estabilidad de levitación magnética, ya que el último experimento que se describe (con uso de materiales superconductores de alta temperatura) aún no tiene modelo matemático, pero es el siguiente paso propuesto en la línea de investigación. El propósito de los experimentos es analizar y entender el desempeño de las fuerzas magnéticas en un sistema de interacción magnética. La experiencia lograda y la investigación de las condiciones de movimiento estacionario de un sistema de levitación pueden ser propuestas para mejoras en áreas como transporte, partes de maquinaria, magnetomecánica, electrodinámica, control, etc.

Un conductor ideal (sin resistencia eléctrica) en forma de anillo fino y cerrado, tiene la propiedad de conservar el flujo magnético en su interior, el cual pasa a través de la superficie limitada por el mismo anillo, con una corriente $I=cte$; es posible considerarlo como un imán permanente, cuya resistencia no es mayor a $10^{-23} \Omega\text{cm}$. Un superconductor es, no solo un conductor ideal, sino un diamagneto ideal. La inducción magnética (o densidad de flujo magnético) dentro de un volumen de material superconductor siempre es igual a cero, $\vec{B} = 0$. Esta propiedad no depende de las condiciones de transmisión del cuerpo en estado superconductor. Como resultado a la ecuación de Maxwell $div \vec{B} = 0$ en el borde de dos cuerpos, la componente normal de inducción del campo magnético debe ser igual a cero. Así como dentro del superconductor $\vec{B} = 0$, en la superficie, la componente normal del campo magnético externo también es igual a cero. Esto significa que el campo magnético en cualquier punto fuera del superconductor siempre es tangente a la superficie. Estas líneas magnéticas son curvas en relación al cuerpo superconductor. De acuerdo a la ecuación de Maxwell, el campo magnético permanente en un material, el $rot \vec{B} = -\mu\rho$, un vector con la condición de que $\vec{B} = 0$, se deduce que en un superconductor, el promedio de densidad de corriente es igual a cero. En otras palabras, en cualquier cuerpo superconductor no volumétrico, la corriente es posible. Cualquier corriente crítica en un superconductor es una corriente superficial. Mientras mayor sea el campo magnético, mayor será la penetración de la corriente eléctrica a una longitud de London λ_L del superconductor, entonces, se pueden encontrar diferentes ecuaciones de la inductancia en estos materiales. Por ejemplo, el campo magnético en función de la penetración está determinado por:

$$B = B_0 e^{-\lambda_L x} \quad (3)$$

dentro del conductor, la energía magnética es:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dv \quad (4)$$

(dv es el elemento de volumen) que uno puede imaginar un fino superconductor como:

$$W = \frac{1}{2} I^2 L_0 \quad (5)$$

De esos datos, se puede encontrar la relación para la inductancia interna en un superconductor de longitud unitaria

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^2 \quad (6)$$

Entonces, el anillo ideal y el anillo superconductor tienen una diferencia en la inductancia interna L_0 , que necesita agregar a sí misma la propia inductancia del anillo ideal para tomar en cuenta el campo magnético externo. Para simplificar el análisis, se usará el concepto de corriente ideal. Si se imagina un superconductor como un alambre continuo, en el caso de ausencia de campo magnético externo, es imposible esperar la circulación de las corrientes superficiales estacionarias.

Las propiedades eléctricas de los anillos superconductores en cualquier caso tienen un interés específico desde el punto de vista de la levitación magnética. En el caso de un superconductor que no es alambre, las corrientes eléctricas superficiales pueden ocurrir estacionariamente sin fuerza electromotriz. El flujo magnético a través del límite de la superficie por un anillo superconductor es determinada por la siguiente ecuación $\Psi = LI$. Si el anillo superconductor está dentro de un campo magnético, entonces el flujo magnético total Ψ a través de la superficie consiste del propio flujo del superconductor LI y del flujo Ψ_{ext} del campo magnético externo. La propiedad más importante en un anillo superconductor es que cualquier variación ya sea del campo magnético externo o de la corriente en el anillo, el flujo magnético en la superficie del anillo siempre permanecerá constante. Este resultado es muy importante ya que la permanencia del flujo magnético en un anillo superconductor será conservado no solo en el caso de variación del campo magnético externo, sino también en el caso de una variación en la forma del anillo, como por ejemplo, el desplazamiento del anillo en el espacio.

Las propiedades mencionadas previamente pueden ser usadas para la simplificación de sistemas de control y para obtener mejoras significativas en las técnicas de estabilización en aplicaciones como aceleradores de partículas. El problema teórico define las condiciones suficientes para lograr una trayectoria circular estable basada en el diseño de parámetros que eliminan la necesidad de campos externos estabilizantes. Se identifica una región donde la trayectoria circular de una partícula cargada en el campo magnético del superconductor es auto-estabilizada; el método para localizar la región consiste en el desarrollo de un sistema auto-controlado basado en el efecto físico del pozo de potencial magnético, que hace posible encontrar áreas precisas de operación donde se encuentra la estabilidad de la trayectoria.

El movimiento de una carga eléctrica puntual en el campo magnético de un anillo fino está definido por la ecuación del movimiento de Newton para el caso no relativista ($v/c \ll 1$) y en ausencia de campos magnéticos externos:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -q \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \dots\dots\dots \text{Ec. (7)}$$

$\partial \vec{A} / \partial t = 0$ es el campo eléctrico nulo,

La ecuación del movimiento para la carga eléctrica en el campo magnético del anillo es:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \cdot \frac{\Psi}{L} \left\{ \vec{v} \times \left(\left[1 - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \oint \frac{\vec{v}' d\vec{l}'}{(R' - \frac{\vec{v}' R'}{c})} \right] \cdot \oint \frac{(d\vec{l} \times \vec{R})}{R^3} \right) \right\} \dots\dots\dots \text{Ec. (8)}$$

$d\vec{l} [m]$, es el elemento del arco del anillo superconductor,

$\vec{R} [m]$ es la distancia del punto de observación donde se aplica $d\vec{l}$ del anillo superconductor hasta el punto de localización de la carga,

$\vec{v}' [m/s]$ es la velocidad de la partícula que se determina en el instante t' ,

$\vec{R}' [m]$ es la distancia del punto de observación donde se aplica $d\vec{l}$ del anillo superconductor hasta el punto de localización de la carga que se determina en el instante t' ,

Considerando un anillo conductor ideal en el sistema, cualquier variación, tanto del campo magnético externo como de la corriente del anillo, el flujo magnético total permanece constante:

$$\Psi = IL + \Psi_q = const \dots\dots\dots \text{Ec. (9)}$$

Donde: $IL [Wb]$ es el flujo magnético a través la superficie limitada por el anillo superconductor,

El flujo magnético de la carga puntual en movimiento que atraviesa la superficie limitada por el anillo superconductor:

$$\Psi_q = \oint A d\vec{l} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \oint \frac{\vec{v}' d\vec{l}'}{(R' - \frac{\vec{v}' R'}{c})} \dots\dots\dots \text{Ec. (10)}$$

Considerando la ley de conservación del flujo magnético total (Ec --) la corriente eléctrica en el anillo superconductor se determina de la siguiente forma:

$$I = \Psi L^{-1} \left[1 - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2 \Psi} \oint \frac{\vec{v}' d\vec{l}'}{R' - \frac{\vec{v}' R'}{c}} \right] \dots\dots\dots \text{Ec. (11)}$$

La solución analítica de la ec. -- (la fuerza magnética de Lorentz) se escribe:

$$P = p\lambda_1 \left(K + \frac{1+n}{1-n} E \right) \cdot \left(1 + \lambda p \int_0^\pi \frac{\cos 2\vartheta d\vartheta}{p \sin 2\vartheta + \sqrt{1-k^2 \text{sen}^2 \vartheta}} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. (12)}$$

Donde: $\lambda_1 = \frac{q\Psi}{2\pi\epsilon_0 cAL}$ [N] es el parámetro de unidades de fuerza,

$\lambda = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 c\Psi}$ es el parámetro adimensional que describe la interacción entre el campo magnético del anillo superconductor y el campo magnético de la partícula, $K = K(k)$ y $E = E(k)$ son los integrales elípticos enteros del módulo:

$$k = 2\sqrt{ar}(a+r)^{-1} \dots\dots\dots\text{Ec. (13)}$$

Donde:

$$p = \frac{a}{a+r} \cdot \frac{V}{c} \text{ y } n = \frac{r}{a} \text{ son parámetros geométricos adimensionales,}$$

Mediante la variación de las distancias entre dos elementos de diversos sistemas superconductivos se observa el cambio de la fuerza magnética de atractiva a repulsiva y viceversa, pasando por una zona cero de transición, la cual provee al sistema de estabilidad en el mínimo de energía potencial del sistema. El efecto del pozo de potencial magnético (MPW por sus siglas en inglés) consiste en la existencia de una interacción magnética con energía potencial igual a cero como una función de la distancia entre dos elementos magnéticos. Idealizando, cuando el radio de trayectoria de una partícula cargada $r_0 \in (r|0 < r_2 < r_1 < \infty)$ coincide con el eje del radio, la fuerza magnética de Lorentz:

$$\vec{P} = q \cdot (\vec{r} \times \vec{B}) \dots\dots\dots\text{Ec. (14)}$$

cambia de signo de repulsivo ($r < r_0$) a atractivo ($r > r_0$) pasando por cero ($r \equiv r_0$) si y solo si $f_0(\Psi, \vec{r}, \vec{r}) \neq 0$ para todo $r_0 \in [r_1, r_2]$ en la ecuación de movimiento:

$$\vec{P} = \zeta_0 \Psi [\vec{r} \times ([1 - f_0(\Psi, \vec{r}, \vec{r})]f_1(\vec{r}))] \dots\dots\dots\text{Ec. (15)}$$

la cual es consecuencia de la ley de conservación de flujo magnético para un sistema superconductor. r_1 es el radio máximo de la trayectoria de la partícula, r_2 el mínimo, \vec{r} es la velocidad de la partícula. Dependiendo de ambos, λ y el radio orbital de la partícula, la fuerza de Lorentz cambiara de repulsiva a atractiva. Este método se presenta para garantizar un sistema superconductor auto-controlado.

Dependiente de λ y el radio orbital del movimiento de la partícula la fuerza de Lorentz se cambiara de repulsiva a atractiva cruzando el cero. La gráfica del efecto “pozo magnético potencial” como la función de la fuerza de Lorentz P del parámetro adimensional n se presenta en Fig. 3.3.

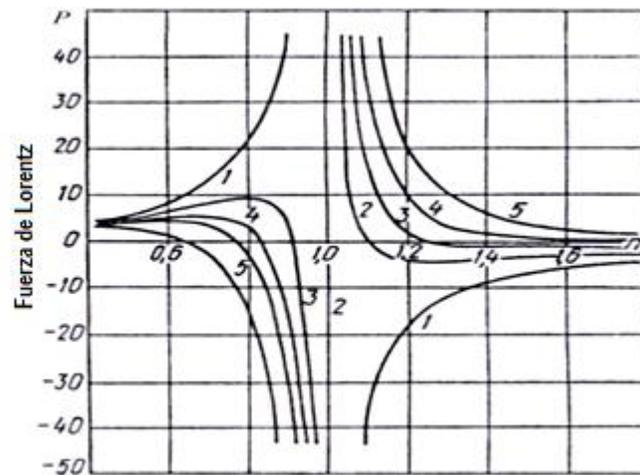


Fig. 3.3 Efecto Pozo de Potencial Magnético en un sistema ideal anillo-partícula.

3.3 Experimentos precedentes

Los primeros experimentos en este sentido fueron hechos con superconductores de baja temperatura en instalaciones criogénicas que utilizan helio líquido. Rashkovan [47] hace las mediciones de la fuerza axial y su torque en la interacción magnética entre una bobina superconductora de aleación Nb-Sn y el imán permanente. La dependencia de la fuerza magnética (campo magnético axial) sobre la distancia entre imán permanente y la bobina superconductora es presentada en la Fig. 49 a diferentes valores de la distancia. La presencia de una fuerza cero de la interacción en cada curva confirma la existencia de un mínimo en la energía potencial de interacción magnética del sistema. Esto provee al sistema de estabilidad en la dirección axial. Las mismas condiciones fueron aplicadas para la fuerza radial (Ver Fig. 3.4).

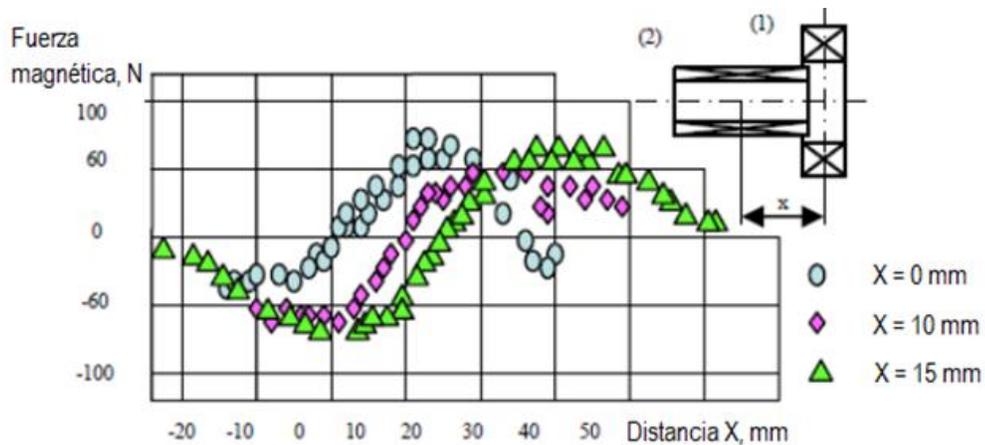


Fig.3.4 Dependencia de la fuerza magnética (campo magnético axial) con la distancia entre el imán permanente (1) y la bobina superconductora (2).

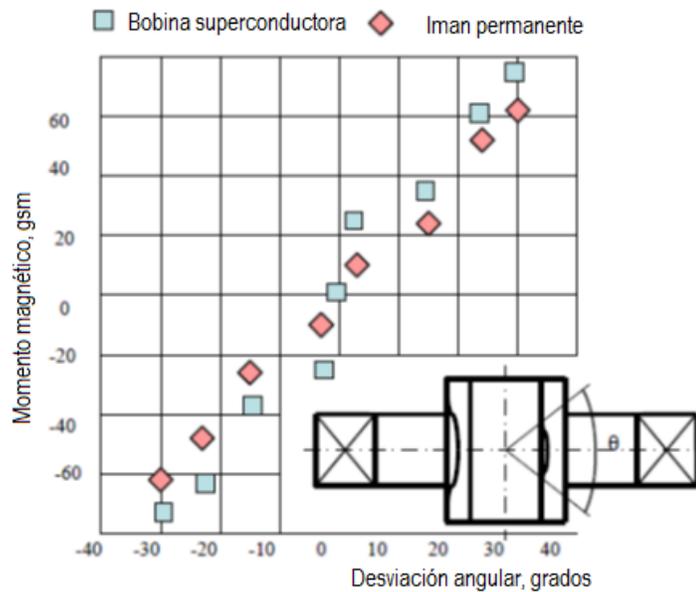


Fig. 50. Dependencia momento magnético en el ángulo entre los ejes de la bobina superconductora fija y el imán permanente.

Resumiendo, en este capítulo se presentó el concepto de levitación por medios magnéticos, se enumeraron las formas convencionales de lograrlo (que a la fecha ya han sido desarrollados y están en uso), se analizaron las ventajas y desventajas de estos sistemas y se pusieron en comparación con los sistemas de levitación que utilizan superconductores, se habló del as tres formas de levitación que se presentan en estos materiales y se hizo una breve revisión bibliográfica de los autores más destacados en el ámbito de la levitación magnética.

Se asentó que los superconductores pueden y son estudiados mediante las leyes de la electrodinámica, incluyéndose el caso especial del teorema de Earnshaw (que plantea que no es posible una configuración estática de levitación de una partícula cargada en un campo fijo de cargas), para el cual los superconductores son una exclusión.

Se presentó el modelo matemático que fue desarrollado como precedente a la experimentación actual para la interacción magnética en sistemas superconductores, que predice la aparición del fenómeno Pozo de Potencial Magnético en sistemas superconductores, independientemente de si se trata de materiales del tipo I o del tipo II, es decir, este fenómeno se presentará ya sea que la levitación sea por exclusión completa del flujo o por efecto del anclaje de flujo.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Retomando la búsqueda de la zona de mínima energía potencial en un sistema magnético con superconductores, a continuación se presentan los experimentos realizados, que muestran de una forma cuantitativa el fenómeno de la estabilidad estática en levitación con superconductores de alta temperatura. Se miden la fuerza y la inducción magnética en levitación de un imán permanente por sobre una pastilla superconductora, cambiando las distancias entre los sensores y la superficie del superconductor; los parámetros anteriores se obtienen en función de la distancia.

Se presentan así mismo los resultados del experimento para buscar en la relación de “Fuerza magnética-Distancia” el efecto PMW, así como los resultados encontrados en la relación “Inducción magnética-Distancia”. Se hace un análisis de las gráficas obtenidas en estas relaciones anteriores.

4.1 Instalación experimental

Dentro del equipo utilizado se encuentra un dinamómetro digital ----- con una precisión de ----- para medir la fuerza magnética en el sistema en levitación. El sensor del dinamómetro fue controlado con un brazo mecánico que permite desplazamientos discretos de forma vertical con una precisión de centésimas de milímetro. Para tomar las medidas de la inducción magnética se usó un teslómetro digital con sensibilidad de 10 μT . Se colocó la terminal del teslómetro en un apoyo que permite su desplazamiento vertical con control del operador (Ver Fig. 4.1 y 4.2).

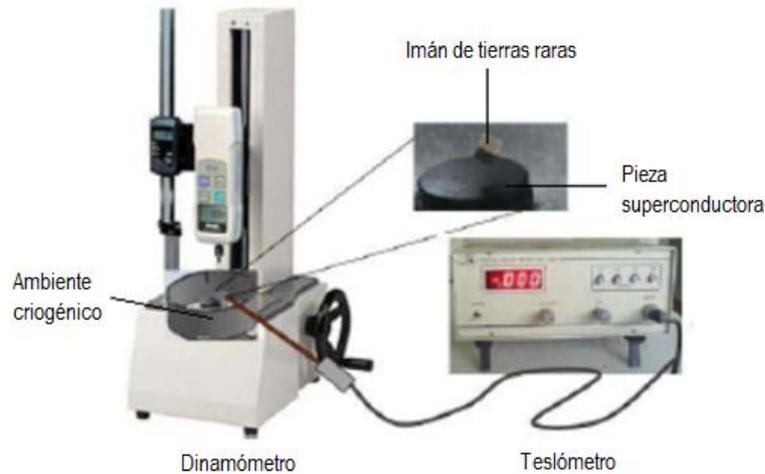


Fig. 4.1 Arreglo experimental con el ambiente criogénico inicial e instrumentos de medición.

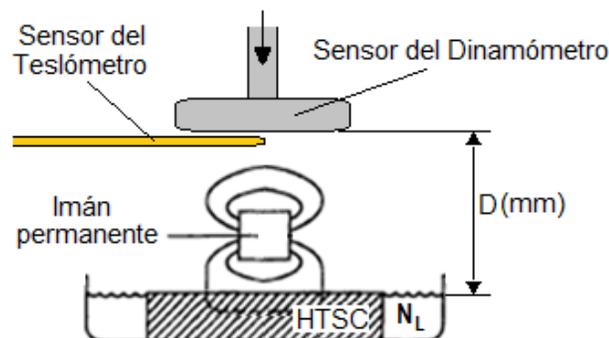


Fig. 4.2 Detalle de la toma de mediciones.

4.1.1 Ambiente criogénico

Se tuvo que crear un ambiente criogénico para que las cerámicas pasen a su estado superconductor. Ya que se trata de superconductores de alta temperatura, el medio criogénico se obtiene introduciendo las pastillas en un ambiente enfriado con nitrógeno líquido. El nitrógeno constituye aproximadamente el 78% del aire, no tiene color, olor ni sabor, no es tóxico y a menudo es considerado como un gas inerte (aunque bajo la influencia de químicos, electricidad o elevadas temperaturas, es reactivo ya que forma compuestos) (Ver Tabla 4.1). El nitrógeno comercial es el producto de la separación del aire por medio de la licuefacción y destilación de éste. [7 i].

Tabla 4.1 Propiedades físicas del Nitrógeno

Fórmula química	N ₂
Peso molecular	28.013 g/mol
Temperatura de ebullición (1 atm)	-195,8 °C
Densidad gas (20 °C, 1 atm)	1.161 g/l
Densidad líquido (1 atm)	0.808 g/l
Peso específico (aire =1)	0.967
Calor latente de vaporización	47.44 cal/g

Grupo INFRA en su especialidad CRYOINFRA, comprometido con la investigación y la educación de las nuevas generaciones, hizo la donación de nitrógeno líquido a los laboratorios de ESIME Culhuacan para la realización de diversas prácticas referentes a superconductores para los alumnos de nivel licenciatura, así como para la realización del experimento aquí descrito. Además de la donación de la sustancia, brindaron asesoría técnica especializada en el manejo de la misma.

El contacto de la piel u ojos con el nitrógeno líquido o nitrógeno gaseoso frío⁹ puede acusar lesiones graves debido a la congelación, así que hay que manipular con mucho cuidado esta sustancia. Tampoco se deberán tocar directamente los objetos enfriados con el nitrógeno, siempre se deben utilizar pinzas para su manipulación y ropa protectora en cualquier caso: caretas o gafas, guantes aislados, bata o peto y calzado especial si es posible (Ver Fig. 4.3). Otro cuidado muy importante es mantener siempre ventilada el área de trabajo, ya que al evaporarse el nitrógeno, el gas desprendido tiende a desplazar el aire normal del área y en lugares cerrados, las concentraciones excesivas de nitrógeno reducen la concentración de oxígeno y pueden producir asfixia rápidamente.

⁹ El vapor nebuloso que aparece cuando el nitrógeno líquido se expone al aire es humedad condensada, no el gas propio. El gas desprendido es invisible.



Fig. 4.3 Equipo y vestidura especial para el manejo de líquidos criogénicos.

En cuanto a los cuidados que se deben tener con el equipo especial para transportar nitrógeno, se mencionarán los más importantes, pero se hace una fuerte recomendación en leer cuidadosamente los instructivos propios a cada contenedor y equipo. Para contener el nitrógeno líquido por tiempos prolongados se deben utilizar únicamente equipos aislantes, especiales para tal fin, ya que son diseñados para resistir cambios rápidos de temperatura y operar con poca o ninguna presión interna. Los recipientes para transporte deben ser llenados lentamente y dejar libre las respiraciones que fueron diseñadas para evitar que el recipiente se reviente por el aumento de la presión interna al cabo del tiempo; al hacer la transferencia de un equipo a otro se debe utilizar un separador o embudo para evitar salpicaduras y derrames. Ninguno de los materiales expuestos a las temperaturas criogénicas deben ser tratados bruscamente, arrojados o golpeados, ya que el riesgo de cristalización y fractura es incrementado por las bajas temperaturas.

Se realizaron dos arreglos para lograr el medio criogénico necesario para que el material permanezca en estado superconductor; el primero de ellos consiste en un recipiente metálico, circular, con diámetro de 20 cm y altura de 5 cm, que necesita ser constantemente llenado con nitrógeno para mantener al superconductor en una temperatura inferior a su punto crítico.

El segundo arreglo consistió en un recipiente aislante: un contenedor de poliestireno expandido (unicel) de pared gruesa que contenía en su interior una esponja rígida “Oasis” que por su composición de micro poros tiene una alta capacidad de absorbencia. Se logró así un retraso en la evaporación del N_L al no permitir un contacto directo con el medio ambiente y se garantizó un amplio rango de tiempo para la experimentación. En el centro del recipiente se encuentra un soporte tubular de cobre con perforaciones distribuidas a todo lo largo del cuerpo para garantizar el paso del nitrógeno a su interior y que, debido a su alto coeficiente de conductividad térmica, la temperatura criogénica permanezca en el cuerpo superconductor aun después de varios minutos (Ver Fig.4.4).

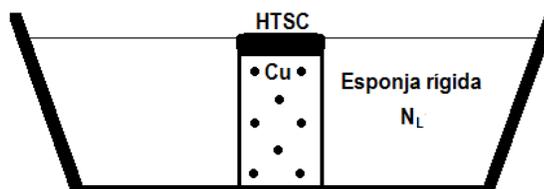


Fig. 4.4 Segundo arreglo del sistema criogénico.

De esta manera se buscó que el ambiente criogénico sea un arreglo simple, económico y hecho con materiales fáciles de conseguir. El enfriamiento con nitrógeno líquido debía ser constante, evitar pérdidas por evaporación excesiva y permitir, con un solo llenado del recipiente, el tiempo suficiente hacer de manera continua las mediciones.

4.1.2 Piezas superconductoras e imanes

Se dará a continuación una breve descripción del juego de cerámicas superconductoras que se utilizaron en este experimento. El material conocido como YBCO (Ver Tabla 4.2), descubrimiento por C.W. Chu en 1987, marcó el principio para las cerámicas superconductoras que utilizaron por primera vez el nitrógeno como medio de refrigeración. Es uno de los materiales del tipo II más usados en las aplicaciones que requieren superconductores en cuerpo, volumen o pastillas, debido a las altas densidades de corriente que son capaces de soportar: hasta 1×10^6 A/cm².

Tabla 4.2 Propiedades físicas del YBCO.

Fórmula química	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}
T _C	92 K
Apariencia	Sólido negro
Densidad	6.3 g/cm ³
Punto de fusión	>1000 °C
Estructura cristalina	Tipo perovskita

El segundo material con que se trabajó es BSCCO (Ver Tabla 4.3), descubierto en 1988, también del tipo II, es el primer material que no contiene tierras raras en su composición. Forma parte de los cupratos superconductores y es de los materiales de alta temperatura más utilizados en las aplicaciones industriales: fue el primer material de alta temperatura en ser usado para la fabricación de cables y es ampliamente utilizado en cintas.

Tabla 4.3 Propiedades físicas del BSCCO.

Formula química	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀
T _C	110 K
Apariencia	Sólido negro
Estructura cristalina	Tipo perovskita

Las piezas superconductoras son hechas de óxidos de varios metales, algunos de éstos pueden ser tóxicos, así que se recomiendan unas sencillas precauciones al manipularlas: utilizar bata, lentes y guantes al trabajar con ellas, no tocarlas directamente con las manos y aún lavarse después de terminado el experimento; no acercarlas a los ojos ni ingerirlas bajo ninguna circunstancia.

Por otro lado, los imanes de Neodimio pertenecen a la familia de imanes de tierras raras, son imanes permanentes de aleación neodimio, hierro y boro, con recubrimiento de níquel, zinc, plata, oro o epoxi para protegerlos de la oxidación. Son unos imanes con gran potencia (unas seis veces más que los imanes de ferrita) en relación con su tamaño. Sus aplicaciones se enfocan a sitios donde se busca aumentar la potencia magnética y reducir las dimensiones del sistema.

Según el fabricante, los imanes que en este experimento fueron utilizados, tienen potencias menores a los 3500 Gauss y fuerzas de sujeción de 0,15 y 0,45 kg respectivamente, de acuerdo a la masa. Son relativamente fáciles de conseguir y tienen precios accesibles, alrededor de 0,25 USD cada pieza, aunque tienen el inconveniente de ser bastante frágiles [8 i].

Se trabajó con dos imanes cúbicos de tierras raras (Nd):

- a) Peq.: 2 mm de arista, masa de 0,3 g
- b) Gde.: 4 mm de arista, masa de 1 g

Y se hicieron interactuar con tres piezas superconductoras (Ver Fig. 4.5):

- a) Pastilla $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, 6 g
- b) Pastilla $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$, 6 g
- c) Anillo BSCCO, 16 g

Para que el experimento de levitación sea exitoso, las fuerzas de repulsión entre el superconductor y el imán deben exceder el peso del imán; además, la fuerza del campo magnético del imán debe ser menor que el valor del campo magnético crítico del superconductor, H_C .



Fig. 4.5 Pastillas superconductoras

Es preciso que en un principio todo el cuerpo del superconductor esté sumergido en nitrógeno, así que al vaciar el líquido en el contenedor, se debe agregar hasta un par de milímetros por encima de la superficie superior de la pastilla. Después de vaciar el nitrógeno, éste comenzará a ebullición hasta alcanzar un equilibrio térmico en la superficie; cuando esto suceda, las observaciones serán fácilmente apreciables y es posible comenzar con las mediciones.

4.2 Desarrollo experimental

Se reporta a continuación el comportamiento de la fuerza magnética y la inducción magnética para las distintas combinaciones de las 3 piezas superconductoras y los 2 imanes.

4.2.1 Mediciones estáticas durante el periodo de transición

Las mediciones de fuerza magnética e inducción magnética se hicieron en primer orden en un punto fijo con respecto a la superficie superior del superconductor, reportando entonces el comportamiento de estos parámetros en el periodo de transición (Ver Tabla 4.4). En un comienzo el superconductor se encontraba a la temperatura del N_L , luego se retiró del ambiente criogénico y su temperatura se elevó lentamente, sobrepasando la T_{C1} mientras el flujo magnético iba penetrando la pastilla hasta que llegó al nivel de la T_{C2} , regresando a su estado normal. En este

periodo la distancia entre el superconductor y el imán iba disminuyendo, ya que el imán descendió hasta que el efecto de levitación se perdió por completo.

Tabla 4.4 Medidas de la fuerza y la inducción magnética a una distancia fija de 12.83×10^{-3} m. El imán Peq. se encuentra levitando sobre la pastilla YBCO durante el periodo de transición de estado superconductor a estado normal.

Tiempo, s	Fuerza magnética, N	Inducción magnética, mT
2	0.04	7.2
4	0.01	6
6	-0.02	5.7
8	-0.03	6.4
10	-0.05	6.6
12	-0.07	7.1
14	-0.08	7.2

Se observa un punto en el tiempo en que la fuerza magnética pasa de positiva a negativa, acusando una fuerza cero, teniendo por estable al sistema superconductor-imán en ese momento. Aunque el sensor del dinamómetro en este experimento no tuvo cambios en la dirección vertical, el imán si tuvo variaciones en su proximidad con la pastilla, ya que al ir abandonando ésta su estado superconductor, el campo magnético del imán iba penetrándola lentamente (el efecto Meissner iba desapareciendo como consecuencia del calentamiento del cuerpo superconductor).

Mientras que la fuerza magnética descendía de forma casi lineal, la inducción magnética desciende hasta un mínimo en los primeros segundos del experimento y luego asciende hasta valores similares a los medidos al inicio; se puede estimar que la fuerza magnética cero coincide con el mínimo valor medido de la inducción magnética para este caso, sin embargo no se cuenta con los datos suficientes para asentarlos.

4.2.2 Mediciones en función de la distancia

En las pruebas siguientes, el superconductor permaneció en el ambiente criogénico mientras la fuerza magnética y la inducción magnética se midieron a partir de distancias de varios centímetros y lentamente se fue acercando el sensor hasta llegar a unos cuantos milímetros de separación del imán (Ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Medición de la fuerza magnética y la inducción magnética del campo magnético del imán Peq. levitando sobre la pastilla YBCO a diferentes distancias.

Distancia, $\times 10^{-3}$ m	Fuerza magnética, N	Inducción magnética, mT
11.06	0.03	1.7
23.01	0.01	5.0
33.87	-0.07	4.7
38.43	-0.13	7.0

El experimento muestra un punto de equilibrio o de mínima energía potencial cuando el sistema superconductor-imán es estable, y corresponde con la fuerza magnética cero. Se puede observar que la fuerza magnética cambia de positiva a negativa pasando por un valor cero, donde el

sistema es considerado estable. El sistema es estable debido al mínimo de energía potencial y al anclaje del flujo, fenómenos típicos de los superconductores tipo II.

Los dos experimentos anteriores se hicieron con el primer arreglo de ambiente criogénico, obteniéndose los datos promedio anteriores. Aunque las tendencias fueron repetidamente observadas, mediante la repetición de las pruebas, el número de mediciones que se podían obtener en una sola prueba estuvo muy limitado, como se describe a continuación.

Con este arreglo se tuvieron varios inconvenientes: vaciando el nitrógeno hasta una altura equivalente al doble del espesor de la pastilla superconductora o menos, la rápida evaporación del nitrógeno (debida al amplio contacto de la superficie con el medio ambiente) ocasiona una pérdida del sistema criogénico al cabo de pocos segundos y esto dificulta hacer las secuencias de medición de forma continua. Si se aumenta la cantidad de N_L en el recipiente, el imán sufre los efectos de las fuerzas de flotación por sobre las de levitación, además de que el sensor de los instrumentos de medición se altera debido a las extremadamente bajas temperaturas causadas por la proximidad del N_L . Además de las dificultades de medición, las operaciones realizadas en un recipiente metálico a temperaturas criogénicas aumenta la necesidad de medidas de seguridad y se disminuye notablemente su movilidad. El hecho de ser un recipiente ferromagnético resta libertad para manipular los imanes en la experimentación, ya que un cambio en la posición radial del imán lo lleva a ser atraído por el recipiente y se destruye la levitación del sistema.

En la siguiente serie de experimentos se implementó la segunda configuración de ambiente criogénico. Se hicieron diferentes arreglos de los superconductores e imanes:

- 1) Pastilla BSCCO, encima la pastilla YBCO y el imán Peq. levitando por encima de ellas.
- 2) Pastilla BSCCO y levitando el imán Peq.
- 3) Anillo BSCCO y el imán Gde. en levitación.
- 4) Pastilla YBCO y levitando el imán Peq.
- 5) Anillo BSCCO y el imán Peq. levitando.

La totalidad de los datos obtenidos directamente de las mediciones se presentan en el Apéndice B. En las gráficas que se presentan a continuación se observan los datos promedio de las diferentes pruebas (Ver Fig. 4.7). Se muestran las gráficas a partir de los 45 mm (separación entre la superficie del superconductor y los sensores del dinamómetro y del teslómetro) ya a partir de los 40 y hasta los 100 mm se presenta un comportamiento lineal, por lo que se consideran solamente las mediciones del 40 al 45 para conocimiento de la tendencia posterior. Del otro lado, muy pocas mediciones se lograron por debajo de los 15 mm de separación, por dos razones principales: 1) el imán era fuertemente atraído al dinamómetro y el sistema de levitación se perdía rápidamente; 2) el intenso enfriamiento del sensor del dinamómetro alteraba las mediciones de éste, haciendo oscilar los valores de la fuerza en un rango cada vez mayor, en virtud del tiempo de exposición; por lo tanto, éstos datos se clasificaron como no confiables.

Los resultados en las gráficas pueden dividirse, para su análisis, en dos grupos básicos: las primeras tres pruebas que muestran tendencias similares y las últimas dos que se aprecian con comportamientos muy particulares. El siguiente análisis de las gráficas se hace de derecha a izquierda, considerando que las mediciones se hacen disminuyendo la distancia entre los elementos.

En el primer grupo la inducción magnética permaneció constante desde los 100 mm hasta aproximadamente los 35 mm, ascendiendo a partir de ese punto de forma constante, trazando una trayectoria de tipo parabólica. Las tres pruebas tienen el punto donde la inducción magnética pasa de negativa a positiva en el rango entre los 19 - 24 mm, siendo la primera, con un valor de 19.5 mm la que presenta mayor fuerza de repulsión del campo y una fuerza magnética menor; la última de estas tres pruebas fue hecha con el imán grande, mostrando los mayores valores de inducción, tanto en el rango negativo como en el positivo.

Los resultados de las fuerzas magnéticas no fueron tan claros como los de inducción, sin embargo, las tres gráficas marcaron valores en ascenso constante desde el principio de las mediciones, a los 100 mm de separación, hasta los 40 mm, en que comenzó a cambiar la pendiente. Las tres presentaron un máximo en el rango de los 19 - 27.5 mm, pero fue cada vez menos clara la tendencia de ascenso, como presentando una tendencia a gráficas oscilatorias a medida que se hacían la serie de pruebas.

Se esperaba que la distancia de levitación x sea igual a $D - x$, sin embargo, existen factores que hacen la segunda distancia mayor a la primera. Si el imán estuviese levitando sin medio alguno por debajo de él, esta situación ideal de daría, siendo simétrico el campo magnético por arriba y por debajo del imán; en el caso real, la presencia de la pastilla superconductora, sus efectos de anclaje del campo y el medio criogénico en que se encuentran, afectan la simetría del campo, reduciendo significativamente estas distancias (Ver Fig. 4.6).

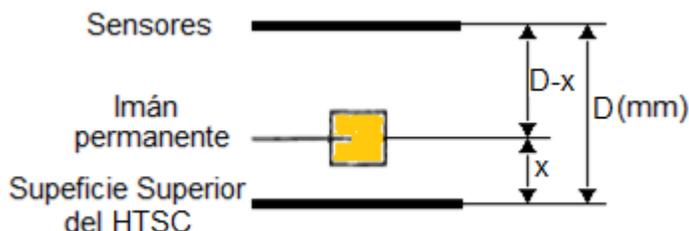


Fig. 4.6 Las mediciones son hechas con base en la distancia D .

Las mediciones que se hacen del campo magnético son sobre el imán en levitación libre, es decir, no se están haciendo para tomar la fuerza total de levitación. Dando tratamiento numérico a estos datos del campo magnético, se puede hacer el cálculo de las fuerzas totales, sin embargo, no compete a los objetivos de esta tesis el llegar a ese punto.

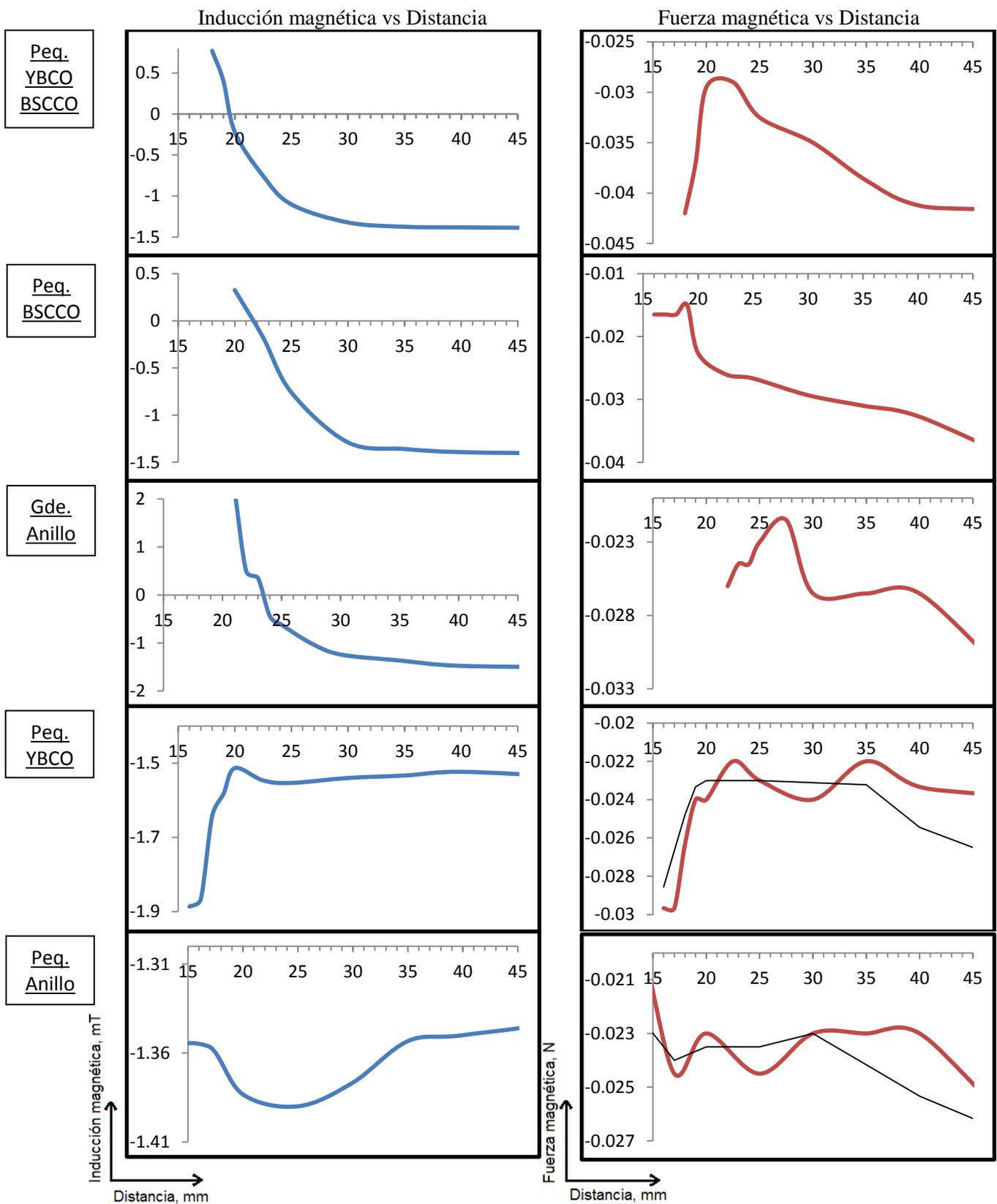


Fig. 4.7 Comparación de la inducción magnética y fuerza magnética para distintas configuraciones de sistemas superconductivos.

En el segundo grupo, las gráficas de inducción ya no presentan una tendencia clara a pesar de que ambas pruebas fueron hechas con el imán pequeño. Las pruebas con la pastilla YBCO presentan en principio y hasta los 20 mm aproximadamente, una tendencia similar a las del primer grupo: se aproxima con valores cercanos a -1.5 mT y comienza un aumento de la inducción en la zona de los 25 – 20 mm, misma en que las del primer grupo pasan a valores positivos; pero después de esto, ocurre un grave descenso confirmado por varios puntos de medición, en la misma prueba repetida varias veces. Las pruebas de inducción con el anillo resultaron aún más controversiales, ya que únicamente muestran una leve sima que sería prácticamente inapreciable si se le colocara junto a las otras gráficas de inducción; podría ser considerada como una línea constante al compararla con el resto de las pruebas, pero esta situación permite considerar la duda acerca de hasta qué punto fue un resultado erróneo, consecuencia del congelamiento del sensor del Teslómetro, y hasta qué punto fue un resultado correcto aunque inesperado del comportamiento de la inducción en este sistema.

En cuanto a las fuerzas magnéticas de este segundo grupo, la tendencia oscilatoria parece ir en aumento de una forma drástica, teniendo finales abruptos y difíciles de leer. Se presenta adicionalmente una línea de tendencia de tipo media móvil de tercer período para facilitar la visualización de la tendencia general, sin embargo, hay que aclarar que los resultados experimentales en estos puntos fueron cada vez menos confiables debido al aumento en el rango de oscilación de los parámetros medidos y a que el congelamiento del sensor afectó en repetidas ocasiones la serie de pruebas.

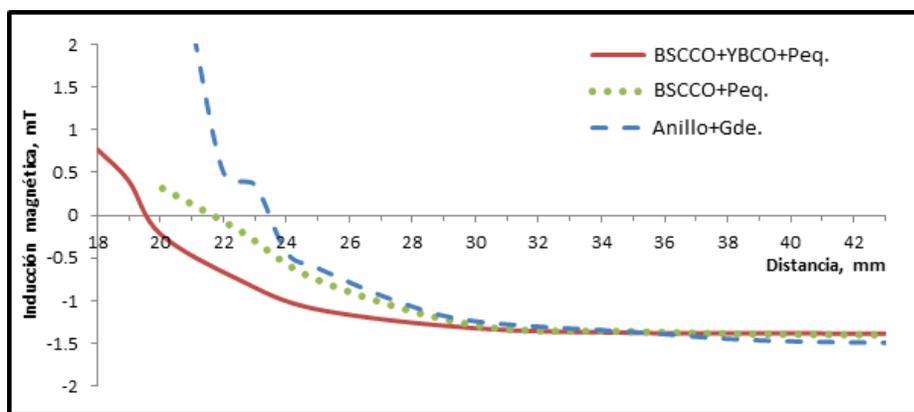


Fig. 4.8 Inducción magnética en las tres primeras configuraciones.

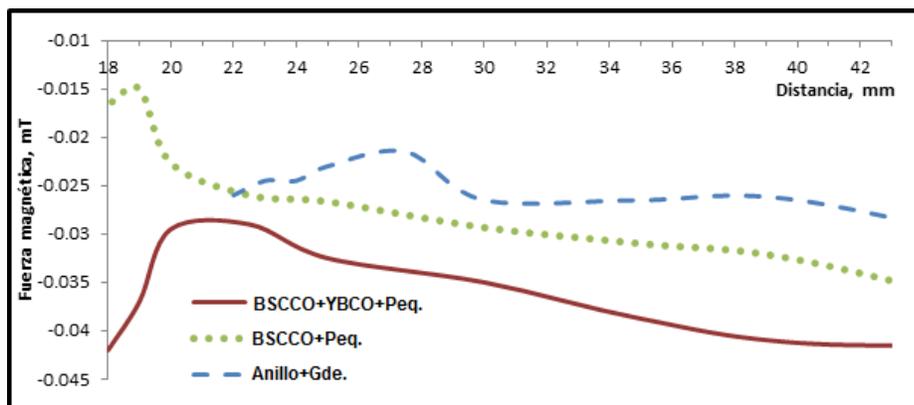


Fig. 4.9 Fuerza magnética en las tres primeras configuraciones.

Para terminar con el análisis de esta serie de pruebas, se empataron los resultados del primer grupo de experimentos (Ver Fig. 4.8, 4.9). Se pretende que estas gráficas y los datos numéricos sean la principal guía en el siguiente paso de la línea de investigación, que es el modelo matemático de este sistema.

Ya que H describe cuan intenso es el campo magnético en la región que afecta, mientras que B es la cantidad de flujo magnético por unidad de área que aparece en esa misma región, los datos para fines numéricos deberían ser tratados mediante su expresión en H. Ya que todas las corrientes que se dan en los superconductores son superficiales, podemos aplicar la fórmula:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \dots\dots\dots \text{Ec. (16)}$$

Donde: $\mu_0 = 4\pi \times 10^7 \frac{N}{A^2}$

Así, los datos de las cinco pruebas, quedan expresados como se aprecia en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Intensidad del campo magnético para las cinco configuraciones.

D mm	H (A/m)								
100	-1064348.68	100	-1084906.2	100	-1149894.46	100	-1156525.92	100	-939014.164
90	-1092200.8	90	-1108779.44	90	-1161831.08	90	-1183051.74	90	-965539.988
80	-1052412.06	80	-1116737.18	80	-1201619.82	80	-1225493.06	80	-1002676.14
70	-1100158.54	70	-1122042.35	70	-1217535.31	70	-1228145.64	70	-1015939.05
60	-1108116.29	60	-1116737.18	60	-1217535.31	60	-1228145.64	60	-1045117.46
50	-1106126.85	50	-1119389.77	50	-1197640.95	50	-1222840.48	50	-1066338.12
40	-1100158.54	40	-1108779.44	40	-1173767.71	40	-1212230.15	40	-1074295.87
35	-1094190.23	35	-1082253.61	35	-1086232.49	35	-1220187.9	35	-1076948.45
30	-1052412.06	30	-1026549.38	30	-986760.647	30	-1225493.06	30	-1095516.52
25	-877341.624	25	-604788.784	27.5	-799753.589	25	-1236103.39	25	-1106126.85
22.5	-600809.91	22.5	-140586.866	25	-493380.324	22.5	-1230798.23	20	-1100821.69
20	-175070.437	20	259953.074	24	-346162.001	20	-1204272.4	17	-1079601.03
19	318309.886	19	-226795.794	23	282500.024	19	-1259976.63	14	-1082253.61
18	612746.531	18	-131302.828	22	397887.358	18	-1307723.12	13	-1252018.89
		17	-79577.4715	21	1770598.74	17	-1485446.14	12	-1363427.35
		16	-51725.3565	20	-59683.1037	16	-1501361.63	11	-2074319.42
Peq.	YBCO	Peq.	BSCCO	Gde.	Anillo	Peq.	YBCO	Peq.	Anillo
	BSCCO								

Una última serie de pruebas realizadas únicamente para la inducción magnética es presentada en la Fig. 4.10. Estas pruebas se hicieron para determinar cuál de las dos partes del sistema tiene más influencia en los resultados: el tipo de superconductor o la potencia del campo magnético (variable mediante el tamaño del imán en cuestión).

Sin lugar a dudas, la variable preponderante en el sistema tiene que ver con el campo magnético que se ocupe, ya que las tres pruebas que se hicieron con el imán Peq. muestran de manera general un comportamiento similar: valores de inducción poco variables hasta el rango 35 – 40 mm, luego un ascenso de tipo parabólico hasta la inducción cero en el rango de los 18 - 23 mm y entonces un rápido crecimiento en la última zona de pruebas. Las pruebas con el imán grande, si bien muestran un comportamiento similar, su zona de acción se ve trasladada unos 10 – 15 mm a la derecha (el cambio en la inducción de negativa a positiva se presenta a mucho mayor distancia) y unos cuantos grados rotada en dirección horaria, ya que los valores constantes iniciales son mayores en el sentido negativo y una vez que sucede el ascenso y paso por la inducción cero, la pendiente negativa se vuelve más pronunciada en comparación con las gráficas del imán Peq.

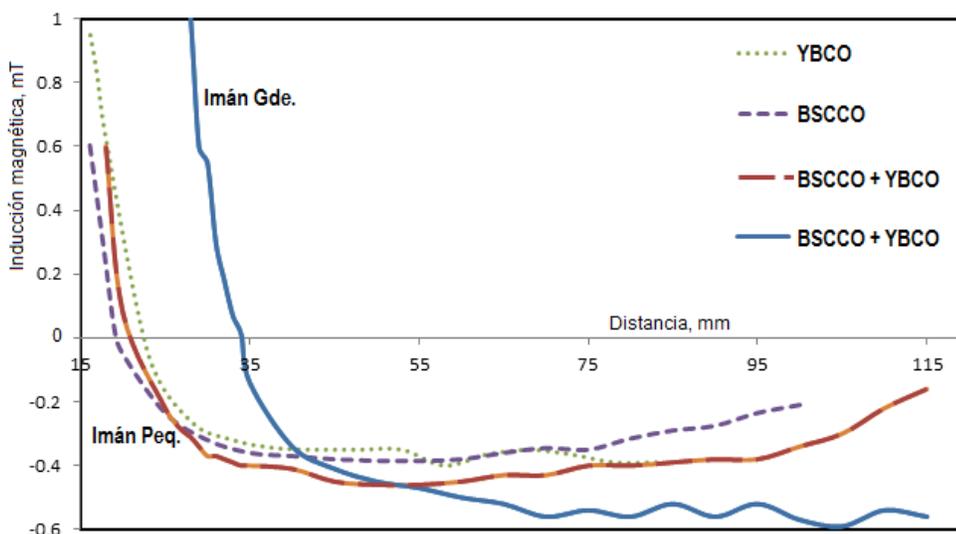


Fig. 4.10 Diferentes configuraciones para la relación Inducción magnética-Distancia.

4.3 Notas sobre los superconductores

Los siguientes puntos fueron observados durante el manejo de los superconductores en el laboratorio, se anotan aquí con el fin de que los posteriores trabajos de experimentación causen no solo una ingenua fascinación ante el fenómeno de la levitación, sino que se tengan referencias del porqué de ciertos fenómenos que en principio parecieran no tener una explicación lógica.

Debido a la naturaleza policristalina de una cerámica superconductora, el efecto Meissner aparece como un fenómeno de cuerpo. Esto fue demostrado por al acomodo, uno sobre otro, de las pastillas superconductoras. Con la adición de cada pastilla, el imán levitará más alto o el arreglo soportará un imán de mayor peso. Fue bajo estas condiciones que se logró poner en levitación al imán Gde., ya sea sobre el anillo, que tiene una masa mayor que cualquiera de las pastillas por más del doble, o sobre los cuerpos adicionados de las dos pastillas (Ver Fig. 4.11, Izq. y centro).

El imán en levitación difícilmente sale de la región en que está levitando por sobre el superconductor; este aparente equilibrio se debe al fenómeno de anclaje del flujo magnético típico de los superconductores de tipo II, como las muestras utilizadas en estos experimentos.

Cuando el imán está levitando se puede observar que tiene un leve movimiento de rotación, si se le da un leve impulso, la rotación aumentará su velocidad y puede durar así por mucho tiempo, hasta que la fricción con el aire termine por detener el movimiento del imán. En este punto entra en juego la forma de la pieza, así que se puede esperar que un imán cilíndrico continúe en movimiento por mucho más tiempo. Esta es una demostración inicial del funcionamiento de los cojinetes magnéticos.

Aunque los dos materiales superconductores que se utilizaron presentan levitación, si se retira del nitrógeno el anillo BSCCO, éste puede mantener el imán Peq. suspendido por unos segundos, a diferencia del YBCO que inmediatamente perderá sus propiedades superconductoras. Esto se debe a que el primero tiene una temperatura crítica más alta, por lo cual mantiene unos segundos más sus propiedades (Ver Fig. 4.11, Der.).

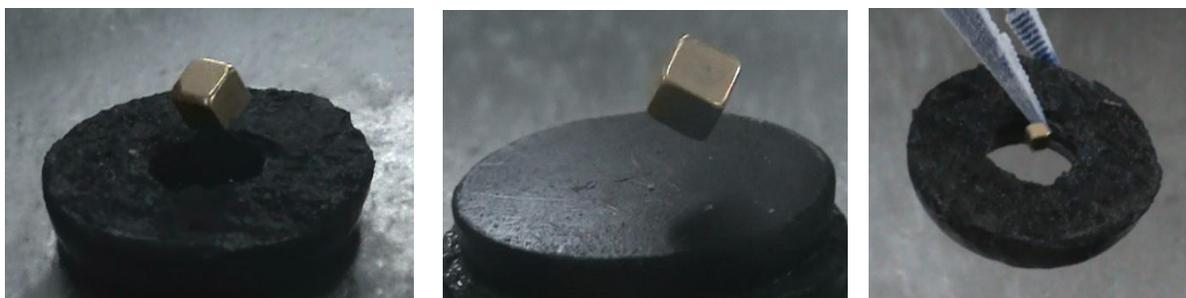


Fig. 4.11 Izq. Anillo BSCCO con el imán Gde. en levitación; Centro, dos pastillas superconductoras apiladas logran levitar el imán Gde.; Der. El anillo BSCCO se retira del N_L permaneciendo con propiedades superconductoras aún por varios segundos.

La imagen congelada del imán permanece mucho más fuerte en el anillo, ya sea por su forma o por su masa, el anclaje del flujo es mucho más fuerte en esta pieza, logrando atraer el imán a su área central como punto de equilibrio de la mínima energía; aun después de desplazamientos laterales de longitud mayor a su radio, el imán regresa al centro.

Resumiendo, en este último capítulo se hizo el arreglo experimental del sistema imán permanente – superconductor de alta temperatura, en que se miden los parámetros de fuerza e inducción magnética. Las mediciones de la fuerza magnética se hicieron para confrontarlas a los resultados teóricos que predecían su comportamiento, y los de inducción, para darle base al seguimiento de esta línea de investigación.

Se explicó el diseño del sistema criogénico hecho con materiales económicos y fáciles de conseguir, su evolución y mejoras, así como las medidas de seguridad necesarias para trabajar en el laboratorio con los materiales superconductores a temperaturas extremadamente bajas. Se hace nuevamente la recomendación de leer atentamente los manuales proporcionados en materia de seguridad por los proveedores del material, antes de recrear los experimentos aquí descritos.

Se hizo una breve descripción de los materiales incluidos en el “Kit Efecto Meissner” con que se trabajó, señalando que se utilizan estos dos materiales cerámicos, YBCO y BSCCO, debido a que son los materiales de mayor uso en la industria actual de superconductores de alta temperatura. Si bien hay otros compuestos con características más favorecedoras de temperatura crítica, aun no son ampliamente usados por varias razones: la dificultad de manufacturarlos, el costo de la

materia prima, la alta toxicidad de sus elementos, la pérdida de sus propiedades superconductoras al cabo de tiempos muy cortos, las complejidades de distribución y almacenaje debido a su alta sensibilidad al cambio de presión, etc. Siguen siendo entonces estos compuestos los más ampliamente usados en la industria y en los laboratorios.

Los resultados de la relación Fuerza magnética-Distancia muestran el punto de equilibrio o de mínima energía potencial cuando el sistema es estable, correspondiendo con la fuerza magnética cero, como se había predicho teóricamente para varios otros sistemas superconductores, presentados en el capítulo 3. Estos resultados aparecieron tanto en el arreglo estático, en el periodo de transición, como en el de distancias variables, aunque no todas las pruebas lograron la estabilidad de levitación necesaria.

Se dejan reportados en este capítulo los datos numéricos, cálculos y gráficas para ser retomados en la continuación de esta línea de investigación. Si fuera necesario hacer otra serie de experimentos complementarios, se recomienda con mucho énfasis la adquisición del equipo de cómputo complementario que va tomando los datos en tiempo real y hace la graficación por sí mismo, ya que esto permitiría hacer la adquisición de datos en tiempos mucho menores, evitando los problemas de la sobreexposición a las temperaturas criogénicas y dando mayor fiabilidad a los resultados. Esto es de mencionarse porque el tiempo de experimentación está muy limitado en tiempos, no solo por la evaporación del nitrógeno, sino también por la congelación de los sensores.

Ya en muchos textos a nivel internacional podemos encontrar que la investigación está dirigida a darle aplicación a los conocimientos teóricos ¿de quién sino del ingeniero es el trabajo de darle una aplicación útil y con beneficios económicos a la ciencia?

CONCLUSIONES

Se dio una introducción al mundo de los superconductores y su fenomenología con una visión ingenieril, ya que esta área del conocimiento ha sido por muchos años propiedad de la física del estado sólido, de la ingeniería de materiales y de la química en ocasiones, pero dista aún de ser propiedad de las áreas de aplicación como sistemas energéticos. Es necesario que la tecnología en términos de aplicaciones, le alcance el paso a la amplia investigación teórica de que estos materiales han gozado.

Se espera que esta lectura sea una útil iniciación para los ingenieros que se planteen continuar en esta línea de investigación, permitiéndoles elegir entre las muchas posibles aplicaciones que se enlistaron. Como parte de la línea de sistemas energéticos, nos incumbe principalmente la generación, distribución y almacenamiento de energía, es decir, el diseño de generadores superconductivos, la aplicación de motores lineales, el uso de cojinetes levitatorios, el diseño de cables superconductores con enfriamiento en nitrógeno y los volantes levitatorios para almacenamiento de energía son los posibles centros de estudio a futuro.

Después de haber visto las muchas aplicaciones que se tienen para los materiales superconductores, se eligió la rama de la levitación magnética como centro de atención experimental debido a que las aplicaciones en generación de energía se plantean como el objetivo final en esta línea de investigación. Con la configuración experimental se confirmaron los modelos matemáticos de levitación óptima, que predicen el paso de la fuerza magnética de positiva a negativa o viceversa pasando por un valor cero, donde el sistema es considerado estable. Este sistema experimental fue probado con la idea de mejorar, compactar y hacer más eficientes algunos sistemas ya operativos, así como plantear la posibilidad de crear un nuevo uso de este conocimiento en sistemas autoestables.

Aún hay un largo camino por recorrer en el área experimental, pero se dieron los primeros pasos para establecer la necesidad de un laboratorio bien fundamentado que trabaje con superconductores. Al trabajar en una zona no completamente apta para las condiciones criogénicas en que se provoca la superconductividad, una serie de dificultades aparecieron al trabajar con materiales y equipo perteneciente a otros laboratorios, principalmente dificultades en materia de seguridad y manipulación del nitrógeno.

Con este trabajo se da una posibilidad más de elección de las áreas de investigación en Sistemas Energéticos, siendo la aplicación de los superconductores una enorme promesa ingenieril para el siglo XXI.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ginzburg V. L. y Andryushin E. A., *Superconductivity*, 2004, edición revisada.
2. Ginzburg V. L. y Kirzhnits D. A., *High-Temperature Superconductivity*, Plenum, NY, 1982.
3. Bernodz J. G. y Muller K. A., Z., *Perovskite-type Osides- The new approach to High T_C Superconductivity*, Rev. Mod. Physics 60, 585-600, 1988.
4. Tinkham M., *Introduction to Superconductivity*, McGraw Hill, NY, 1996, 2a edición.
5. Ford P. J. y Saunders G. A., *The rise of the superconductors*, CRC Press, 2005.
6. Gallegos L. L., *Modelo de un acelerómetro superconductor*, México D.F., 2006, IPN (Tesis).
7. Buckel W., *Superconductivity-Fundamentals and applications*, VCH Weinheim, 1991.
8. Burns G., *High temperature superconductivity: an introduction*, Academic Press, 1992.
9. Cyrot M. y Pavuna D., *Introduction to superconductivity and high- T_c superconductivity*, World Scientific, Singapore, 1992.
10. Baquero R. y Navarro O., *Ideas fundamentales de la superconductividad*, UNAM, México, 2007.
11. Magaña S. F., *Los superconductores*, Colección "La ciencia desde México" No. 64, Fondo de Cultura Económica, México, 1988.
12. Bardeen J., *Electron-Phonon Interactions and superconductivity*, Physics today 26, 41, 1973.
13. Eliashberg G.M., Soviet Physics JETP 11, 696, 1960.
14. Norton, D.P., *Science and Technology of High Temperature Superconducting Films*, Annual Review of Materials Science 67, 299-347, 1998.
15. Gallop J. *Microwave applications of high temperature superconductors*, Supercond.Science technology, A120-141, 1997.
16. Simon R., *Superconductivity in electronics*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7, 69-79, 1997.
17. Richards P. L. *Bolometers for Infrared and Millimeter Waves*, Journal on Applied Physics 76, 1-24, 1994.
18. Schmidt V.V., *The physics of superconductors: Introduction to Fundamentals and Applications*, Springer Verlag, 1997.
19. Hari R. y Lounasmaa O. V. *Neuromagnetism: tracking the dynamics of the brain*, Physics World 13, 33-38, 2000.
20. Maestú C. et al, *Magnetoencefalografía: una nueva técnica de diagnóstico funcional en neurociencia*, Revista Neurología, 28 (11), 1077-1090, 1999.
21. Gallop, J.C., *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics*. Adam Hilger, Bristol, 1990.
22. Seeber Bernd, *Handbook of applied superconductivity*, Institute of Physics Publishing, 1998.
23. Tallon J., *Industry Warms to Superconductors*, Physics World 13, 27-31, 2000.
24. Slurzberg y Osterheld, *Fundamentos de electricidad y electrónica*, Mc Graw Hill, 1965.
25. Kirtley J. L., *Applications of superconductors to electric power generators*, Conf. on Electrical applications of superconductivity, Florida, EUA, 1988.
26. Narlikar A. V. *High Temperature Superconductivity 2: Engineering Applications*, Springer, 2004.
27. Doss I. D., *Engineers' Guide to High Temperature Superconductivity*, Wiley, NY, 1989.
28. Oppelt A. y Grandke T. *Magnetic Resonance Imaging*, Superconductivity Science and technology 6, 381-395, 1993.
29. Duchateau J. L. et al, *Monitoring and controlling TORE SUPRA toroidal field system, Status after a year of operating experience at nominal current*, IEEE Trans. Magn. MAG-27, 2053, 1991.

30. Perin R. y Leroy D., *High-field superconducting magnets for particle accelerators*, New techniques for future accelerators III, Ed. G Torelli, NY Plenum, 87-106, 1990.
31. Moon F. t Chang P. Z., *High Speed Rotation of Magnets on High T_C Superconducting bearings*, Applied Physics Lett. 56, 397-399, 1990.
32. Moon F. C. et al, *Hysteric Levitation Forces in Superconducting ceramics*, Plied Physics Lett. 52, 1534-1536, 1988.
33. Moon F. C., *Magnetic forces in High T_C Superconducting bearings*, Applied Electromagnetics Mater. 1, 29-35, 1990.
34. Moon F. C., *Superconducting Levitation, applications to bearings and magnetic transportation*, Wiley-VCH, 1994.
35. Novotny H., *After the breakthrough*, Cambridge University Press, 2002.
36. Brandt, E. H., *Rigid Levitation and Suspension of High-Temperature Superconductors by Magnets*, Journal Physics 58, 43-49, 1990.
37. Braunbeck W., *Levitating bodies in electric and magnetic fields*, Physics 112, 753-763, 1939.
38. Arkadiev V., *A floating Magnet*, Nature 160, 330, 1947.
39. Bourke R. D., *A Theoreticala and Experimental Study of a Superconducting Magnetically-supported Spinning Body*, NASA Contractor Report CR-108, 1964.
40. Woods L. C. et al, *Stability Analysis of Levitated Superconducting Current Ring Stabilized by Feed-back and Eddy Current*, Applied Physics 41, 3295-3305, 1970.
41. Marek, A., *Levitation Stability of Superconducting Rings in a Central Magnetic Field*, Procedure 25th IECEC 3, 438-443, 1990.
42. Rashkovan V. et al, *Superconductivity Ring like Elements of Magnetic Levitation*,
43. Davis L. C., *Lateral Resorting Force on a Magnet Levitated Above a Superconductor*, Applied Physics 67, 2631-2636, 1990.
44. Nemoshkalenko, V. V. et al, *Dynamics of a Permanent Magnet Levitating Above a High- T_C Superconductor*, Physica C 170, 481-485, 1990.
45. Braun M. et al, *Vibration Frecuency and Height of a Magnet Levitation over a Type II Superconductor*, Physica C 171, 537-542, 1990.
46. Crandall S. et al, *Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems*, McGraw Hill, 1968.
47. Rashkovan V., *Magnetic Interaction of Arbitrarily Placed Electric Contours*,

Fuentes de internet (referenciados en el texto como [número-i])

1. www.superconductors.org
2. www.webelements.com
3. nobelprize.org
4. bibliotecadigital.ilce.edu.mx
5. www.mtixtl.com
6. www.msfc.nasa.gov
7. www.cryoinfra.com
8. www.imanesneodimio.es

APÉNDICE A: TABLA PERIODICA DE LOS ELEMENTOS

Tabla periódica de los elementos

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Config.	s ¹	s ²	d ¹	d ²	d ³	d ⁴	d ⁵	d ⁶	d ⁷	d ⁸	d ⁹	d ¹⁰	p ¹	p ²	p ³	p ⁴	p ⁵	p ⁶
Período	metales		metales pesados (transición)										no metales					
1	1 ±1 1,00 H hidrógeno	2 ±1 3,01 He helio																
2	3 5,94 Li litio	4 9,01 Be berilio																
3	11 22,99 Na sodio	12 24,30 Mg magnesio																
4	19 39,1 K potasio	20 40,08 Ca calcio	21 44,96 Sc escandio	22 47,87 Ti titanio	23 50,94 V vanadio	24 51,99 Cr cromo	25 54,94 Mn manganeso	26 55,84 Fe hierro	27 58,93 Co cobalto	28 58,69 Ni níquel	29 63,54 Cu cobre	30 65,40 Zn zinc	(1)					
5	37 85,47 Rb rubidio	38 87,62 Sr estroncio	39 88,90 Y itrio	40 91,22 Zr zirconio	41 92,9 Nb niobio	42 95,9 Mo molibdeno	43 98 Tc tecnecio	44 101 Ru rutenio	45 102,9 Rh rodio	46 106,4 Pd paladio	47 107,9 Ag plata	48 112,4 Cd cadmio	49 114,8 In indio	50 118,7 Sn estaño	51 121,7 Sb antimonio	52 127,6 Te teluro	53 126,9 I yodo	54 131,3 Xe xenón
6	55 132,9 Cs cesio	56 137,3 Ba bario	57-71 Lantánidos	72 178,5 Hf hafnio	73 180,9 Ta tantalio	74 183,8 W volframio	75 186,2 Re renio	76 187,6 Os osmio	77 192,2 Ir iridio	78 195,1 Pt platino	79 197 Au oro	80 200,6 Hg mercurio	81 204,4 Tl talio	82 207,2 Pb plomo	83 208,9 Bi bismuto	84 209 Po polonio	85 [210] At astato	86 [222] Rn radón
7	87 [223] Fr francio	88 [226] Ra radio	89-103 Actínidos	104 [261] Rf rutherfordio	105 [262] Db dubnio	106 [263] Sg seaborgio	107 [264] Bh bohrio	108 [265] Hs hassio	109 [268] Mt meitnerio	110 [281] Un unnilio	111 [272] Uu ununilium	112 [285] Uub ununbium	113 [288] Uut ununtrium	114 [289] Uuq ununquadium	115 [290] Uup ununpentium	116 [291] Uuh ununhexium	117 [293] Uus ununseptium	118 [294] Uuo ununoctium
<p>(1) punto de fusión bajo; (Z*) config. electrónica anómala; *Hacia arriba y derecha aumenta los caracteres: no metálico, ácido, electronegativo y oxidante.</p>																		
<p>Config. d¹ f¹ f² f³ f⁴ f⁵ f⁶ f⁷ f⁸ f⁹ f¹⁰ f¹¹ f¹² f¹³ f¹⁴</p>																		
<p>SÓLIDOS LÍQUIDOS GASES SINTÉTICO: * RADIATIVO color de símbolo (estado a 25°C)</p>																		

APÉNDICE B: MEDICIONES EXPERIMENTALES

Imán Peq.	YBCO BSCCO									
	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Promedio	
mm	mT	N	mT	N	mT	N	mT	N	mT	N
100	-1.3	-0.08	-1.25	-0.07	-1.6	-0.08	-1.2	-0.05	-1.3375	-0.07
90	-1.34	-0.07	-1.3	-0.06	-1.57	-0.08	-1.28	-0.04	-1.3725	-0.0625
80	-1.29	-0.06	-1.31	-0.06	-1.33	-0.08	-1.36	-0.04	-1.3225	-0.06
70	-1.31	-0.06	-1.32	-0.05	-1.54	-0.07	-1.36	-0.04	-1.3825	-0.055
60	-1.31	-0.05	-1.35	-0.05	-1.51	-0.07	-1.4	-0.03	-1.3925	-0.05
50	-1.3	-0.05	-1.36	-0.03	-1.5	-0.06	-1.4	-0.03	-1.39	-0.0425
40	-1.31	-0.05	-1.37	-0.025	-1.45	-0.06	-1.4	-0.03	-1.3825	-0.04125
35	-1.3	-0.05	-1.39	-0.02	-1.42	-0.055	-1.39	-0.03	-1.375	-0.03875
30	-1.12	-0.04	-1.39	-0.02	-1.4	-0.05	-1.38	-0.03	-1.3225	-0.035
25	-0.8	-0.03	-1.13	-0.02	-1.21	-0.05	-1.27	-0.03	-1.1025	-0.0325
22.5	-0.53	-0.03	-0.85	-0.02	-0.84	-0.04	-0.8	-0.026	-0.755	-0.029
20	-0.3	-0.02	-0.2	-0.025	-0.2	-0.04	-0.18	-0.033	-0.22	-0.0295
19	0.2	-0.04	0.1	-0.025	0.8	-0.043	0.5	-0.04	0.4	-0.037
18	0.33	-0.04	0.15	-0.035	1.6	-0.043	1	-0.05	0.77	-0.042
17	1.24	-0.05		-0.045	2	-0.05	1.4	-0.05		
16		-0.05		-0.05		-0.05	1.5	-0.05		

Imán Peq.	BSCCO									
	prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Promedio	
mm	mT	N								
100	-1.17	-0.07	-1.51	-0.06	-1.41	-0.07	-1.33	-0.05	-1.36333	-0.06667
90	-1.22	-0.06	-1.5	-0.05	-1.46	-0.07	-1.41	-0.043	-1.39333	-0.06
80	-1.28	-0.06	-1.48	-0.05	-1.45	-0.063	-1.41	-0.04	-1.40333	-0.05767
70	-1.3	-0.05	-1.46	-0.04	-1.47	-0.053	-1.44	-0.04	-1.41	-0.04767
60	-1.28	-0.05	-1.46	-0.03	-1.47	-0.053	-1.45	-0.04	-1.40333	-0.04433
50	-1.3	-0.045	-1.46	-0.025	-1.46	-0.05	-1.46	-0.033	-1.40667	-0.04
40	-1.29	-0.04	-1.43	-0.015	-1.46	-0.043	-1.45	-0.033	-1.39333	-0.03267
35	-1.27	-0.03	-1.38	-0.02	-1.43	-0.043	-1.43	-0.033	-1.36	-0.031
30	-1.21	-0.025	-1.27	-0.02	-1.39	-0.043	-1.41	-0.033	-1.29	-0.02933
25	-0.41	-0.02	-0.6	-0.02	-1.27	-0.04	-1.33	-0.033	-0.76	-0.02667
22.5	0.59	-0.025	0.02	-0.02	-1.14	-0.033	-1.25	-0.02	-0.17667	-0.026
20	0.75	-0.035	1.1	0	-0.87	-0.033	-1.2	-0.03	0.326667	-0.02267
19	0.93	-0.04			-0.57	-0.03	-1.15	-0.023	-0.285	-0.015
18		-0.05			-0.33	-0.033	-1.27	-0.023	-0.165	-0.0165
17		-0.05			-0.2	-0.033	-0.92	-0.033	-0.1	-0.0165
16		-0.05			-0.13	-0.033	-1.04	-0.033	-0.065	-0.0165

Imán	YBCO							
Peq.	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Promedio	
mm	mT	N	mT	N	mT	N	mT	N
100	-1.53	-0.05	-1.28	-0.033	-1.55	-0.043	-1.45333	-0.042
90	-1.53	-0.043	-1.36	-0.023	-1.57	-0.04	-1.48667	-0.03533
80	-1.53	-0.04	-1.49	-0.02	-1.6	-0.036	-1.54	-0.032
70	-1.53	-0.033	-1.5	-0.023	-1.6	-0.033	-1.54333	-0.02967
60	-1.53	-0.033	-1.5	-0.02	-1.6	-0.033	-1.54333	-0.02867
50	-1.53	-0.023	-1.5	-0.02	-1.58	-0.03	-1.53667	-0.02433
40	-1.51	-0.02	-1.48	-0.02	-1.58	-0.03	-1.52333	-0.02333
35	-1.51	-0.02	-1.5	-0.02	-1.59	-0.026	-1.53333	-0.022
30	-1.51	-0.02	-1.52	-0.026	-1.59	-0.026	-1.54	-0.024
25	-1.53	-0.023	-1.54	-0.026	-1.59	-0.02	-1.55333	-0.023
22.5	-1.53	-0.02	-1.56	-0.023	-1.55	-0.023	-1.54667	-0.022
20	-1.4	-0.023	-1.64	-0.023	-1.5	-0.026	-1.51333	-0.024
19	-1.42	-0.023	-1.73	-0.023	-1.6	-0.026	-1.58333	-0.024
18	-1.48	-0.03	-1.85	-0.026	-1.6	-0.023	-1.64333	-0.02633
17	-1.8	-0.036	-2.1	-0.023	-1.7	-0.03	-1.86667	-0.02967
16	-1.72	-0.036	-2.05	-0.023	-1.89	-0.03	-1.88667	-0.02967
15			-3.6	-0.026	-2.03	-0.033		

Imán	Anillo							
Peq.	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Promedio	
mm	mT	N	mT	N	mT	N	mT	N
100	-1.07	-0.04	-1.2	-0.033	-1.27	-0.05	-1.18	-0.0365
90	-1.15	-0.036	-1.19	-0.023	-1.3	-0.05	-1.21333	-0.0295
80	-1.21	-0.033	-1.25	-0.03	-1.32	-0.04	-1.26	-0.0315
70	-1.22	-0.033	-1.29	-0.023	-1.32	-0.036	-1.27667	-0.028
60	-1.25	-0.033	-1.32	-0.02	-1.37	-0.033	-1.31333	-0.0265
50	-1.3	-0.03	-1.32	-0.023	-1.4	-0.03	-1.34	-0.0265
40	-1.32	-0.023	-1.33	-0.023	-1.4	-0.026	-1.35	-0.023
35	-1.31	-0.023	-1.35	-0.023	-1.4	-0.026	-1.35333	-0.023
30	-1.35	-0.026	-1.38	-0.02	-1.4	-0.026	-1.37667	-0.023
25	-1.38	-0.023	-1.37	-0.026	-1.42	-0.02	-1.39	-0.0245
20	-1.38	-0.02	-1.3	-0.026	-1.47	-0.03	-1.38333	-0.023
17	-1.35	-0.023	-1.22	-0.026	-1.5	-1.5	-1.35667	-0.0245
14	-1.27	-0.02	-1.33	-0.02	-1.48	-1.48	-1.36	-0.02
13	-1.58	-0.023	-1.76	-0.023	-1.38	-1.38	-1.57333	-0.023
12	-1.62	-0.023	-2.24	-0.02	-1.28	-1.18	-1.71333	-0.0215
11	-2.5	-0.02	-3.7	-0.023	-1.62	-0.62	-2.60667	-0.0215
10			-3.54	-0.026	-2.8	-2.8		

Imán Gde. mm	Anillo							
	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Promedio	
	mT	N	mT	N	mT	N	mT	N
100	-1.48	-0.05	-1.45	-0.036	-1.44	-0.05	-1.445	-0.05
90	-1.53	-0.05	-1.48	-0.033	-1.44	-0.04	-1.46	-0.045
80	-1.55	-0.046	-1.53	-0.033	-1.49	-0.04	-1.51	-0.043
70	-1.58	-0.036	-1.55	-0.033	-1.51	-0.04	-1.53	-0.038
60	-1.59	-0.033	-1.53	-0.023	-1.53	-0.04	-1.53	-0.0365
50	-1.63	-0.03	-1.45	-0.03	-1.56	-0.036	-1.505	-0.033
40	-1.68	-0.02	-1.34	-0.02	-1.61	-0.033	-1.475	-0.0265
35	-1.76	-0.023	-1.06	-0.026	-1.67	-0.03	-1.365	-0.0265
30	-2.09	-0.023	-0.75	-0.03	-1.73	-0.03	-1.24	-0.0265
27.5	-2.28	-0.02	-0.24	-0.023	-1.77	-0.023	-1.005	-0.0215
25	-2.58	-0.02	0.5	-0.023	-1.74	-0.026	-0.62	-0.023
24	-2.8	-0.023	0.84	-0.023	-1.71	-0.026	-0.435	-0.0245
23	-3.13	-0.026	2.34	-0.026	-1.63	-0.023	0.355	-0.0245
22	-3.14	-0.026	2.48	-0.026	-1.48	-0.026	0.5	-0.026
21	-3.39	-0.026	5.25	-0.026	-0.8	-0.02	2.225	-0.023
20	-4.4	-0.023		-0.03	-0.15	-0.02	-0.075	-0.0215
19	-5.25	-0.023		-0.033	0.48	-0.02	0.24	-0.0215
18	-8.45	-0.03		-0.036	1.9	-0.03	0.95	-0.03
17	-8.47	-0.033		-0.036		-0.02	0	-0.0265

APÉNCIDE C: PUBLICACIONES

Back

2009 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2009) (Formerly known as ICEEE) Toluca, México, November 10-13, 2009



Magnetic Interaction in Superconducting Systems Modelling

Ana Dulce Ibarra Velázquez, Fidel Agustín Sanginés Lezama, Edgar Isaac Rivas Hernández, Iryna Ponomaryova

Section of Postgraduate Studies and Investigation, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Av. Santa Ana 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP 04430, México, D.F. Tel/Fax: (52-55)56242000 ext. 73264. E-mail: iripon76@yahoo.com.mx.

Abstract — This article describes the effect of “magnetic potential well” (MPW) that is considered to be an exclusion of the classical Earnshaw’s theorem. Two physical effects are described here: the relationship between the minimum potential energy produced by the magnetic interaction and the stability between the static system and the magnetic interaction. Both the theoretical model and the experimental part confirm that the presence of the zero force of the magnetic interaction gives minimum of potential energy and provides the system stability.

Keywords – Interaction, particle, ring, stability

I. INTRODUCTION

The effect of MPW consists in the possibility of the existence of a zero potential energy of magnetic interaction as a function of distance between two magnetic elements. Superconductivity is the necessary condition for the magnetic levitation of two types: one is based on diamagnetic repulsion and the other is based on the minimum of the magnetic energy. When a small permanent magnet descends on a superconducting tablet it induces the currents that repulse the magnet. The effect is called flux pinning when the magnetic flux lines do not move (become trapped or “pinned”) in spite of the Lorentz force acting inside a current carrying II type superconductor. Flux pinning is only possible when there are defects in the crystalline structure of the superconductor (usually resulting from grain boundaries or impurities). This article is purposed to analyze and understand the behavior of the magnetic force in superconducting systems of magnetic interaction. Through variation of distances between the two elements of each of the superconducting systems described below the magnetic force changes from attracting to repulsing and vice versa and passing through zero provides the system stability at the minimum of potential energy of the system. The achieved experience and investigation of stationary motion conditions of a levitating system may be proposed for transport, machine building and other areas of mechanics, electrodynamics, automatic control, etc. [1], [2], [3].

II. METHODOLOGY

Electric spot-charge motion in the magnetic field of a fine ring (Fig. 1) is defined by Newton

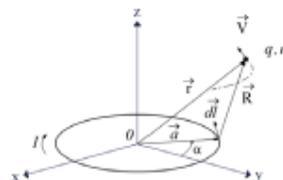


Fig. 1. Electric charge moving in superconducting ring magnetic field.

motion equation for non-relativistic case ($v/c \ll 1$) and in absence of external magnetic fields (V. S. Michalevich [1], V. Rashkovan [2]):

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -q \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + q \vec{V} \times \vec{B} \quad (1)$$

where m is the particle mass, \vec{V} is the particle velocity, q , is the particle charge, \vec{A} is the electromagnetic field potential, \vec{B} is the magnetic induction and c is the vacuum velocity.

When $\partial \vec{A} / \partial t = 0$, the motion equation for electric charge in the ring magnetic field is as follows

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{\mu_0 q}{4\pi L} \vec{V} \times \left[\left(1 - \frac{q}{4\pi \epsilon_0 c^2} \int \frac{V' d\vec{R}}{R' - \frac{V' R'}{c}} \right) \cdot \int \frac{d\vec{R} \times \vec{R}}{R'} \right] \quad (2)$$

Analytic solution to equation 2 (Lorenz magnetic force) is given as

$$p = p \lambda_1 \left(K + \frac{1+n}{1-n} E \right) \cdot \left(1 + \lambda_1 \int_0^\pi \frac{\cos 2\theta d\theta}{p \sin 2\theta + \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (3)$$

Where $\lambda_1 = \frac{q\psi}{2\pi \epsilon_0 c a L}$ is the parameter with units of

force; $\lambda = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 c^2 V}$ is the parameter that describes the

interaction between the superconducting ring magnetic field and the particle magnetic field; $K = K(k)$, $E = E(k)$ are the full elliptical integrals of the modulus $k = 2\sqrt{ar}/(a+r)$ where a is the ring radius; $p = \frac{a}{a+r} \frac{V}{c}$ and $n = \frac{r}{a}$ are non-dimensional geometric parameters, μ_0 is the vacuum permeability, ϵ_0 is the vacuum permittivity, ψ is the magnetic flux, L is the ring inductance, R is the radius-vector from the contour to the particle, R_0 is the variable radius-vector from the contour to the

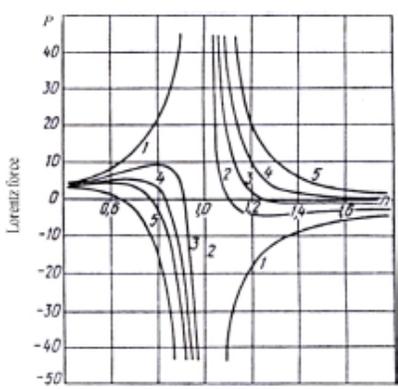


Fig. 2 Magnetic potential well effect in the particle – ideal ring system.

particle, r is the variable radius-vector from the coordinate center to the particle.

THEOREM: When the charged particle trajectory radius $r_0 \in (r_1 < r_2 < r < r_1 < \infty)$ coincides with the radius axis, Lorentz magnetic force $P = q \cdot (v \times B)$ changes sign shifting from repulsing ($r < r_0$) to attractive ($r > r_0$) and passing through zero ($r = r_0$), if and only if $f_0(\Psi, r, \dot{r}) \neq 0$ for all $r_0 \in [r_1, r_2]$ in the motion

equation $\ddot{r} = \zeta_0 \Psi [\dot{r} \times (\dot{r} - f_0(\Psi, r, \dot{r}))] f_1(r)$, which is the consequence of the magnetic flux conservation law for the superconductive system. r_1 is the maximum particle trajectory radius, r_2 is the minimum particle trajectory radius, \dot{r} is the particle velocity. Depending on both λ and the orbital radius of the particle motion the Lorentz force will change from repulsive to attractive when passing through zero (Fig. 2).

This method is presented to guarantee stable orbital motion of a circular particle beam in a superconducting ring magnetic field without external stabilizing fields. Superconductive self-control system is based on the "magnetic potential well" phenomenon.

III. RESULTS

The measurement of the axial force and the torque of the magnetic interaction between the superconducting coil and the ring constant magnet was made (Fig. 3 and 4). The superconducting coil of the alloy Nb-Sn was placed in a special cryostat and cooled at the temperature of the liquid helium. The constant ring magnet of $SmCo_5$ was replaced first in the axial direction and then in the radial one with the angle changing at the fixed distance between the two rings centers. The error of the force measurement was

$\pm 0.1Gr$ and the error of the moment measurement was $\pm 1Gr \cdot cm$. Dependence of the magnetic force (axial magnetic field) on the distance between the constant ring magnet (1) and the superconducting coil (2) is presented in Fig. 3 at different distance values. The presence of the zero force of the magnetic interaction on each curve (Fig. 3) confirms the consideration of minimum potential energy of magnetic interaction of the system. This provides the system stability in the axial direction. The same stability conditions were applied for the radial force.

The presence of the magnetic interaction return moment in the system "superconducting coil - constant ring magnet" provides the system stability by the angle (Fig.4).

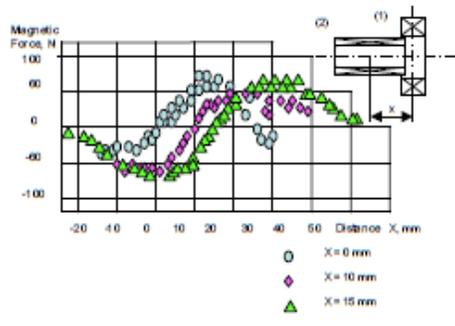


Fig.3 Dependence of the magnetic force (axial magnetic field) on the distance between the ring permanent magnet (1) and the superconducting coil (2).

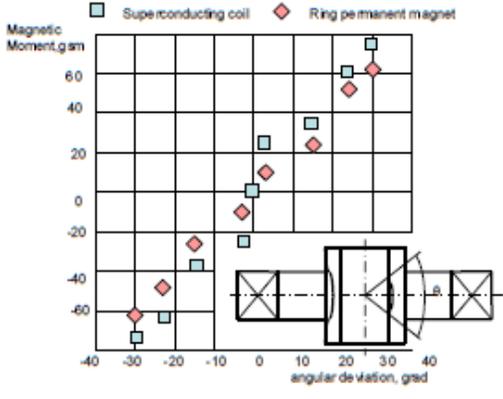


Fig. 4. Dependence of the rotation magnetic moment on the angle between the axes of the fixed superconducting coil and the ring permanent magnet.

Magnetic force and magnetic induction were measured in the experiment on magnetic levitation. The cubic magnet of 0.4 g of mass and 2mm×2mm×2mm of dimensions was levitating above the YBCO tablet cooled with liquid nitrogen at the temperature 77K (Fig.5). By changing the distances between the digital dynamometer indicator and the superconductor surface the magnetic force was measured as a function of distance. The magnetic induction was taken with teslameter at the point of the digital dynamometer indicator as the function of a distance (TABLES I and II). The experiment confirms that there is a point of equilibrium or minimum of potential energy when the system superconductor – levitating magnet is stable that corresponds to the zero magnetic force. One can see (TABLES I and II) that the magnetic force may be positive, negative and passes through zero where the system is considered to be stable.

TABLE I

MEASUREMENT OF MAGNETIC FORCE AND MAGNETIC INDUCTION OF THE MAGNETIC FIELD OF THE CUBIC MAGNET (2MM×2MM×2MM) LEVITATING ABOVE THE YBCO TABLET AT DIFFERENT DISTANCES

Distance, $\times 10^{-4}$ m	Magnetic Force, N	Magnetic Induction, mT
11.06	0.03	1.7
23.01	0.01	5.0
33.87	-0.07	4.7
38.43	-0.13	7.0

TABLE II

MEASUREMENT OF MAGNETIC FORCE AND MAGNETIC INDUCTION OF THE MAGNETIC FIELD OF THE CUBIC MAGNET (2MM×2MM×2MM) LEVITATING ABOVE THE YBCO TABLET AT THE DISTANCE $1243 \cdot 10^{-7}$ M DURING THE TRANSITION

Time, s	Magnetic Force, N	Magnetic Induction, mT
2	0.04	7.2
4	0.01	6
6	-0.02	5.7
8	-0.03	6.4
10	-0.05	6.6
12	-0.07	7.1
14	-0.08	7.2



Fig. 5. Magnetic levitation experimental set.

V. CONCLUSION

The mathematical model of the system superconducting ring – charged particle describes magnetic interaction and the behavior of the magnetic force. This method is presented to guarantee stable orbital motion of a circular particle beam in a superconducting ring magnetic field without external stabilizing fields. The “magnetic potential well” phenomenon gives the bases to creating superconducting self-control systems. The experimental results showed two new effects in the systems of magnetic interaction. There is a minimum of potential energy of magnetic interaction when the magnetic force (that is a function of a distance) passes through zero and it could be weather attractive or repellent. Both theoretical and experimental models confirm the possibility of existence of the static equilibrium of the magnetically interacting bodies. These systems are stable due to the minimum of potential energy and flux pinning of ideal diamagnetics which are the II type superconductors.

REFERENCES

- [1] V. S. Michalevich, V. V. Kozorez, V. M. Rakhkovan “Magnetic Potential Well – Effect of the Superconductive Dynamic Systems Stabilization”, *Kiev. Naukova Dumka*, p. 336, 1991.
- [2] V. Rakhkovan, I. Ponomaryova, D. Guzman Ramirez “Stability of Charged Particles Movement in Superconductive Ring Magnetic Field”, *ICEE-2004, Veracruz, Mexico*
- [3] O.M. Pignasty et al. “Superconductive Stabilization Systems for Charged Particle Accelerators”, *LINAC 96, Proceedings of the XVIII International Conference, Geneva 1996*.

Desarrollo de un Generador Superconductor de Matriz Polimérica

Ana Dulce Ibarra Velázquez,¹ Iryna Ponomaryova,¹ Nefi A. Barron H.²

¹ Sección de Estudios de Posgrado e investigación, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Av. Santa Ana 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP 04430, México, D.F., E-mail: ibarra_adc@yahoo.com.mx

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Av. Santa Ana 1000, Col. San Francisco Culhuacán, CP 04430, México, D.F., E-mail: nbarronh0700@ipn.mx

Resumen

En el presente trabajo se proponen materiales alternativos para la construcción de generadores eléctricos. En la actualidad, la generación de energía se ha vuelto tema central en las investigaciones tecnológicas, sin embargo, los métodos de generación de electricidad no ha cambiado sustancialmente desde principios del siglo pasado. Por otra parte, los materiales tradicionales de los cuales están hechos los generadores eléctricos incrementan su costo cada día y, en consecuencia, los generadores aumentan de precio constantemente. En busca de aumentar la eficiencia en la generación de energía, se plantean dos propuestas: la primera es cambiar la fuente magnética del generador de imanes a superconductores; y la segunda es cambiar el material del que están conformadas la carcasa y el núcleo de acero a un polímero, haciendo el generador más barato, ligero y eficiente. Los resultados serían fácilmente apreciables al observar la relación costo-beneficio que tiene esta construcción, aunado a una producción más limpia en beneficio del medio ambiente.

Palabras clave: Generación de electricidad, superconductor, matriz polimérica.

Otras publicaciones:

1. “Desinfección de granos por medio de un campo electromagnético de alta frecuencia”
6° Congreso Internacional de Ingeniería
ISBN 978-607-7740-39-1, Pág. 74-79.
Querétaro, México, Abril 21-23 del 2010.
2. “Estudio experimental de los vórtices de las puntas de ala de una aeronave Boeing 737 serie 300 y sus efectos en tierra”
6° Congreso Internacional de Ingeniería
ISBN 978-607-7740-39-1, Pág. 184-192.
Querétaro, México, Abril 21-23 del 2010.
3. “Método de fabricación de un modelo a escala de la aeronave Boeing 737-300 mediante el sistema CAD-CAM para experimentación en túnel de viento”
Coloquio de Ciencia y Tecnología Aeroespacial “Aeroespacio 2010”
México D.F., Marzo 17-19 del 2010.
4. “Insect control by radio-frequency high-strength electric fields”
6th International Conference on electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control
ISBN 978-1-4244-4689-6, Pág. 15-16.
Toluca, México, Noviembre 10-13 del 2009.