

136
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“LOS SUPERCONDUCTORES Y SUS
PERSPECTIVAS FUTURAS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
ARCENIO ALEJANDRO VIQUEZ CANO
HUMBERTO ALVAREZ CHIAPA

ASESOR: ING. BENJAMIN CONTRERAS SANTACRUZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Los Superconductores y sus perspectivas futuras"

que presenta el pasante, Humberto Alvarez Chiapa
con número de cuenta: 8503370-2 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU" 22 Abril 6
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a _____ de _____ de 199__

PRESIDENTE Ing. Benjamín Contreras Santacruz

VOCAL Ing. Fsteban Corona Escamilla

SECRETARIO Ing. Ricardo Ramírez Verdeja

PRIMER SUPLENTE Ing. Jaime Rodríguez Martínez

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVANZA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Los Superconductores y sus perspectivas futuras".

que presenta el pasante: Arzenio Alejandro Viquez Cano
con número de cuenta: 8502082-5 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPERITU" 21 Abril 6
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a ___ de ___ de 199__

PRESIDENTE Ing. Benjamín Contreras Santacruz
VOCAL Ing. Esteban Corona Escamilla
SECRETARIO Ing. Ricardo Ramírez Verdeja
PRIMER SUPLENTE Ing. Jaime Rodríguez Martínez
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico:

A mis padres

Por haber sembrado en mi el deseo de superación, por darme un hogar estable confianza, amor y esperanza.

A mis hermanos

Por su apoyo y motivación para un futuro mejor.

A mis amigos

Por su apoyo siempre incondicional.

HUMBERTO

El presente trabajo se lo dedico:

A mis padres

Por su amor, confianza, comprensión
y paciencia de toda la vida.

A mis hermanos

Con Admiración y agradecimiento por
su gran apoyo y cariño.

A mi sobrino Omar S.

Por darle una gran alegría a mi vida.

Arcenio Alejandro

AGRADECIMIENTOS

Mediante estas líneas quisiera agradecer :

A Humberto por compartir la realización de este trabajo, además de su amistad incondicional de siempre.

A Sergio y Juan Jesús por que junto con Humberto han compartido conmigo días y noches de gran amistad.

A Oscar por estar tan cerca durante los últimos 10 años.

A todos aquellos que me han brindado su amistad sincera y que sería muy difícil mencionarlos a todos.

Arcenio Alcjandro

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Benjamín Contreras Santacruz por su ayuda y apoyo en la realización del presente trabajo.

A los sinodales de este trabajo por sus sugerencias y comentarios.

A la F.E.S - CUAUTITLAN Por darnos la oportunidad de realizar nuestros estudios universitarios.

ÍNDICE

Lista de figuras	i
Lista de tablas	ii
Glosario de símbolos	iii
Introducción	iv
CAPITULO 1 Historia de los superconductores	1
1.1 Orígenes de la superconductividad	1
CAPITULO 2 Materiales superconductores	14
2.1 Efectos de la temperatura en conductores y semiconductores.	14
2.2 Materiales superconductores	18
2.3 Perovskitas	20
CAPITULO 3 Aplicaciones de los superconductores	34
3.1 Aplicaciones generales	34
3.2 Aplicaciones magnéticas	35
3.3 Aplicaciones Médicas	38
3.4 Superimanes	39
3.5 Generadores y líneas de transmisión	41
3.6 Trenes levitados	43
3.7 Computadoras superconductoras	46
3.8 Superconductividad en radiofrecuencia	49
CAPITULO 4 Almacenamiento de energía	50
4.1 Concepto de energía	51
4.2 Almacenamiento de energía	54
4.3 Sistemas inductivos de almacenamiento de energía	57

CAPITULO 5	Análisis de fabricación	58
5.1	Molienda	58
5.2	Recocido	58
5.3	Compactacion	59
5.4	Recocido de sinterización	60
5.5	Reciclado	61
5.5	Medición del valor de la temperatura crítica	63
5.6	Prueba de levitación magnética	67
5.7	Preparación metalográfica	68
5.8	Tratamientos térmicos	69
5.9	Análisis de resultados	71
CAPITULO 6	Levitación magnética	75
6.1	Levitación en transporte	75
6.2	Prueba de levitación realizada con una pastilla cerámica del compuesto 1-2-3 de Itrio, bario y cobre	80
CAPITULO 7	Perspectivas futuras	83
7.1	Sistemas de defensa	83
7.2	Cables superconductores	85
7.3	Electrónica	87
7.4	Comercialización de la superconductividad	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		93
BIBLIOGRAFÍA.		96

LISTA DE FIGURAS

FIG.		PAG.
1.1	Variación de la resistencia al disminuir la temperatura, utilizando al platino como material.	2
1.2	Variación de la resistencia que presenta el mercurio a una temperatura de 4.4 °K.	3
1.3	Efecto que presenta el campo magnético al disminuir la temperatura en el material	4
1.4	Efectos que se presenta en el material en estado normal y en el estado superconductor en relación al campo magnético.	5
1.5	La interacción de apareamiento entre electrones tiene lugar porque el movimiento del electrón 1 modifica la vibración del ion y este a su vez interacciona con el electrón	8
1.6	El efecto isótopo en Hg. Una representación logarítmica de la temperatura de transición en función de la masa atómica para varias muestras isotópicamente enriquecidas. La línea tiene una pendiente de 0.504 mostrando buen acuerdo con la predicción $M^{1/2}$.	11
1.7	La variación con la temperatura de la banda de energía prohibida comparada con su valor de 0°K para el Sn, Ta, Pb. Nb. La línea continua se calcula a partir de la teoría BCS.	13
2.1	Comportamiento de la resistencia del cobre como conductor en función de la temperatura	15
2.2	(a) Se muestra el átomo de silicio aislado (b) Se muestra como se combinan los átomos de silicio para tener 8 electrones de valencia, cuando los átomos de silicio se combinan para formar un sólido, se acomodan siguiendo una configuración ordenada llamada cristal, Las fuerzas que mantienen a los átomos unidos entre sí se llaman enlaces covalentes.	17
2.3	Unidad estructural básica de las perovskitas.	21
4.1	Sistema superconductor magnético de almacenamiento de energía	56
5.1	Cilindro y embolo para realizar la compactación	60
5.2	Diagrama de flujo que muestra el proceso de fabricación de una pastilla superconductora	62
5.3	Dispositivo que ayuda a medir la temperatura crítica	63
5.4	Equipo necesario para determinar la temperatura crítica	66
5.5	Gráfica que representa la variación de la magnetización con respecto a la temperatura	66
5.6	Experimento que comprueba el efecto Meissner	67
5.7	Dispositivo de recocido en oxígeno	70
6.1	Sistema de levitación por atracción	79
6.2	Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación	81
6.3	Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación	82
6.4	Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación	82
7.1	Tipo de cable superconductor	81
7.2	Esquema que muestra el criotron o relevador superconductor	84

LISTA DE TABLAS

TABLA		PAG.
2.1	Variación de la temperatura de diferentes materiales en función de su resistencia.	16
2.2	Temperaturas críticas de diferentes materiales superconductores	18
2.3	Elementos que se pueden considerar perovskitas	23
3.1	costos de operación anual en cuanto a la generación eléctrica tomando en cuenta un sistema convencional y un sistema superconductor.	35

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
$^{\circ}\text{K}$	Temperatura en grados Kelvin
Pt	Platino
Hg	Mercurio
T_c	Temperatura crítica
T	Temperatura
H_c	Campo magnético crítico
B	Inducción magnética
BCS	Bardeen, Cooper, Schrieffer
M	Masa atómica
K	Vectores de onda
Sn	Estaño
Ta	Talio
Nb	Niobio
A, B	Cationes metálicos
X	Aniones metálicos
PZT	Perovskitas de interés comercial
MW	Mega-Watt
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
Pa	Pascal
Km	Kilometro
h	Hora
SDI	Investigación estratégica de defensa
I_1, I_2	Corrientes eléctricas
$R, R_1, R_2,$ R_3	Resistencia eléctricas

INTRODUCCIÓN

Hace algunos años en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la U.N.A.M. Un grupo de investigadores dedicados al estudio de materiales a bajas temperaturas, logro en un solo par de meses superconductores de alta temperatura crítica a 90 °K. Este importante avance científico, que significaba rebasar en más del triple de la temperatura de 23° K. que logran los superconductores conocidos como A-15 (los mas altos que existían), coloco a México a la cabeza de América Latina en esa materia y no muy distante de Estados Unidos, en donde se ha alcanzado temperaturas del orden de 98°K.

Desde que se formó el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, la idea fue lograr el fenómeno de superconductividad. El primer grupo que se formo en el Instituto en aquel tiempo, y por tradición el básico, fue el de bajas temperaturas críticas. Al respecto se explico que la utopía de los investigadores que trabajan con bajas temperaturas era lograr superconductores a altas temperaturas.

Los superconductores son materiales en los que a cierta temperatura la resistencia eléctrica se vuelve cero. Dicha temperatura generalmente es muy baja y del orden de algunos grados Kelvin. Lo anterior quiere decir que la corriente eléctrica, por ejemplo, se puede conducir sin pérdidas. Con superconductores de alta temperatura crítica o cercanos a la temperatura ambiente, se podrían crear campos magnéticos inmensos; computadoras ultrarrápidas, al aprovechar las ventajas de los dispositivos superconductores, e importantes avances médicos.

INTRODUCCIÓN

Tras una larga búsqueda en varios laboratorios del mundo tratando de obtener superconductores más altos a los existentes (de 23°K) en un artículo publicado por J.G. Bednorz y K.A. Müller en el que se planteaba la posibilidad de lograr la superconductividad a 30°K . La observación anterior tenía como base estudios realizados con óxidos que tienen una estructura tipo perovskita (compuestos de lantano, bario y cobre).

En el Instituto se explicó que después de 20 años de trabajar con superconductores de 23°K , la reflexión era en torno a la posibilidad de la superconductividad a 30°K desencadenó una revolución en la búsqueda de superconductividad con estos óxidos.

Meses mas tarde, entre noviembre y diciembre de 1986, un grupo de japoneses publicó gran cantidad de trabajos en los que se reportaron temperaturas de 35°K . En enero de 1987 en Estados Unidos se encontraron superconductoras a 40 , 50 y 60°K y en febrero se logró la superconductividad a temperaturas de hasta 90°K .

Ante estos acontecimientos, se piensa que es la oportunidad de hacer superconductores a temperaturas más altas, ya que parece no existir ningún límite. De hecho, el premio Nobel de Física P.W. Anderson opinó que el límite podría ser a 600°K .

Los investigadores de la UNAM mencionan que los superconductores normales como el cobre, la plata y el oro son superconductores pero que en otros como el plomo, el aluminio y el estaño el material se condensa y presenta superconductividad a muy bajas

INTRODUCCIÓN

temperaturas, debido a un proceso de interacción entre electrones y fotones. pero los nuevos superconductores son totalmente diferentes y son Cerámicas, con estructuras laminares similares a las perovskitas y tal parece que en estos nuevos compuestos la superconductividad es un proceso que se origina debido a la bidimensionalidad del sistema.

Con respecto a la infraestructura y al equipo con que se cuenta el IIM, se cuenta con la infraestructura, aunque no con laboratorios adecuados.

La capacidad que tienen los superconductores para almacenar energía en forma de campos magnéticos y supercorrientes en espiras, convierte a estos materiales en excelentes baterías. Así la energía solar vuelve a ser una opción importante al tener un depósito prácticamente ilimitado para almacenar la corriente que proviene de una celda fotovoltaica (y lo mismo se aplica en cualquier otra fuente alternativa de energía como la eólica, mareas, etcétera, así como la proveniente de fuentes convencionales) . Incluso, se puede concebir un automóvil que funcione durante una semana con estas baterías; el refrigerador de aire que necesita este curioso automóvil actuaría como un separador de los elementos contaminantes en la atmósfera, de manera que se tendrían vehículos que descontaminarían el aire.

Pero quizás la aplicación más inmediata de estos materiales está en el campo de la computación y de las comunicaciones. Aquí no se trata solamente de una gran ganancia de la rapidez de los circuitos y en incrementar la densidad de los elementos en un chip, si no en la

INTRODUCCIÓN

concepción de nuevas arquitecturas y configuraciones de los propios elementos electrónicos. No obstante, la fabricación de las cerámicas superconductoras es un método cerámico convencional, que consiste en mezclar óxidos de cobre, bario y lantano; a continuación se muelen hasta formar un polvo tan fino como el talco, se comprimen con una prensa hidráulica para formar pequeñas pastillas, se calienta en un horno a 1000 °C en una atmósfera rica en oxígeno, se repite la operación unas 5 veces y es todo.

Lo anterior no debe significar que la investigación básica se reduce a eso. Es necesario trabajar mucho con grupos interdisciplinarios para resolver problemas que se traducirán en dar el gran paso tecnológico en un futuro cercano o lejano. En primer lugar, existen, además de la temperatura dos parámetros importantes en la fase superconductor: el campo magnético y la densidad de corriente (la cantidad de corriente que atraviesa un área transversal del material) todos los superconductores soportan un campo magnético por debajo de un valor crítico, así como una densidad de corriente menor a cierto valor, también crítico. por encima de cualquiera de ellos, el material realiza una transición a estado normal. Entonces las aplicaciones requieren de materiales que cumplan con características prácticas específicas. Además están las propiedades mecánicas que son fundamentalmente para cualquier aplicación práctica. Como se sabe, las cerámicas son materiales rígidos y frágiles, de manera que no presentan fácilmente para la construcción de, por ejemplo, transmisores de corriente a escala industrial. Para ello, es necesario inventar, ya sea un sustrato con las de materiales cerámicos, consolidan sus investigaciones al realizar importantes estudios sobre propiedades de

INTRODUCCIÓN

superconductividad fuera de equilibrio, intercalación en materiales laminares, metales sintéticos de baja dimensión y brechas energéticas de superconductores, entre otros.

En el presente trabajo se pretenden presentar algunos aspectos importantes del fenómeno de la superconductividad, como son la levitación magnética, el almacenamiento de energía y algunos otros.

En los primeros capítulos se da una explicación de los antecedentes del fenómeno de la superconductividad, además de presentar algunos materiales que se han utilizado en el proceso de desarrollo de la superconductividad, posteriormente se hace un análisis de las aplicaciones que se han dado y se observan actualmente utilizando superconductores, además de mostrar el procedimiento de fabricación de una pastilla superconductora, que nos reafirma el concepto de lo que implica el fenómeno de la superconductividad.

Como punto final de esta investigación se hacen algunas consideraciones en cuanto a las perspectivas futuras de los superconductores.

CAPÍTULO 1

HISTORIA DE LOS SUPERCONDUCTORES

1.1 ORÍGENES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

A principios del siglo 20 Kamerlingh Onnes, después de múltiples estudios y esfuerzos logra la licuefacción del helio a una temperatura de 4.2 ° K, en ese momento Onnes decide dirigir sus investigaciones hacia la variación de la conductividad eléctrica de los metales a las temperaturas que se manejaban con la licuefacción del helio, dentro de los primeros materiales con los que empieza a trabajar se encuentra el platino, para este material encuentra que la resistencia disminuye linealmente, reduciendo la temperatura, hasta un cierto valor a partir del cual la resistencia permanece constante, este efecto lo podemos observar en la figura 1.1.

RESISTENCIA



TEMPERATURA

Fig. 1.1- Variación de la resistencia al disminuir la temperatura, utilizando al platino como material.

Esta resistencia se conoce como resistencia residual y es debida a las impurezas del material. Onnes para reducir esta resistencia residual, escogió como su siguiente material a experimentar al mercurio, ya que lo podía purificar fácilmente. Para sorpresa de Onnes encuentra que la resistencia cae abruptamente a cero a una determinada temperatura (4.4° K), pero en una observación importante notó que el mercurio impuro observaba el mismo comportamiento tal y como se muestra en la figura 1.2

CAPITULO 1 HISTORIA DE LOS SUPERCONDUCTORES

RESISTENCIA

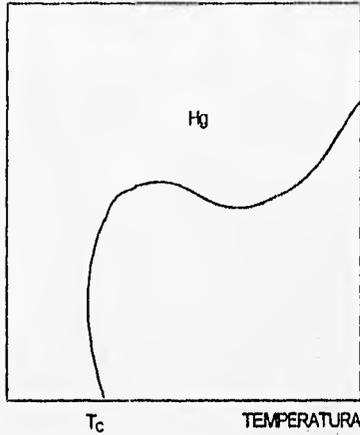


Fig. 1.2.- Variación de la resistencia que presenta el mercurio a una temperatura de 4.4 °K.

Posteriormente se concluyó que se había encontrado un nuevo estado de la materia que su característica principal era la de tener una resistencia óhmica cero y se denominó superconductividad. A la temperatura en donde se observa el valor de la resistencia igual a cero como se observa en la figura 1.2 se le denomina temperatura crítica (T_c), posteriormente se mostró que otros materiales como el plomo y el estaño también eran materiales superconductores.

Kammerlingh Onnes descubrió otra propiedad importante de los superconductores que es, cuando el metal se coloca en un campo magnético suficientemente fuerte, la superconductividad se destruye, mas sin

embargo reaparecía cuando se quitaba el campo, en la figura 1.3 se muestra el efecto del campo magnético contra la temperatura. El campo magnético mínimo para destruir la superconductividad se denomina campo crítico y se denota por H_c .

Como se muestra en la figura la curva H_c - T divide el plano en dos regiones una para el estado normal y otra para el estado superconductor, el tipo de curva es semejante para todos los materiales que presentan superconductividad y muestran las siguientes características:

- la pendiente es siempre negativa
- la pendiente en el punto $T=T_c$ ($H_c = 0$) es finita
- la pendiente cuando $T=0$ es cero.

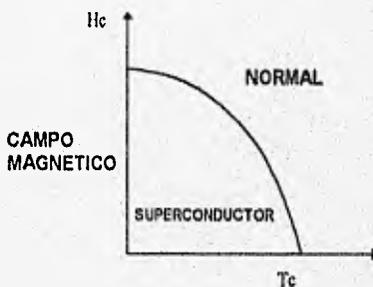


Fig.1.3.- Efecto que presenta el campo magnético a disminuir la temperatura en el material

La dependencia de H_c con la temperatura para la mayoría de los superconductores esta dada por la relación:

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - (T/T_c) \right]^2$$

donde $H_c(0)$ es el campo critico a $T = 0$.

Si no se tiene un campo suficientemente fuerte para romper el estado de superconductividad, todas las líneas de fuerza magnética eran expelidas y la inducción magnética toma el valor de cero como lo muestra la figura 1.4.

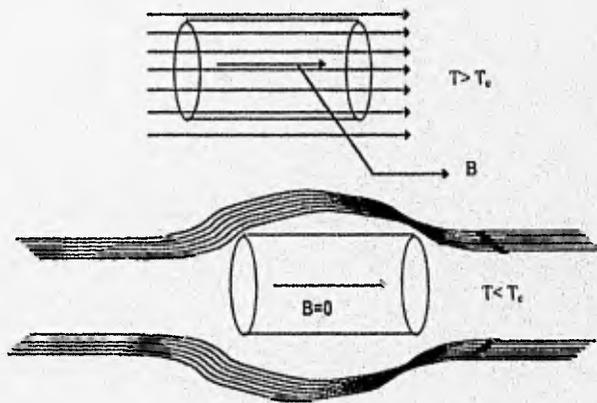


Fig. 1.4.- Efectos que se presenta en el material en estado normal y en el estado superconductor en relación al campo magnético.

Como se ha mencionado anteriormente un superconductor por debajo de su temperatura crítica, tiene la característica de tener un valor de resistencia ohmica de valor cero.

Ahora veamos si se enfría un material por debajo de su temperatura crítica se vuelve un conductor perfecto, si primero la muestra se enfría por debajo de la temperatura crítica y como se mencionó anteriormente el campo magnético externo es cero. Si enseguida se aplica un campo magnético externo tal que $0 < H < H_c$. Debido a que la densidad del flujo en el metal no puede cambiar, esta permanece cero aún después de que se quita el campo magnético.

Si a continuación primero se aplica un campo magnético H tal que $0 < H < H_c$. cuando la temperatura del material es mayor que la temperatura crítica (T_c). Y a continuación se enfría hasta la temperatura crítica en que pierde su resistencia ohmica, debido nuevamente a que la densidad del flujo debe permanecer constante en el tiempo, se tiene que la cantidad de flujo que se encuentra en el material no debe cambiar aún después de quitar poco a poco el campo externo.

Lo anterior nos lleva a que la inducción magnética interna depende del camino seguido para llegar al estado final, es decir no es una función única de las condiciones externas.

Durante mucho tiempo se creyó que las propiedades magnéticas de los superconductores se podían deducir de su característica de conductividad infinita, es decir tengan el comportamiento que se acaba de describir. Pero en los inicios de la década de los treinta Meissner y

Ochsenfeld hicieron un estudio en donde se midió con mucho cuidado la distribución del flujo alrededor de una muestra superconductor y se observo que no importando la historia magnética y térmica del superconductor, la inducción magnética dentro de el es siempre cero, es decir $B = 0$ como se muestra en la figura 1.4.

Esto nos llevo a la conclusión que este efecto denominado Meissner establece que un material en estado superconductor en un campo magnético externo, es un estado estable en el cual se podian aplicar perfectamente las leyes de la termodinámica.

Posteriormente la idea fundamental de la teoría moderna de la superconductividad es que los electrones se aparean entre si debido a una interacción atractiva de tipo especial. La resistividad nula se explica entonces suponiendo que un par solo puede ser difundido si la energía involucrada es suficiente como para descomponerlo en dos electrones simples. En general esta energía no esta disponible y de esta manera el par pasa sin ser desviado por las impurezas.

Observando la interacción de Coulomb entre electrones da lugar a una repulsión y que la interacción atractiva entre pares es algo mucho más sutil. Es una interacción indirecta y esta ocasionada por la forma en que responde un ion positivo en el cristal al paso de los electrones por su vecindad. Si se considera un electrón que pasa cerca de un ion, existirá una atracción momentánea entre ellos que puede modificar ligeramente la vibración del ion. Este a su vez, puede interactuar con un segundo electrón de las proximidades que también se vera atraído hacía el ion fig. 1,5 pero el efecto neto de estas dos interacciones es una aparente fuerza

atractiva entre los dos electrones y dicha fuerza no hubiese aparecido si el ion no hubiese estado presente.

Aunque esta interacción de apareamiento podría existir en principio sería extremadamente débil. El paso importante fue dado por Cooper en los años 50 quien demostró que si existía una interacción atractiva, con independencia de la pequeñez de la misma, el estado de energía más baja del sistema a $T_c = 0$ °K sería aquel en que los electrones estuviesen apareados, como consecuencia estos pares se denominan pares de Cooper.

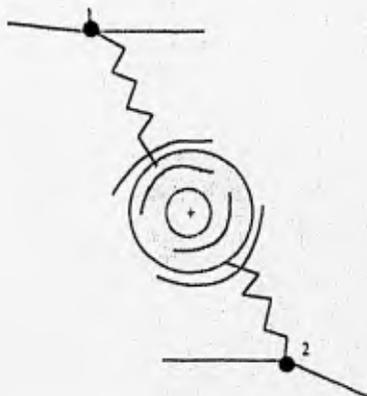


Fig. 1.5.- La interacción de apareamiento entre electrones tiene lugar porque el movimiento del electrón 1 modifica la vibración de ion y este a su vez interactúa con el electrón.

CAPITULO 1

HISTORIA DE LOS SUPERCONDUCTORES

El desarrollo de esta hipótesis de apareamiento culminó con la teoría propuesta por Bardeen, Cooper y Schrieffer en los mismos años 50 y que se le denomina como la teoría BCS que es una de las bases del conocimiento del superconductor.

La teoría BCS se basa en técnicas mecanocuánticas avanzadas que tratan el conjunto total de electrones como un sistema acoplado.

La energía de apareamiento depende de la magnitud de la interacción entre los electrones y los iones y puesto que la energía involucrada es bastante pequeña los pares pueden romperse por activación térmica. Los pares comienzan a formarse a la temperatura crítica T_c , al disminuir la temperatura aumenta el número de pares estables, hasta que a 0°K todos los posibles pares electrónicos estarían constituidos. De manera que aunque el material sea superconductor siempre existirían algunos electrones desapareados.

La idea de dos tipos de estados electrónicos era la base del modelo de los dos fluidos de la superconductividad dada a conocer en los años 30 que explicaba las hasta entonces conocidas propiedades de los superconductores. En este modelo se consideraba que el conjunto de electrones estaba compuesto de dos fluidos interpenetrantes de electrones superconductores y normales, cuyas proporciones relativas variaban con la temperatura siguiendo la relación $[1 - (T / T_c)^4]$. La analogía existente entre los electrones apareados de la teoría BCS y los fluidos superconductores y normales del modelo de los dos fluidos mantuvo vigente las ideas de este modelo dentro del marco de la teoría BCS.

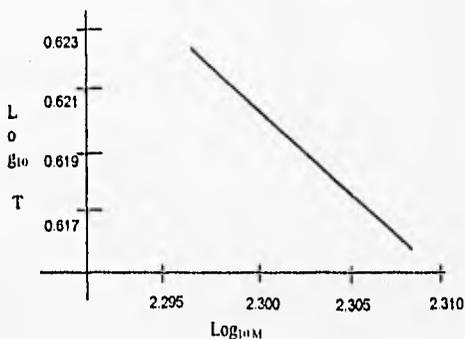


Fig.1.6.- El efecto isótopo en Hg. Una representación logarítmica de la temperatura de transición en función de la masa atómica para varias muestras isotópicamente enriquecidas. La línea tiene una pendiente de -0.504 mostrando buen acuerdo con la predicción $M^{-1/2}$.

Puesto que un par electrónico tiene una energía menor que dos electrones normales existe una banda prohibida de energía entre los estados electrónicos apareados y los de dos electrones libre. Esta energía se denota con frecuencia por 2Δ , de modo que la energía neta para excitar cada electrón es Δ aunque ambos deben ser excitados simultáneamente. En principio dos electrones cualquiera se pueden aparear, con tal de que su vector de onda neto se conserve antes y después del intercambio del fonon virtual. Se puede demostrar sin embargo que cuando no fluye corriente, la distribución más probable, y la que se corresponde con el estado fundamental superconductor, es aquella en la que los pares están formados por electrones con vectores de onda (k) , de igual magnitud y signo

CAPITULO 1 HISTORIA DE LOS SUPERCONDUCTORES

opuesto es decir ($+k\uparrow$, $-k\downarrow$). Todos los pares tienen la misma energía y este estado puede considerarse como uno de entropía cero. puesto que el k neto de un par es cero, los pares no tienen momento y este estado no transporta corriente los pares se forman de tal manera que el vector de onda neto sea el mismo para todos.

La banda prohibida de energía, 2Δ , no es igual a la energía asociada a una única interacción con un fonón virtual, aunque esta íntimamente relacionada con ella. La interacción existe durante un instante y luego se termina. Para que la atracción se mantenga entre un par, debe existir un intercambio continuo de fonones virtuales, y por tanto un cambio continuo de estados de pares electrónico. Si existe un número grande de estados adecuados disponibles, la probabilidad de interacción de los fonones virtuales será elevada y la energía de enlace del par (2Δ) será grande. Sin embargo a temperaturas cercanas a T_c existirá un número elevado de electrones individuales excitados y el número de estados disponibles para las interacciones de pares se verá reducido. De manera que en las proximidades de la T_c , 2Δ disminuye rápidamente y a T_c se hace nula como se muestra en la fig. 1.7, A 0°K la teoría BCS predice que 2Δ debe de ser de alrededor de $3.5 kT_c$.

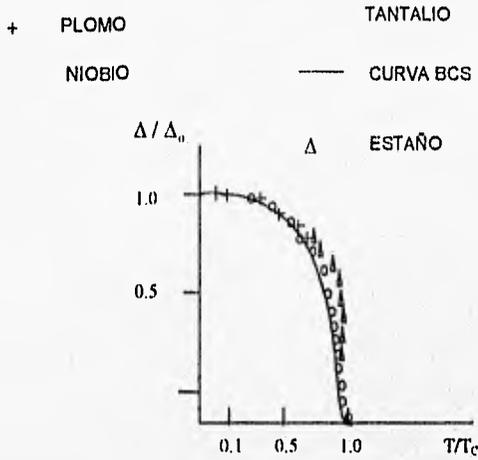


Fig.1.7.- La variación con la temperatura de la banda de energía prohibida, comparada con su valor a 0 °K para el Sn, Ta, Pb, Nb. La línea continua se calcula a partir de la teoría BCS.

CAPÍTULO 2

MATERIALES SUPERCONDUCTORES

2.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN CONDUCTORES Y SEMICONDUCTORES.

Empezaremos por analizar el efecto de la temperatura en los materiales llamados conductores, el efecto que se tiene es que el valor de la resistencia ohmica se incrementa al tener un aumento en el valor de la temperatura, en la figura 2.1 se muestra el comportamiento del cobre el material mas usado en la conducción de corriente eléctrica en función de la temperatura.

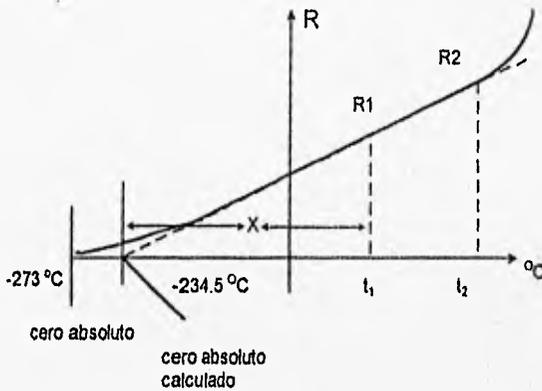


Fig. 2.1- Comportamiento de la resistencia del cobre como conductor en función de la temperatura.

Como se puede observar la resistencia tiene un aumento casi en forma lineal al aumento de temperatura. En la gráfica se obtuvo una ecuación de la línea recta que se aproxima lo más posible a la curva real que como se puede observar en la figura, termina en el cero absoluto 0°K ó -273°C y en la recta calculada esta corta al eje de la temperatura en 39°K , que aunque existe diferencia podemos decir que tenemos una buena aproximación, ahora observemos cuidadosamente, tenemos dos temperaturas diferentes t_1 y t_2 y dos valores para la resistencia del cobre R_1 y R_2 , si se utiliza el hecho de que se forman dos triángulos semejantes, se puede obtener la siguiente expresión matemática:

$$\frac{39+t_1}{R_1} = \frac{39+t_2}{R_2}$$

A partir de esta relación podemos calcular diferentes valores para el valor de la resistencia del cobre a diferentes temperaturas. El valor de 234.5 es el valor que se utiliza para el cobre y para otros materiales se obtienen los valores que se muestran en la tabla 2.1.

TABLA 2.1

MATERIAL	TEMPERATURA ° K
COBRE	39
PLATA	30.50
ORO	39.5
ALUMINIO	37.5

En conclusión en un conductor a una disminución de temperatura habrá una disminución en el valor de la resistencia ohmica y al incremento de la temperatura existe un aumento en el valor de la resistencia.

Ahora veamos que ocurre con los llamados semiconductores en estos generalmente se utiliza como material al silicio, un átomo de silicio aislado tiene 4 electrones en su órbita de valencia. Para ser estable químicamente un átomo de silicio necesita 8 electrones en dicha órbita. Para mostrar esto tenemos la siguiente figura:

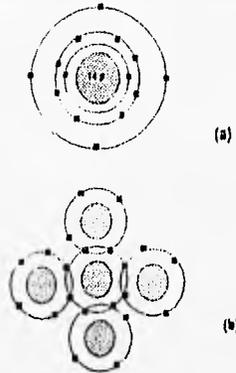


Fig. 2.2 (a) se muestra el átomo de silicio aislado
(b) se muestra como se combinan átomos de silicio para tener 8 electrones en su órbita de valencia, cuando los átomos de silicio se combinan para formar un sólido, se acomodan siguiendo una configuración ordenada llamada cristal, Las fuerzas que mantienen a los átomos unidos entre sí se llaman enlaces covalentes.

A una temperatura de cero absoluto los electrones no se pueden mover a través del cristal. Todos los electrones de valencia se encuentran firmemente unidos a los átomos de silicio esto se debe a que son parte de los enlaces covalentes. En resumen a temperaturas de cero absoluto no existe ninguna corriente en el cristal de silicio.

Entonces se puede mencionar que en la gama de los materiales semiconductores que se han utilizado en diodos transistores etc. la

resistencia disminuye al aumentar la temperatura. En las siguientes secciones veremos como es que en un superconductor el efecto de la temperatura tiene un comportamiento completamente diferente.

2.2 MATERIALES SUPERCONDUCTORES

Durante el desarrollo de los superconductores se han utilizado diferentes materiales, entre ellos los que se presentan en la tabla 2.2. donde se muestran los diferentes materiales y las temperaturas críticas que manejan.

TABLA 2.2

MATERIAL	TEMPERATURA CRITICA °K
Ti	0.4
Al	1.2
Sn	3.7
Hg	4.2
Nb	9.2
NbN	16
V ₃ S ₁	17.1
Nb ₃ Sn	18.1
Ca ₂ LaCuO ₄	40
Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7+x}	98

Dentro de la clasificación de los materiales superconductores, se tienen los superconductores del tipo I que son normalmente elementos puros, y los superconductores del tipo II normalmente son aleaciones o

metales de transición. Ahora bien los óxidos superconductores presentan una curva de magnetización que va mas de acuerdo con los superconductores del tipo II.

Dentro de los problemas que presentaban los superconductores del tipo I era que para enfriarlos se usaba el helio líquido que es muy costoso, pero al manejar posteriormente el nitrógeno líquido que es mas abundante y menos costoso, este problema se redujo aunque las temperaturas críticas de este tipo de superconductores seguían siendo extremadamente bajas, por eso es que fueron surgiendo los superconductores del tipo II cuyas temperaturas críticas eran cada vez menos bajas.

El hecho de que se utilice el nitrógeno como refrigerante abrió en su momento como ya se menciona, nuevos horizontes al ser este uno de los principales componentes de la atmósfera. Dando como ventaja que cuando este refrigerante se evapora, solamente se reincorpora a la atmósfera sin provocar ningún tipo de contaminación

2.3 PEROVSKITAS.

Las perovskitas, que deben su nombre al material específico componente, son cerámicas (sólidos que combinan elementos metálicos con elementos no metálicos, oxígeno por lo general) y que tienen una disposición atómica especial. Desde un punto de vista tecnológico, las perovskitas son cerámicos interesantes por su notable variedad de propiedades eléctricas, un ejemplo es que generalmente una estructura cristalina está relacionada con una propiedad eléctrica específica, las perovskitas abarcan diferentes propiedades, desde ser aislantes (no conductores), hasta semiconductores, es decir en donde son iones, en lugar de electrones los que establecen un flujo a través del cristal, además de conductores semejantes a los metales y por supuesto superconductores de alta temperatura crítica. Una pregunta interesante es por que las perovskitas tiene esa notable variedad de propiedades. esto se podría contestar mencionando que ligeras modificaciones de la arquitectura ideal de las perovskitas producen a menudo nuevas propiedades. De este modo cada vez que se altera la estructura ideal surge la posibilidad de nuevas propiedades eléctricas.

En su forma ideal las perovskitas se describen por la forma generalizada ABX_3 es decir son tres cubos compuestos de tres elementos químicos diferentes (A, B, X) los átomos A y B son cationes metálicos (iones con carga positiva) y los átomos X son aniones no metálicos (iones con carga negativa) un catión A es el mayor de las 2 clases de metales, está en el centro de cada cubo, los cationes B ocupan los ocho vértices y los

aniones X están en los puntos medios de las doce aristas del cubo como lo muestra la figura 2.3

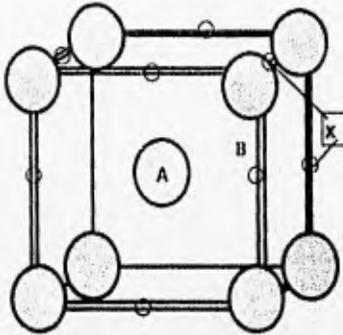


Fig.2.3.- Unidad estructural básica de las perovskitas, en el centro hay un átomo metálico (A), ocho átomos metálicos más pequeños (B) ocupan los vértices y 12 átomos no metálicos (X) están en los puntos medios de las aristas. Los átomos A y B son cationes, iones cargados positivamente; los átomos X son aniones cargados negativamente. (Las perovskitas tienen la fórmula ABX_3 en vez de AB_8X_{12} , porque cada catión B está compartido por ocho cubos vecinos y cada anión X por cuatro cubos).

La perovskita mineral como el titanato de calcio $CaTiO_3$ que forma a muy altas temperaturas la estructura ideal. El calcio en la posición A es mayor que el titanio en las posiciones B mientras que el oxígeno ocupa las doce posiciones X. El cristal crece a menudo en forma de un cubo o de un octaedro, reflejando la simetría de la estructura atómica.

Haciendo una comparación en términos químicos se podría pensar por que un cristal que esta compuesto de unidades que tienen un ion A , ocho iones B y doce iones X presenta la ecuación ABX_3 en lugar de AB_8X_{12} , y la explicación es que cada cubo esta rodeado en todas sus caras por otros cubos que comparten vértices y aristas. Así cualquier cubo posee solo una fracción de los átomos alejados. Cuando se tiene en cuenta esta comparación, se otorga a cada cubo un átomo A , un átomo B completo y tres átomos X completos también.

Entre los elementos que se pueden combinar actualmente para formar cientos de perovskitas ideales o modificadas están los siguientes:

- El Bario
- El potasio
- Los elementos de la familia de las tierras raras desde el cerio hasta el lutecio es decir números atómico del 58 al 71 de la tabla periódica.

Se pueden contar alrededor de 24 elementos que pueden ocupar la posición A , alrededor de 50 elementos capaces de ocupar la posición B . Además no solo el oxígeno puede ocupar las posiciones X también lo pueden hacer los miembros de la familia de los halógenos, como el flúor, cloro, bromo.

TABLA 2.3

• AgZnF_3	Fluoruro de plata y Zinc
• CsCdBr_3	Bromuro de Cesio y Cadmio
• LiBaF_3	Fluoruro de litio y bario
• KIO_3	Yodato potásico
• EuAlO_3	Aluminato de Europio

Como otras cerámicas, estas perovskitas ideales son aislantes eléctricos, todos sus sitios atómicos están ocupados y fuertes enlaces iónicos, es decir fuerzas atractivas entre cationes y aniones retienen en su sitio a los átomos y electrones. Esto provoca que los electrones se muevan con libertad.

No todas las perovskitas, se adaptan a este modelo de aislante. Algunas se apartan ligeramente de la forma y composición ideal y son en consecuencia menos predecibles.

Muchas perovskitas presentan cierta distorsión debido a que el catión central A es demasiado pequeño en relación a los cationes B que hay en los vértices del cubo, esta diferencia de tamaño provoca que los átomos X y en ocasiones los B se desplacen de su posición.

La gente dedicada a representar estos movimientos suelen asociarlos a una serie de poliedros y no a un cubo sencillo. como lo muestra la figura, Cada catión B que define el vértice de los cubos esta fuertemente unido a los seis aniones que lo rodean, pertenecientes a cada una de las seis aristas

del cubo que convergen en el vértice. Los aniones definen los vértices de un octaedro. Ahora el catión A se considera rodeado por 8 octaedros con vértices compartidos cada uno de los cuales contiene un catión B en el centro. Cuando el catión A es demasiado pequeño en relación con los cationes B los octaedros cuyos ejes están alineados en una perovskita ideal, se inclinan y giran; la estructura colapsa alrededor de los cationes A, bajando la simetría y alterando potencialmente las propiedades ópticas, elásticas, eléctricas además de otras propiedades físicas. Se han observado varios tipos de patrones de inclinación diferentes en las perovskitas. En este tipo de perovskitas inclinadas como en sus formas ideales, los cationes B permanecen en el centro de sus octaedros. En algunas perovskitas los cationes B se desplazan ligeramente. Este descentrado de los cationes cargados positivamente pueden producir cristales con polaridad eléctrica: un extremo se carga positivamente y el otro negativamente. Además la dirección del descentrado puede cambiarse a menudo con solo someter la muestra a un campo eléctrico: Los materiales que además de polarizarse pueden cambiar de polaridad bajo la influencia de un campo eléctrico se conocen como "ferroeléctricos" y tienen múltiples aplicaciones en los dispositivos electrónicos.

Una perovskita ferroeléctrica es un compuesto llamado titanato de bario (BaTiO_3) es la electrocerámica mas conocida de uso comercial. Los cationes descentrados almacenan y liberan energía eléctrica de manera aceptable: cuanto mas grande e intenso es el campo, adquieren más energía y más se desplazan los cationes y el cristal se polariza mas fuertemente. Cuando se quita el campo eléctrico, los cationes vuelven lentamente a sus posiciones normales y liberan la energía almacenada.

El compuesto titanato de bario suele estar en los condensadores (elementos que en los circuitos electrónicos que pueden filtrar un flujo desigual de corriente).

Unos ejemplos de la aplicación del titanato de bario serian los siguientes :

- Los condensadores pueden almacenar la carga de los pulsos de corriente y liberar seguidamente la carga almacenada entre los pulsos produciendo una corriente continua estable.
- Protección de picos de tensión para computadoras, cuando un pico de electricidad (por ejemplo el que provoca un rayo) alcanza el cristal, este absorbe el pico y lo disipa lentamente.

Los cationes descentrados del titanato de bario favorecen la piezoelectricidad (fenómenos eléctricos que se presentan en cuerpos sometidos a presión o vibraciones mecánicas), cuando un campo eléctrico externo desplaza los átomos del titanio, el cristal cambia de forma, alargándose, de esta forma la deformación mecánica en el cristal de titanato de bario genere un campo eléctrico. Es decir la piezoelectricidad hace que el titanato de bario sea muy apreciado en la fabricación de transductores que convierten energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. Por mencionar un ejemplo :

- En una bocina los transductores de titanato de bario vibran contra una membrana, en respuesta a señales electrónicas, generando ondas de

sonido, estos transductores almacenan energía eléctrica que libera a continuación en respuesta a la presión ejercida por las ondas de sonido.

Las perovskitas que tienen cationes descentrados u octaedros inclinados responden casi siempre a la fórmula ABX_3 a pesar de esto también estas perovskitas pueden desviarse de su composición ideal. Sus lugares A ó B pueden ocuparse con dos o más tipos de cationes. En el óxido de calcio y uranio (Ca_2CaUO_6), los átomos de calcio ocupan todos los lugares A disponibles, pero los sitios de los octaedros B se reparten equitativamente entre iones de calcio y de uranio. Los cationes B se ordenan o alternan estrictamente sus posiciones por toda la estructura que se inclina por que los iones de calcio de las posiciones B son bastante mayores que los iones de uranio.

Los centros de los octaedros pueden estar ocupados no solamente por 2 elementos diferentes, sino también por iones del mismo elemento con cargas diferentes. El óxido de bario y de bismuto, es un brillante semiconductor que se describe por la fórmula $BaBiO_3$, es una perovskita del tipo de valencia mezclada, tiene 2 variedades distintas de cationes de bismuto uno que ha cedido tres electrones de valencia (electrones que están en la capa orbital más alejada) y otra que ha cedido cinco, su designación normal sería $Ba_2Bi^{3+}Bi^{5+}O_6$, pero como ocurre para el óxido de calcio y de uranio, los octaedros que contienen los dos tipos de cationes se alternan por todo el cristal,

El óxido de bario y plomo ($BaPbO_3$) un conductor negro de apariencia metálica es un ejemplo de los cambios que ocurren en las

propiedades de las perovskitas ante ligeras variaciones de los elementos que ocupan las posiciones B. un ejemplo interesante de estos cambios es el que a continuación se explica:

Reemplazando progresivamente plomo por bismuto se crea una serie de variantes en la composición, desde el óxido de bario y plomo hasta el óxido de bario y bismuto. Cuando la composición se aproxima a $BaPb_{0.8}Bi_{0.2}O_3$ el compuesto se torna superconductor.

Además a diferencia del óxido de plomo y bario o del óxido de bario y bismuto algunos de los compuestos intermedios se hacen superconductores cuando se enfrían casi hasta el cero absoluto.

Las sustituciones de cationes B son las que actúan en el grupo de perovskitas de interés comercial que reciben la denominación conjunta de PZT bajo la misma se encuadra el titanato de plomo ($PbTiO_3$). Todos los cristales PZT presentan un efecto piezoeléctrico de notable intensidad (cualquier ligera compresión puede producir el almacenamiento y la liberación de 100 volt de potencial eléctrico) esto se presenta en dispositivos como:

- bocinas
- relés eléctricos
- medidores de presión
- bujías para segadoras de césped

Los cristales PZT de diferentes composiciones vibran a distintas frecuencias en respuesta a un campo eléctrico. Las personas dedicadas a

diseñar aparatos televisores aprovechan este efecto de la composición y emplean corrientemente varias perovskitas PZT como filtros para reducir el ruido molesto, los cristales interceptan los impulsos eléctricos que llegan y eliminan las frecuencias que no se desean oír.

Todas las perovskitas que se han mencionado son estequiométricas, sin importar la magnitud de su distorsión ni de su composición variable, tienen un total de 2 cationes por cada tres aniones. Los compuestos de la serie continua desde la perovskita (CaTiO_3) hasta la ferrita de calcio deficiente en oxígeno ($\text{CaFeO}_{2.5}$) ilustran las consecuencias estructurales de los átomos que faltan. En los compuestos pobres en oxígeno por encima del titanato de calcio la falta de oxígeno produce capas que constan de cationes B de hierro rodeados por cuatro átomos de oxígeno en vez de los habituales seis. Estas capas están entremezcladas con las que tienen octaedros normales, el volumen del cristal no es uniforme, sino que crece en cristales planos en forma de placas que refleja su disposición atómica estratificada.

Aquí la falta de estequiometría, la inclinación de octaedros, los cationes descentrados, y los cationes múltiples entre algunas complejidades pueden suceder simultáneamente en casi cualquier combinación. podría parecer que hay un número infinito de variantes de perovskitas, a pesar de todo la situación es incompleta.

En ninguna perovskita son los efectos eléctricos de las variaciones estructurales tan llamativos como en las más recientes, los superconductores de alta temperatura crítica. En el año de 1987 se había demostrado tener una sustancia superconductor a $93 \text{ }^\circ\text{K}$ que se había logrado calentando el

material en un horno, una mezcla finamente molida de óxidos de itrio y cobre, junto con carbonato de bario, Además se conocían las proporciones de los elementos en la mezcla inicial,

Pero surgieron algunos problemas la muestra superconductora que salía del horno era una mezcla de dos fases o compuestos químicos distintos. Un microscopio óptico de gran potencia reveló que la fase dominante que eran las dos terceras partes del material era de un intenso color esmeralda, era transparente y parecía cristalizada con aristas redondeadas. A diferencia de la otra fase la otra era negra, opaca de forma más regular y de aristas vivas, se sospechaba que era el superconductor, ya que todos los conductores que se conocen son opacos, el problema era que las dos fases estaban enteramente entrelazadas y resultaba imposible separarlas para analizar su composición.

Para tratar de solucionar ese problema se procedió a tratarlo como una roca de grano fino, para determinar los elementos de cada fase se utilizó una microsonda de electrones, un dispositivo que focaliza un intenso haz de electrones sobre una muestra diminuta, los electrones energéticos excitan los átomos de la muestra y hacen que cada elemento emita rayos X de una frecuencia característica. Las fracciones de los distintos elementos se determinan midiendo la proporción de rayos X que se emite para cada frecuencia.

Aunque el tamaño del grano del superconductor era muy pequeño para el dispositivo, se logró deducir la razón de los elementos de las dos fases, la mayoría de los granos finos, que eran de la parte verde incluían

iones de itrio, bario y cobre en proporciones de 2:2:1 respectivamente, la fase negra era mas rica en cobre y los metales estaban presentes en una relación 1:2:3 lo que explica el sobrenombre de 1-2-3 del superconductor. la única duda que surgió era el numero exacto de átomos de oxígeno en la fase negra. Sin embargo se obtuvo una estimación en base a la ley que sostiene que las cargas positivas y negativas de un cristal han de quedar bien equilibradas. se sabía que las cargas de los iones de itrio y bario eran de +3 y +2 respectivamente que los iones de cobre podían tener una carga de +1, +2, +3 y que los tres tipos de cobre podían hallarse en un compuesto. Entonces haciendo una suma indicaba que el material negro tenia una carga positiva total de 10 a 16 siendo -2 la carga de un ion de oxígeno, se sabía que tenia que haber de cinco a 8 átomos de oxígeno por cada seis iones metálicos se decidió entonces por un contenido de oxígeno de 6.5 por que en la mayoría de los compuestos el cobre se encuentra en el estado +2 así de esta manera la formula química de la fase negra era de $YBa_2Cu_3O_{6.5}$.

El análisis por difracción de rayos X permitió conocer importantes cosas sobre la disposición tridimensional de los átomos. Cuando los rayos X inciden sobre un cristal se dispersan en determinadas direcciones con intensidades características; e informan así acerca de la disposición de los átomos constituyentes del cristal. Se utilizo un cristal sencillo de magnitud suficiente para su estudio, como la muestra estaba dividida en un grano muy fino se consiguieron unas molas negras que tenían entre 30 y 40 micras de diámetro. Entonces se pego un trozo negro pequeño para verse a simple vista, al extremo de una fibra de vidrio muy fina y se irradio con un haz de rayos X.

En un principio se tuvieron dificultades por que las motas negras eran combinación de dos o más diminutos cristales entrelazados, lo que entorpecía los análisis de difracción. pero se logro determinar que el material tenia una disposición atómica en forma de cubos que estaban separados a intervalos de unos 3.9 Angstrom a lo largo de cada arista. la disposición era la de una perovskita.

Entre las consideraciones que se hicieron de estas observaciones se podrían mencionar las siguientes:

- Nunca se había encontrado una perovskita con una relación tan baja de átomos de oxígeno por catión.
- Una perovskita corriente habría tenido nueve oxígenos por cada seis cationes ($A_3B_3O_9$) tres veces ABO_3 y no 6.5 oxígenos.
- La mas baja relación conocida era de 7.5 oxígenos
- Esta perovskita iba a tener una estructura anormal con varios componentes de menos.

Otra de las informaciones que se obtuvieron de la disposición de los átomos, fue lo observado al buscar efectos de difracción de superestructuras, estos diagramas de difracción pueden indicar si la celda unidad tiene uno o mas cubos. El diagrama de difracción que se realizo reveló que la unidad básica que se repetía en el superconductor negro constaba de tres cubos. como si estuvieran apilados uno encima del otro se sugirió entonces que los átomos bastante grandes de itrio y bario ocupaban los sitios A mientras que los átomos pequeños de cobre ocuparían los sitios B. Los efectos de difracción de la superestructura sugerían que el bario que

es mayor que el itrio estaba en los centros de los cubos superior e inferior y que el itrio se alojaba en el cubo central; estas unidades de tres cubos Ba-Y-Ba se apilarían una encima de otra a lo largo del cristal pero se tenía otra pregunta a quien pertenecían los 6,5 oxígenos y que lugares normalmente ocupados por el oxígeno estaban libres.

Estudios posteriores revelaron en parte la respuesta a la pregunta, en principio la dispersión hecha al oxígeno que es un átomo ligero resulto difícil distinguirla en diagramas de difracción mas intensos producidos por los átomos más pesados de itrio y bario, había señales de la presencia de átomos de oxígeno en todos los sitios disponibles en los planos horizontales inmediatamente por encima y por debajo del átomo de itrio, por el contrario el oxígeno estaba ausente de las aristas verticales del cubo de itrio. de ahí se asignaron los restantes oxígenos a las posiciones de los aniones que se hallaban todavía libres en los dos cubos de bario dejando alrededor de la mitad de esas posiciones sin ocupar; en promedio cada celda unitaria tenía un total de 6.5 iones completos de oxígeno.

Recurriendo después a la técnica denominada difracción de neutrones por polvo, se determinaron las posiciones específicas de los restantes oxígenos. Demostraron que el superconductor 1-2-3 podía tener hasta 7 átomos de oxígeno. Se ha demostrado que el óxido de itrio, bario y cobre incluye a veces seis oxígenos, otras siete y en ocasiones una fracción intermedia. Esto mostraba que las variedades superconductoras son las más ricas en oxígeno.

Además de su deficiencia en oxígeno la perovskita 1-2-3 ofrece otro rasgo anormal: los átomos de oxígeno cercanos a los cationes de bario pueden con el tiempo saltar hacia adelante y hacia atrás entre los sitios de los aniones del mismo plano, alterando la estructura del cristal. La presencia de muchos sitios de aniones vacíos permite que el material acepte más átomos de oxígeno cuando aumenta el contenido de oxígeno en el ambiente.

A pesar de sus características las perovskitas 1-2-3 comparten muchas cosas con otras perovskitas no ideales:

- cationes ordenados
- átomos de oxígeno que faltan
- estratificación
- numerosos errores circunscritos y errores en el orden de las capas apiladas

las desviaciones plantean los desafíos futuros a las personas que intenten analizarlas y desarrollarlas.

CAPÍTULO 3

APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

3.1 APLICACIONES GENERALES

A continuación se muestran algunas de las aplicaciones de la superconductividad:

1. Aplicaciones a la alta densidad de corriente y altos campos magnéticos y baja frecuencia.

- Transmisión de corriente eléctrica
- Transformadores y Switches
- Refrigeración magnética
- Resonancia magnética para estudios médicos
- Transportes levitados
- Maquinaria eléctrica rotatoria
- Almacenamiento de energía
- Fusión Magnética

2. Aplicaciones de baja densidad de corriente y bajo campo

- Sensores para diagnostico medico
- Detectores ultrasensibles
- Dispositivos a base del efecto Josephson

3. Aplicaciones de alta frecuencia y alta densidad de corriente.

- Almacenamiento de energía por radiofrecuencia
- Tecnología de microondas

- Aparatos a base de radio frecuencia

3.2 APLICACIONES MAGNÉTICAS

Las primeras aplicaciones de la superconductividad han envuelto la constitución de imanes poderosos con materiales de hierro de baja temperatura enfriadas con helio líquido. Se han usado tales imanes en experimentos científicos, de resonancia magnética que han ayudado a desarrollar aplicaciones mas exigentes tal como la rotación en máquinas.

un imán grande de hierro con cobre tiene perdidas resistivas que elevan el costo de refrigeración, igualmente se tienen imanes superconductores de baja temperatura que requieren de un sistema refrigerante, solamente apartados de altas temperaturas se observara la ausencia de resistencia, comparando costos en la tabla 1 se puede apreciar la gran diferencia entre la utilización de materiales superconductores y materiales convencionales

TABLA 3.1 COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL

	IMANES SUPERCONDUCTORES (COSTO ACTUAL)	IMANES CONVENCIONALES (COSTO ESTIMADO)
ENERGÍA ELÉCTRICA	\$ 17.5	\$ 550
REFRIGERANTE	\$ 81.3	\$ 4
MANTENIMIENTO	\$ 5.2	\$ 7
COSTO TOTAL	\$ 104	\$ 561

ESTIMACIÓN EN MILES DE DÓLARES

CAPITULO 3

APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

Además de la comparación anterior de los costos netos los imanes superconductores cuentan con otra ventaja que cuentan con una mayor estabilidad; por ejemplo en los imanes convencionales la fuerza del campo varía con el aumento de la temperatura, sin embargo la estabilidad es una característica de los imanes superconductores de baja temperatura y esto da ventajas en aparatos científicos y en resonancia magnética.

Con la tecnología del imán superconductor de baja temperatura y con los planes que se tienen con los superconductores de alta temperatura se tendrán que ejecutar debidamente una cantidad de características de estabilidad de sistemas de refrigeración que reduzca los costos que los hará competitivos en el mercado.

Para la protección del funcionamiento estable se han tenido fracasos con el refrigerante ya que se requieren cables con varios filamentos igual que para los superconductores de baja temperatura puesto que los filamentos cuentan con diámetros de unas micras y esto los hace frágiles, los nuevos cerámicos son métodos para producir estos filamentos y cables con una mayor resistencia.

Una vez que el cable superconductor de alta temperatura llega a tener estas características tendrá una gran aplicación en la resonancia magnética por ejemplo como se requieren campos muy estables para una buena imagen de calidad. Por otra parte no hace fuertes demandas en el sistema magnético, a pesar de esto junta métodos que eliminan imperfecciones en la resistencia requerida para lograr una buena calidad de la imagen ya alcanzada por los superconductores de baja temperatura. Los sistemas de

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

resonancia magnética son caros, utilizando el sistema de refrigeración más simple no habrá tanta diferencia y los hará competitivos.

Los imanes superconductores que usan una tecnología con helio líquido que se han aplicado con buen éxito por varios años en el diseño y desarrollo de sistemas clínicos, minas, plantas industriales laboratorios y sistemas de transportación. los superconductores juegan un papel muy importante en estas aplicaciones.

En medicina los imanes superconductores tienen un papel significativo en el desarrollo de un mercado nuevo, los superconductores de alta energía han llevado a la construcción de aparatos sin precedente con energía previamente inconcebible. En el campo eléctrico las aplicaciones potenciales en almacenamiento de la energía y su transmisión promete extender la capacidad y rango de la tecnología actual .

Las aplicaciones del superconductor de alta temperatura crítica llegan a alcanzar una viabilidad comercial por ejemplo los motores y generadores llegan a ser competitivos con el superconductor de baja temperatura presente, comparándolo s con las maquinas que carecen de un superconductor, teniendo como refrigerante al nitrógeno líquido el motor opera con un bajo campo magnético presente, además son más pequeños en cuanto a tamaño mas eficaces y mas confiables con el mismo rendimiento que muchos motores actuales.

La necesidad de continuar con refrigeración es una desventaja y reduce su penetración en el mercado. Por supuesto la reconsideración de

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

las aplicaciones tuvieron que ser tomando en cuenta la no utilización del helio líquido y esto puede llevar a la creación de productos nuevos. Un conductor hueco enfriado con nitrógeno líquido es práctico, por ejemplo no sería necesario cambiar toda la tecnología del helio líquido a la del nitrógeno líquido y que no existiría una gran revolución en el fenómeno, pero llevara a que las especificaciones técnicas de nuevos materiales compitan comercialmente con los superconductores mas buenos de hoy. Las especificaciones del conductor tienen un valor mas amplio en el contexto actual que el superconductor convencional de baja temperatura. Los materiales nuevos reemplazan a los superconductores actuales y sus aplicaciones superconductoras se extienden a un círculo más amplio de usuarios.

3.3 APLICACIONES MEDICAS

La resonancia magnética es posible ahora basada en el principio de imanes poderosos es capaz de proveer imágenes de los tejidos blandos, estas son obtenidas sin los efectos radioactivos que producen las radiografías. Las máquinas son grandes, sumamente caras y requieren helio líquido para enfriar y lograr las imágenes en el estado superconductor, su tamaño, costo inicial y mantenimiento es inaccesible a algunas instituciones medicas .

Los imanes mas poderosos enfriados a temperaturas criticas con nitrógeno líquido hace que la resonancia magnética sea menos cara y reduce el costo del refrigerante a un porcentaje menor del sistema utilizado con helio líquido en un tiempo podría llegar a ser reemplazado las

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

radiografías por la maquina de hoy eliminando peligros de ionización al paciente.

La resonancia magnética constituye técnicas sumamente nuevas en diagnósticos y tratamientos médicos. Su impacto se puede anticipar en reducción de costos y mejoras futuras.

3.4 SUPERIMANES

Los imanes son esenciales en cualquier generador y motor eléctrico. En la industria, levantan y separan productos de hierro y acero, además extraen impurezas de las arcillas y otros materiales.

La más reciente herramienta de diagnóstico médico, es la formación de imágenes por resonancia magnética, utiliza un imán superconductor para alinear los núcleos del hidrógeno del cuerpo.

En los pulsos de radiofrecuencia, impulsan a los núcleos, a que se balanceen alineadamente, al sufrir una oscilación los núcleos emiten unas señales radiocacterísticas débiles que pueden detectarse.

La mayoría de los electroimanes se fabrican devanando hilo de cobre aislado alrededor de un núcleo de aleación de hierro. La corriente circula por la bobina e induce un campo magnético dirigido a lo largo del eje de la bobina. Esta sólo puede generar por sí misma un campo pequeño puesto que el hilo de cobre transporta únicamente alrededor de 400 amperes por centímetro cuadrado. (Si se obliga a circular más corriente através del hilo

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

el costo del sistema para soportar el calor generado por la resistencia del hilo se hace prohibitivo.). El núcleo de aleación de hierro amplifica el campo magnético de la bobina. Los electrones del núcleo alinean sus momentos magnéticos con el campo de la bobina, centuplicando o multiplicando por mil su intensidad; gracias a lo cual, se abarata la producción de campos magnéticos de hasta 2 Teslas, 40,000 veces el campo magnético terrestre. Es imposible conseguir campos más intensos por que el núcleo se satura (se le agotan los electrones que han de alinearse.).

Los electroimanes de núcleo de hierro tienen otra desventaja: su peso. A ese metal corresponde la mayor parte del peso de los motores eléctricos y los generadores. Si se logra disminuir el peso de la instrumentación de los aviones (y en consecuencia aumentar la carga útil), la reducción podría cifrarse en 1000 dólares por kilogramo ahorrado durante el periodo de vida de la aeronave. el ahorro crece alrededor de 6000 dólares por kilogramo para los cohetes Titán 4 que colocan cargas en órbita terrestre de baja altura.

Los superconductores posibilitan imanes más ligeros y potentes. En su diseño más simple, se puede omitir el núcleo de hierro y hacer que la bobina conduzca una corriente proporcionalmente mayor. Si un núcleo de hierro multiplica por mil el campo generado por una bobina de cobre, entonces, para igualar las características de un imán convencional, el superconductor deberá conducir una corriente mil veces mayor que la que conduce el hilo de cobre, es decir, unos 400.000 amperes por centímetro cuadrado. el niobio-titanio y el niobio-3-estaño alcanzan estas densidades de corriente, pero únicamente a 4 grados kelvin. En los laboratorio AT&T

Bell se han fabricado muestras importantes, (aunquo no en forma de cable) de óxido de itrio-bario-cobre que conducen 4000 amperes por centímetro cuadrado a 77 °K, en un campo magnético de una Tesla. Sin campo magnético, las muestras han llegado a conducir 17000 amperes.

3.5 GENERADORES Y LÍNEAS DE SUMINISTRO

En los generadores eléctricos la potencia mecánica suministrada por una turbina rotatoria hace girar un imán que induce una corriente eléctrica. los imanes superconductores podrían aumentar el rendimiento de estos generadores. En los Estados Unidos y Japón se han construido generadores a pequeña escala que utilizan superconductores de baja temperatura crítica. Está previsto que los grandes generadores superconductores alcancen un rendimiento del 99.5% ; los generadores tradicionales llegan ya al 98.6% en su eficiencia. El ahorro anual en el costo de carburante sería aproximadamente del 1 % , lo cual es significativo, comparando el costo anual del generador, pero es mínimo frente a la inversión de capital en el resto de la planta de energía eléctrica, que sería unas 100 veces mayor.

En la fase de proyecto se ha descubierto una ventaja inédita de los generadores superconductores, difícil de cuantificar en términos monetarios, pero que resulta valiosa. Las compañías eléctricas se enfrentan a un serio problema cuando se produce un corto circuito: cuando una tormenta eléctrica derriba una línea de suministro. Los generadores de los lugares cercanos giran más rápidamente, destruyendo la armonía con el resto de la red. La compañía debe aislar el corto circuito rápidamente y reponer los

generadores en fase antes de que giren fuera de control. Por ser más sencillo recuperar el control de imanes con núcleo de aire que con núcleo de hierro, se tendría entonces también mas tiempo para remediar el problema.

La tecnología para construir generadores de turbinas superconductoras existe desde hace varios años. Pero sin embargo no existe ninguna en funcionamiento. La respuesta a esto es sencilla si el helio líquido es refrigerante el costo económico de la refrigeración sólo hace rentables los grandes generadores. Pero la demanda de nuevos generadores grandes en los Estados Unidos ha desaparecido; no hay así ningún incentivo que mueva a investigar en una técnica que no está ensayada. Si hay mercado para generadores pequeños (menos de 100 MW); en este caso, la maquinaria realizada con los nuevos superconductores podría competir con las convencionales por dos razones:

- 1) los sistemas de refrigeración serían menos caros.
- 2) todo el sistema sería más fiable.

Consideraciones similares se aplican al uso de superconductores para transmitir y distribuir energía eléctrica. Los sistemas actuales, realizados en aluminio o cobre, disipan entre el 5 y el 8 por ciento de la energía generada por las centrales de los Estados Unidos, antes de llegar al consumidor. Por otro lado, el cobre y el aluminio pueden adoptar forma de cables suficientemente fuerte y flexibles para poder colgarse entre torres. El aire refrigera el cable y lo aísla eléctricamente sin costo adicional. Un superconductor de temperatura ambiente que pudiera colgarse en el aire sería muy valioso, pero esto todavía no existe. Las líneas de transmisión

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

superconductoras refrigeradas con helio o nitrógeno líquido necesitarían sistemas de contención pesados y rígidos para albergar el necesario aislamiento térmico y eléctrico.

Estos sistemas tendrían que desplegarse al ras del suelo o, mas probablemente, enterrados, lo que triplicaría el costo del tendido habitual de líneas de transmisión aéreas. Las líneas de transmisión superconductoras no podrían competir jamás con las aéreas. sin embargo, las líneas subterráneas superconductoras sí podrían hacerlo con las subterráneas convencionales. Las compañías entierran ahora las líneas de transmisión por razones estéticas, pero cuando la opinión pública se preocupa de los efectos sobre la salud de las líneas aéreas puede aumentar la demanda de sistemas enterrados. El laboratorio nacional Broockhaven ha construido una línea de transmisión al ras del suelo de 1000 MW de corriente alterna con una longitud de 115 metros de cable de niobio-3-estaño enfriado por helio, demostrando así la viabilidad de ese proyecto.

La magnitud del costo económico de la refrigeración sólo hace rentable las líneas de transmisión refrigeradas por helio líquido si conducen cantidades muy grandes de energía.

3.6 TRENES LEVITADOS

Una de las aplicaciones de los superconductores que ha recibido mayor atención ha sido el tren "Maglev" (levitado magnéticamente), que circularía a alta velocidad, suspendido encima de un riel por fuerzas magnéticas. La idea, propuesta en la década de los sesenta por James R.

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

Powell Jr y Gordon T. Danby de Brookhaven, se está ya desarrollando. El "Transrapid" Alemán emplea electroimanes convencionales y alcanza velocidades de hasta 400 Km./h, pero el sistema es inestable y debe controlarse sin cesar por computadora. Los ferrocarriles nacionales japoneses han desarrollado un sistema más estable con imanes superconductores de baja temperatura. Al avanzar el tren sobre las bobinas de aluminio del riel, los imanes inducen campos opuestos que levita el tren.

Los superconductores de alta temperatura crítica ofrecerían una mayor fiabilidad de ingeniería para los trenes Maglev, pero no reducirían mucho el costo, el costo de refrigeración bajaría, pero esto sólo justifica una mínima parte de la inversión total de capital y del costo de funcionamiento. Un riel de 500 Km. costaría de 1,500 y 4,500 millones de dólares. Los vehículos valdrían un 10 % más, y el sistema de refrigeración justificaría un 1%.

La alta velocidad del vehículo podría hacer competitivo con el viaje por avión para distancias de 200 a 1,000 Km. Si estos trenes comunicaran los aeropuertos, en lugar de los centros de las ciudades no implicarían un cambio en los hábitos de viaje y ayudarían a aliviar la congestión de tráfico aéreo y a reducir los retrasos que ahora son muy comunes en los principales aeropuertos.

Las aplicaciones a gran escala de los superconductores en la industria de la energía eléctrica y en la levitación magnética han atraído la máxima atención, pero las aplicaciones a menor escala, sobre todo para diversas máquinas industriales y dispositivos electrónicos, ofrecen mayores

posibilidades de amortización, especialmente a corto plazo. Este tipo de aplicaciones disfrutan de un mercado mayor, que tiene un volumen de ventas más firme y resulta más sensible a la innovación.

Los imanes potentes se emplean en la industria para eliminar impurezas de los comestibles y de materias primas como alúmina, calcita y arena. El primer separador magnético superconductor de baja temperatura crítica para uso industrial se instaló en 1986 en la factoría de tratamiento de arcilla de la empresa J. M. Huber. El imán de 2 Teslas refrigerado por helio necesita unos 60 KW de potencia eléctrica para que funcione el relicuefactor de helio mientras que un imán convencional con refrigeración de agua necesitaría 300 KW para superar la resistencia eléctrica y disipar el calor. Sistemas superconductores similares costarían unos 2 millones de dólares, en comparación con los 1.6 millones de un sistema convencional; el ahorro de electricidad reintegraría el costo añadido de 450,000 dólares en 2 ó 3 años. con los superconductores de alta temperatura el relicuefactor de helio podría eliminarse, ahorrando 60 KW y reduciendo la inversión de capital en 200,000 dólares.

Los imanes superconductores ofrecen también una forma única de alcanzar temperaturas muy bajas. Por debajo de su temperatura, las moléculas de los materiales paramagnéticos o ferromagnéticos se alinean por si mismas con los campos magnéticos, superando los efectos del movimiento térmico aleatorio. Estos materiales se calientan si se colocan en un campo magnético, enfriándose al retirar el campo. Este efecto magnetocalórico puede aprovecharse en una bomba de calor. Sin embargo, para alcanzar unas prestaciones idóneas, necesita un campo de unas 10

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

Teslas que en la práctica puede producirse sólo con un imán superconductor. Los refrigeradores magnéticos han alcanzado en el laboratorio temperaturas de 10^{-6} °K; actualmente se están desarrollando, para aplicaciones criogénicas espaciales y de defensa.

Los superconductores de alta temperatura crítica podrían extender la refrigeración magnética a los sectores industrial y comercial especialmente en la industria alimentaria donde estos dispositivos prometen ser más fiables, más compactos, con doble rendimiento energético y mas baratos de funcionamiento a lo largo de su período de vida, comparados con los frigoríficos al uso. Además, como los clorofluorocarbonos que se emplean en los frigoríficos convencionales de compresión de vapor están restringidos, debido a su supuesta influencia en la disminución del ozono atmosférico, la refrigeración magnética puede dar lugar a una alternativa viable.

3.7 COMPUTADORAS SUPERCONDUCTORAS

Los investigadores han venido soñando con la construcción de una computadora superconductoras desde que, a mediados de la década de los sesenta, los efectos superconductores postulados por Brian D. Josephson de la universidad de Cambridge, convergieron en el dispositivo electrónico que lleva su nombre. Las uniones de Josephson, que consta de una capa delgada de material aislante interpuesta entre capas de material superconductor, conmutan tensiones muy rápidamente, mientras que tienen un consumo de energía menor, en varios órdenes de magnitud, que los dispositivos convencionales. Su bajo consumo de potencia prometía computadoras más compactas, puesto que se necesitaría emplear menos

espacio interno para la refrigeración. La compresión de espacio permitiría construir computadoras más rápidas por que la comunicación entre los diferentes componentes viene limitada por la velocidad de la luz.

En el esfuerzo por construir una computadora superconductor, IBM invirtió casi dos décadas desarrollando células de memoria pastillas (chips) de entrada- salida, interconexiones y circuitos lógicos basados en uniones de Josephson. El esfuerzo fracasó, al no poder desarrollar una memoria "cache" (memoria dedicada al procesador central) pequeña, fiable y de alta velocidad. En otros problemas, las células de memoria no podían comprimirse demasiado por que el flujo magnético en una célula afectaría a las adyacentes. Al mismo tiempo que decaían las expectativas para memorias basadas en uniones de Josephson, las pastillas de memoria superconductor mejoraban por momentos.

Las compañías japonesas han continuado trabajando en la computadora de Josephson. Perfeccionaron las unidades de Josephson basadas en niobio y están desarrollando componentes que contienen nitruro de niobio que posee una temperatura crítica mayor y debería de crear circuitos más celebres. Sin embargo no han logrado aún una técnica fiable para la fabricación de pastillas de memoria Josephson que alojen a 1000 o mas células, entonces mayor dificultad encerrará la fabricación de circuitos de memoria creados por superconductores de alta temperatura, por que los nuevos materiales parecen mas delicados de procesar que el nitruro de niobio.

CAPITULO 3

APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

Así, pues, una computadora de Josephson basada por entero en superconductores de alta temperatura crítica no parece viable. quizá sería un sistema híbrido que conviene para circuitos lógicos de Josephson y memorias superconductoras, fusionando todo el conjunto a 77°K. Este híbrido aprovecharía a la vez las mejores características de semiconductores y superconductores. El desafío consiste en desarrollar materiales y técnicas para construir uniones de Josephson con los nuevos superconductores y diseñar interfaces de alta velocidad entre los superconductores y los semiconductores.

Si pudieran superarse los problemas de fabricación, el tiempo de conmutación de los circuitos de uniones de Josephson podría llegar hasta los 10^{-13} segundos para un superconductor en grados kelvin, y a un valor de 10^{-14} segundos para un material con una temperatura de transición de 100 ° K. Ninguna técnica convencional es capaz de aproximarse a estas velocidades. Los dispositivos podrían incorporarse en arquitectura de procedimiento paralelo para supercomputadoras mil veces más rápidas que las que hay en fase de proyecto. Sin embargo, serán necesarios muchos años de investigación para realizar esta computadora. En un plazo más corto, los superconductores pueden limitarse a interconexiones que unan entre sí los dispositivos semiconductores. Las señales de alta frecuencia que viajan a través de un hilo superconductor sufren una pequeña atenuación (pérdida de energía) y no experimentan dispersión geométrica. Es más probable que estas interconexiones se empleen en distancias de unos pocos metros, por ejemplo, para conectar los componentes de una computadora del tamaño de una habitación. Para distancias mayores, es probable que la fibra óptica mantenga su ventaja en el costo y prestaciones. No es probable

CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES

que los superconductores sean ventajosos para conexiones cortas, ni siquiera en una pastilla, donde los tiempos de retardo están determinados principalmente por la impedancia y la capacitancia inherentes del propio dispositivo, no ya por la resistencia de las interconexiones.

3.8 SUPERCONDUCTIVIDAD EN RADIOFRECUENCIA

Si las pérdidas características que afectan a las microondas son tolerables, el superconductor mejoraría gradualmente la ejecución de cavidades de la radio frecuencia del superconductor como muestra la figura. Esto se debe a que operan a campos magnéticos mas altos. Verdaderamente los impactos potenciales abrazan toda la tecnología del poder de las microondas sobre todo en la región del milímetro de la onda. La tecnología del acelerador puede ser también significativa avanzando por la disponibilidad del refrigerante nitrógeno liquido de las cavidades del superconductor. Las aplicaciones de la tecnología del superconductor a recirculadores de aceleradores de partículas lineales, en cambio las investigaciones de física nuclear de alta calidad son candidatos naturales . Como tecnología madura las aplicaciones industriales se desarrollan láseres de alto poder y de alta eficiencia en calefacción y la fusión de plasmas otros aparatos de radiofrecuencia con superconductores y de soldaduras proliferan.

CAPÍTULO 4

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

4.1 CONCEPTO DE ENERGÍA

La energía se encuentra asociada con la sustancia física, pero no es una sustancia en sí. Se manifiesta por el estado de excitación y de animación que asume el material que recibe energía. Vemos sus manifestaciones en todo nuestro entorno, desde nuestra actividad corporal producida por el consumo de alimentos que contienen energía, el viento, las olas, proyectiles y vehículos; se nota también en forma de calor recibido del sol también como calor generado por los combustibles y de otras fuentes.

En la época actual la energía se produce en cantidades enormes y al producirse mayores cantidades de ella, por persona, el bienestar, las comodidades han aumentado siempre.

Todas las manifestaciones de la energía podrían clasificarse de la siguiente manera:

- Trabajo Mecánico
- Calor

- Electricidad
- Radiación

Un término importante de definir es el de potencia, generalmente se dice que la potencia esta asociada con el trabajo mecánico y la energía eléctrica, por lo tanto se podría definir como la cantidad de energía que fluye y se supone que una planta de fuerza es una planta que se construye para la producción y distribución de una corriente de energía mecánica y eléctrica

En general una máquina o conjunto de equipos que producen y distribuyen una corriente de energía mecánica y eléctrica es una central. Por lo tanto un motor de combustión interna es una planta de fuerza, una rueda eléctrica es una planta de fuerza, sin embargo lo que generalmente se entiende con el término de planta de fuerza es el conjunto de equipos, localizados permanente en un lugar elegido, que recibe energía en la forma de una substancia, que se puede tratar en tal forma, que produzca energía eléctrica que se distribuirá de la central.

En muchas plantas no se produce potencia mecánica o eléctrica, sino en las cuales la energía se suministra en la forma de calor del vapor, esto es por que cualquier planta que use combustible como materia prima, es primero ante todo una planta para producir calor, y si el calor se produce en algún medio conveniente para su transporte, como el vapor, este sería el producto final para la planta.

Muy frecuentemente se utiliza el término eficiencia que se podría definir como la fracción de la energía suministrada a una unidad o sistema,

que finalmente se pueda aplicar al fin con que se construyo. Es decir, eficiencia es la energía eficiente. En su forma más sencilla es el cociente de dividir la energía entregada por la planta, entre la energía entregada a la misma. Como potencia se entiende la cantidad de energía producida en la unidad de tiempo, la eficiencia puede expresarse igualmente bien por el cociente de la potencia de salida por la de entrada.

En general la civilización se dirige a las fuentes siguientes de energía para obtener potencia:

- Combustibles
- Corrientes de agua
- Mareas oceánicas y olas
- Vientos
- Rayos Solares
- Calor terrestre
- Núcleos atómicos

Ahora el hecho que nos interesa es el de que tan costoso resulta la generación de energía eléctrica, es importante mencionar que en principio el costo de los combustibles varía frecuentemente, y el uso de estos ha variado desde el carbón hasta el petróleo, considerando que una vez hecha la instalación es difícil cambiar de combustible a uno más barato, Otra comparación interesante sería el de las corrientes de agua, esta energía puede encontrarse como energía cinética en la corriente, o como energía potencial del agua que se encuentra a cierta altura con respecto a un plano

de comparación más bajo; un ejemplo sería el del agua almacenada detrás de una presa.

Las plantas hidráulicas aumentan en número muy lentamente y aún el número de plantas nuevas de este tipo construidas anualmente es muy pequeño con relación a las que usan energía calorífica. Generalmente se utilizan los sitios más favorable; en consecuencia, cuando se construyen más plantas se deben pagar costos más altos en su construcción, es muy difícil justificar la construcción de las plantas hidroeléctricas, en comparación con las de vapor, pero bajo el punto de vista de la conservación de los recursos naturales fijos, es decir, sus combustibles naturales, es obvio que debe hacerse todo lo posible por explotar la potencia hidráulica del país, ya que si no se explota se desperdicia.

Dentro de estas comparaciones y algunas otras que se pudieran hacer el hecho importante es el de que es importante utilizar toda la energía que se produce por que si no esta se estaría desperdiciando y lógicamente las pérdidas económicas serían fuertes,

Por lo antes mencionado el almacenamiento de energía sería una solución para evitar el desperdicio de la energía que se genera y por tanto en la siguiente sección veremos de que manera los superconductores ayudan en este tema de almacenamiento de energía

4.2 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los superconductores encontrarían una aplicación diferente en cierto dispositivo para proteger las redes de energía contra inesperadas e inoportunas sobretensiones. El dispositivo consta de un segmento de línea de transmisión, devanado alrededor de un núcleo de aleación de hierro. se haya éste también devanado con un cable superconductor que transporta una pequeña corriente continua que mantiene el núcleo completamente saturado. Si hay una sobretensión repentina en la línea de transmisión, el dispositivo prevendrá la propagación de la sobretensión a las zonas indemnes de la red. los superconductores de alta temperatura crítica podrían rentabilizar la presencia de estos protectores de sobretensión en todo el sistema.

Con frecuencia la demanda de energía eléctrica no está sincronizada con su disponibilidad. Las centrales nucleares y térmicas de carbón, que funcionan con mayor rendimiento a determinado nivel de producción, deben satisfacer una demanda que varía durante el curso del día. el almacenamiento de energía permitiría que la central retuviera el exceso de energía durante los períodos de producción sobrante y la liberara cuando la demanda superara la capacidad de generación. Un sistema de almacenamiento fabricado con superconductores podría mantener gran cantidad de corriente continua sin apenas pérdidas.

Se ha diseñado una unidad a escala real de almacenamiento superconductor magnético de energía para almacenar unos 5,000 MW hora de electricidad, capaz de cargarse y descargarse a un promedio de 1,000

MW. Esta unidad tendría un rendimiento del 90 al 95 % (con las pérdidas provenientes de la conmutación entre corriente continua y alterna y de la energía consumida para la refrigeración) y tendría una velocidad de conmutación de una fracción de segundo que no iguala otro sistema. Pero ese sistema costaría mil millones de dólares.

Los diseños que emplean cable de niobio-titanio y helio líquido necesitan un sistema subterráneo anular, con un radio de unos 750 metros. Para evitar una liberación catastrófica de energía si desaparece la superconductividad, el sistema necesita ladrillos de aluminio muy puro por valor de 100 millones de dólares, que servirían de sumidero de calor y electricidad.

Un sistema refrigerado con nitrógeno líquido aliviaría el costo de la refrigeración rebajando la inversión de capital alrededor de 3%. Si el superconductor es también barato, el costo podría caer otro 5 % .

A una escala menor y menos cara, podría tener una utilización diferente: suavizar la transmisión de la energía generada por fuentes muy erráticas; por ejemplo, una central eólica. Las unidades de este tipo deben conmutar gran cantidad de potencia, pues no tienen que almacenar mucha energía; no necesitan, por ello, costosos sistemas de contención. El laboratorio Nacional de los Álamos trabajo con una pequeña unidad experimental, refrigerada con helio líquido como amortiguador de transmisión para la administración de energía de Boneville. Un fallo en el sistema de refrigeración obligo a su retirada; más, por lo demás el funcionamiento estuvo bien.

CAPITULO 4

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

En la gráfica siguiente se muestra un sistema superconductor magnético de almacenamiento de energía. Dotado de anillos gigantes de cable superconductor, podría almacenar una corriente eléctrica continua indefinidamente. Un sistema de 5000 Megawatt-hora y 1000 megawatt tendría que enterrarse para confinar la fuerza magnética generada en la bobina. Una bobina de 24 metros de altura y un diámetro de 1568 metros ejercería una presión de 1100 atmósferas sobre la pared de la caverna. Los cables se encierran en ladrillos de aluminio muy puro. En una situación de emergencia los ladrillos absorberían la electricidad.

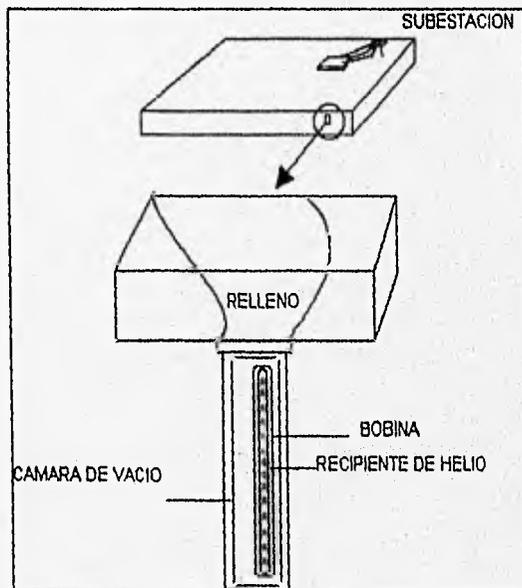


Fig. 4.1.- Sistema superconductor magnético de almacenamiento de energía

4.3 SISTEMAS INDUCTIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Como ya se menciona una de las aplicaciones a gran escala de los superconductores es el almacenamiento de energía. Para valores adecuados del campo magnético se pueden almacenar densidades de energía muy altas comparadas con otros sistemas de almacenamiento de energía. Esto es dependiendo del tiempo en el que puede hacerse la descarga de energía eléctrica los electroimanes pueden utilizarse en reactores de fusión o en sistemas de distribución comercial de energía eléctrica.

Aunque es posible construir con superconductores convencionales electroimanes superconductores capaces de almacenar diez mil millones de Joules, esto es del orden de 2800 Kilowatts-Hora, el problema es que descargar 2,8 kilowatts-hora en 0.1 seg. no es tan sencillo, se requeriría de interruptores superconductores.

El principal atractivo de aplicación de estos sistemas sería en la utilización en las redes comerciales de distribución de energía eléctrica sobre todo en las llamadas horas pico. Otro tipo de ventajas que presentarían este tipo de sistemas serían:

- Contabilidad
- Facilidad de operación de los electroimanes
- Consideraciones económicas..

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE FABRICACIÓN

Una vez que se tiene balanceados los porcentajes de la pastilla superconductora de alta temperatura crítica se procede a los siguientes pasos:

5.1 MOLIENDA

Teniendo pesados y mezclados los polvos, serán sometidos a una molienda en un molino de ágata automático.

El tiempo aproximado para que la mezcla tenga una forma homogénea y se muele es de 20 minutos. En estos molinos con este tiempo, la mezcla alcanza un tamaño de partícula de $5 \mu\text{m}$.

5.2 RECOCIDO

Una vez que la muestra ha sido perfectamente molida y toma una forma homogénea al máximo permisible, se hace un recocido de polvos en un horno de cuarzo.

El horno tiene las siguientes características:

- Consta de 2 tubos de cuarzo de diferentes diámetros, uno de ellos, que es el de longitud mas grande, está colocado dentro del otro. En la parte central el tubo externo tiene enrollada una resistencia de Kantal y después, se encuentra con un recubrimiento refractario hecho de fibra de vidrio; entre los 2 tubos (en el centro del horno) está colocado un termopar de cromo-aluminio, por medio del cual se tiene un control de la temperatura mediante un multímetro digital. Los tubos se encuentran sobre una base de ladrillo refractario. La corriente que circula através de la resistencia se controla con un variac (varia el valor de la resistencia), y con este procedimiento se varía la temperatura.

El proceso de recocido tiene una duración de 24 horas con una temperatura de 890 ° C en aire y a una presión atmosférica.

5.3 COMPACTACION

Este proceso se lleva a cabo en una prensa hidráulica a un valor de presión de 6.87×10^7 Pa, durante un lapso de 30 minutos y a temperatura ambiente.

El proceso de compactación tiene las siguientes características:

- Consta de un dispositivo hidráulico, por medio del cual, se proporciona presión al sistema; de un cilindro hueco, dentro del cual se colocan los polvos que provienen de la molienda; además consta de un émbolo, que

es que realiza la presión sobre los polvos dentro del cilindro, cuyo diámetro es 1.27 cm.

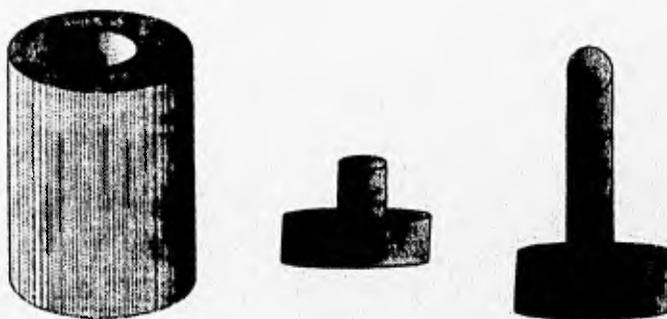


FIG. 5.1. Cilindro y embolo para realizar la compactación.

5.4 RECOCIDO DE SINTERIZACION

Este proceso de recocido de los comprimidos se efectúa en el mismo horno de cuarzo en este caso, el tratamiento térmico se realiza en un tiempo aproximado de 60 minutos a temperatura aproximada de 930 °C en aire y a una presión atmosférica. La pastilla se coloca sobre una lamina de platino ó aluminio para evitar que sufra una reacción con el tubo de cuarzo del horno.

Después de este sinterizado, la pastilla debe dejarse sufrir un proceso de enfriamiento lento dentro del horno para que la transformación de fase

pueda llevarse a cabo al máximo. la velocidad de enfriamiento es aproximadamente de $360\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{h}$; o se puede llevar la muestra a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es una temperatura muy cercana a la temperatura de transformación de fase, y dejarla de 15 a 20 minutos, seguido de un enfriamiento en el horno hasta una temperatura ambiente.

Esta se enfría lentamente para dar tiempo a que el oxígeno se difunda en la red cristalina, y ocurra un ordenamiento máximo de las vacancias de oxígeno y se logre la transformación de fase.

5.5 RECICLADO

El reciclado es el procedimiento que se realiza en caso de que falle el proceso de recocido de sinterización y tiene los siguientes pasos:

- Se regresara a realizar los pasos descritos anteriormente desde el proceso de molienda como lo indice la gráfica 5.2.

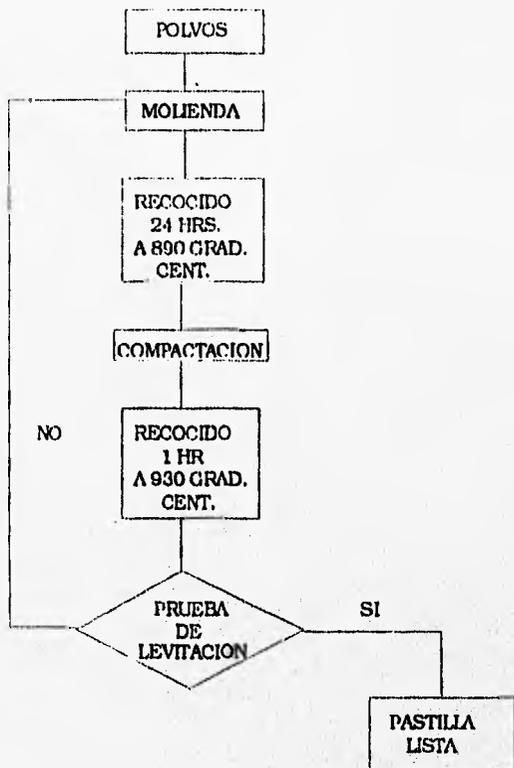


FIG. 5.2.- Diagrama de flujo que muestra el proceso de fabricación de una pastilla superconductor.

Una vez que no falle ninguno de los procesos que se describieron anteriormente se realiza el fenómeno de levitación magnética causado por el efecto de Meissner descrito en secciones anteriores utilizando como refrigerante al nitrógeno líquido.

5.5 MEDICIÓN DEL VALOR DE TEMPERATURA CRÍTICA

La medición de la temperatura crítica del material superconductor se efectúa en un dispositivo que consta de un soporte frío donde va colocado el termopar y la muestra a la cual se le va a realizar la medición, Este a su vez se encuentra colocado dentro de una cámara de vacío como lo muestra la figura.

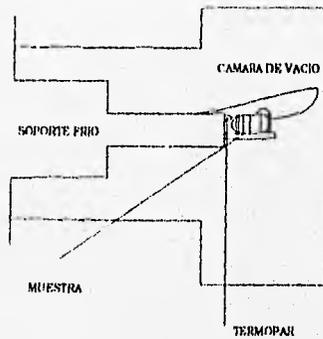


FIG. 5.3 Dispositivo que ayuda a medir la temperatura crítica

Se debe lograr un vacío aproximado a 10^{-3} torr mediante una bomba mecánica (el objetivo de tener la muestra en vacío es el de evitar que la humedad del medio ambiente se condense sobre la muestra provocando con esto algún corto o que el agua provocada por la humedad afecte al superconductor), Utilizando un compresor de helio de ciclo cerrado se enfría el soporte hasta un valor cercano a la temperatura de ebullición del helio.

La resistividad eléctrica se mide con el método de las cuatro puntas, el cual consiste en pegar cuatro alambres de cobre de calibre 42 a la pastilla. La unión de estos alambres se realiza con pintura de coloide de plata (al mezclar la plata en el fluido esta aparece como disuelta sin estarlo) para poder pegar los alambres a la pastilla y estar seguros de tener un buen contacto, se lijan los extremos de los alambres de cobre, para quitar el esmalte que traen de recubrimiento; el tiempo de secado de la pintura de plata es en un lapso de 10 a 15 minutos, pero es necesario aplicar varias capas de pintura para obtener una buena unión y asegurar un buen contacto debido a que durante el enfriamiento del superconductor sufre una contracción y pudieran despegarse los alambres. Es conveniente hacer un pequeño doblez en la punta de los alambres para tener una mejor unión con la superficie de la pastilla superconductora.

Una vez que la pintura se ha secado completamente, se coloca la pastilla sobre la placa del dispositivo frío, pegándola con una grasa marca "cryocon" que es buena conductora térmica. sobre la muestra se coloca el termopar de cromo-aluminio de tal forma que tenga contacto con el material para garantizar que la temperatura que se mide es efectivamente la temperatura de la pastilla superconductora. Además, la pastilla se fija con

una cinta de teflón y encima de esta cinta de aislar. Toda vez que la pastilla se encuentra lista se conectan los alambres de cobre a la fuente de poder, se realiza el vacío y se comienza el proceso de enfriamiento.

Por los alambres se hace pasar una corriente eléctrica, que proviene de la fuente de poder con capacidad de 0 a 100 mA, y en los alambres del centro se mide el voltaje. A medida que la temperatura disminuye es conveniente anotar los valores de voltaje y utilizando la ley de ohm ($V=RI$), se obtiene la medición térmica y el valor de la resistencia, con los datos ya obtenidos y calculados se pueden construir gráficas de voltaje contra tiempo, de voltaje contra temperatura, de resistencia contra temperatura etc. Con estos valores se pueden determinar:

- El valor de la temperatura a la cual la resistencia comienza a disminuir rápidamente.
- El valor de la temperatura a la cual la resistencia se hace cero.

El proceso de enfriamiento de la muestra se lleva a cabo desde la temperatura ambiente hasta 10°K ó 15°K , La gráfica 5.6 muestra el proceso que se sigue para determinar la temperatura crítica.

Para determinar la temperatura crítica del superconductor, además es necesario medir la magnetización que los materiales superconductores presentan al estar bajo la influencia de un campo magnético, y se podrán ver gráficas como la mostrada en la figura 5.7

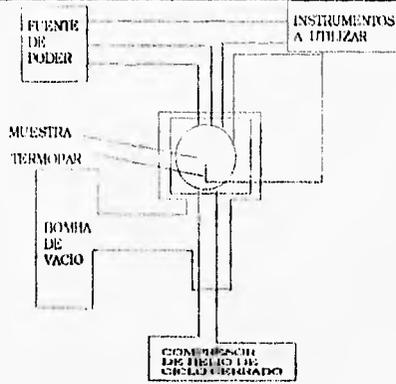


FIG. 5.6 Equipo necesario para determinar la temperatura crítica.

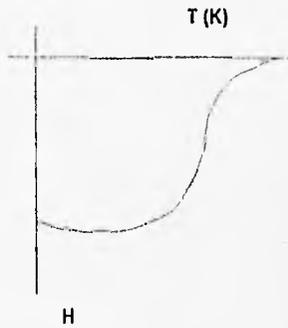


FIG. 5.7 Gráfica que representa la variación del campo magnético con respecto a la temperatura

5.6 PRUEBA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Esta prueba se puede efectuar antes o después de la medición de la temperatura crítica (T_c) aunque es preferible realizarla después para evitar los efectos que pudiera provocar la humedad.

Se introduce la pastilla en una caja de petri que ya contiene nitrógeno líquido y esperar el tiempo necesario para que el material se enfríe, una vez que el nitrógeno que rodea a la muestra deja de hacer ebullición, se coloca un imán sobre la pastilla y se debe observar si levita o no es decir la comprobación del efecto Meissner como lo muestra la figura 3.8

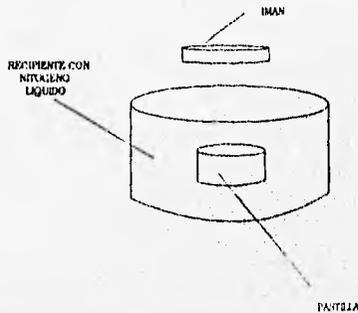


FIG. 5.8.- Experimento que comprueba el efecto Meissner.

5.7 PREPARACIÓN METALOGRAFICA

Ya determinada la temperatura crítica de la pastilla superconductor se procede a realizar la metalografía que sigue los siguientes pasos:

- Se realiza un pulido de lija 400 a la muestra, hasta obtener una superficie plana y sin marcas del sinterizado.
- Se pule con una lija 600, para eliminar al máximo las rayas producidas por la lija 400.
- Una vez que se tiene completamente lisa y sin rayas la superficie se pasa a una pulidora, la pulidora debe ser automática y utiliza un paño fino que contiene alumina de una micra.
- A continuación se pule en otro paño con alumina de 0.3 micras al final del tratamiento de pulido, se pueden eliminar las rayas pequeñas y delgadas que dejan algunas veces la alumina, pasando la muestra por el paño usando únicamente agua.
- Para eliminar los restos de alumina adheridos a la superficie, se introduce la pastilla en un vaso de precipitado con acetona.
- Se coloca en una máquina de limpieza por ultrasonido durante 15 minutos.

Observar la muestra al microscopio no siendo necesario un ataque químico, pero es deseable hacerlo con cloruro de hidrogeno al 3 %.

- Teniendo la superficie que puede ser observable en el microscopio óptico, se deben obtener algunas micrografías de ella, para lograr obtener micrografías con una buena nitidez, es recomendable usar la luz polarizada, ya que mediante el uso de esta se pueden definir con mayor claridad tanto los límites de grano como los poros del material, las micrografías se obtienen, usando placas de película pancromática de 5 x 4 pulgadas, dando un tiempo de exposición de 5 minutos aproximadamente dependiendo del nivel de luz con que se este trabajando.

5.8 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos se realizaran con el objetivo de estudiar el efecto del recocido de un material superconductor en vacío y en oxígeno, sin llegar a la temperatura a la cual ocurre la transformación de fase.

Si el recocido se efectúa en vacío se realiza en un horno similar al utilizado en la fabricación de la pastilla pero con la diferencia de que en el interior se utiliza un tubo delgado de acero inoxidable cerrado por un extremo y conectado a una bomba mecánica de vacío; además, se coloca un termopar de cromo-aluminio en contacto con el tubo de acero inoxidable para obtener una lectura de la temperatura lo mas cercana a la temperatura de la pastilla superconductora .

Cuando el tratamiento se realiza con oxígeno, se colocan tapones de hule a cada extremo del tubo del horno; estos tapones están perforados y con pequeños tubos de vidrio se conectan con mangueras de plástico. Una

de las mangueras se conecta a un manómetro y este a su vez a un tanque de oxígeno; otra manguera se introduce en un recipiente con agua, con el fin de que en el interior del horno haya una presión del oxígeno un poco mayor a la atmosférica .

Terminando el recocido se procede a caracterizar de nuevo a la pastilla; es decir, se mide de nuevo la resistividad se obtiene su gráfica de resistencia contra temperatura, su metalografía y se realiza la prueba de levitación el diagrama del dispositivo donde se realiza el recocido por oxígeno se muestra en la figura 5.9

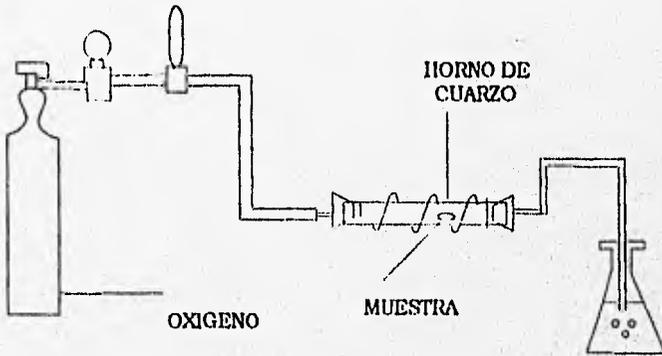


FIG. 5.9 dispositivo de recocido en oxígeno.

5.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Al utilizar el dispositivo mostrado en la figura 5.6, después de un tratamiento de recocido en vacío durante 3.5 h. Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar las mediciones de voltaje, en la fuente de poder se dio un valor de 50mA y tomando diferentes valores de temperatura se obtuvo:

Temperatura (°K)	Voltaje (Volts)	Resistencia (Ohms)
250	.02437	.4875
200	.02666	.5325
150	.02887	.5775
100	.03125	.6225
50	.01200	.24
22.5	.01153	.23

Teniendo los valores de corriente y voltaje se procedió a calcular la resistencia utilizando la ley de ohm ($V=RI$), y graficando los valores anteriores se tiene la gráfica 5.1. La aplicación de la ley de ohm se hizo de la siguiente manera:

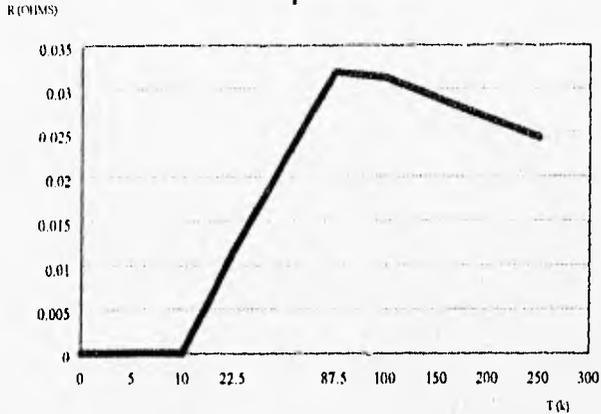
para una temperatura de 22.5 °K el voltaje obtenido fue de .0115 V, entonces

$$R=V/I=.0115/.050=.23 \text{ ohms}$$

para una temperatura de 50 °K el voltaje obtenido fue de .012 V, entonces

$$R=V/I=.012/.050=.24 \text{ ohms}$$

Grafica de Resistencia contra Temperatura



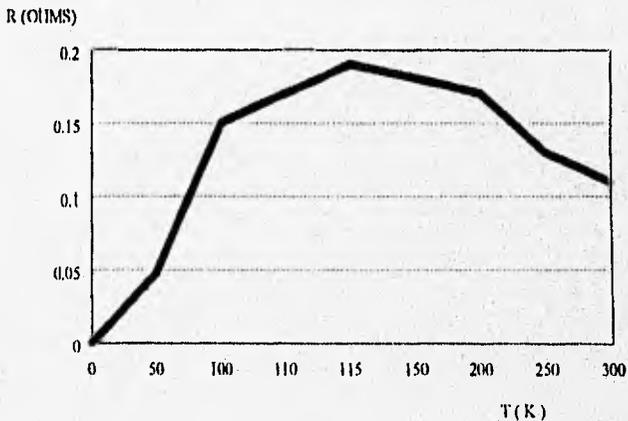
Gráfica 5.1

La gráfica 5.1 que es la que se obtiene a partir de realizar el recocido en vacío a 500 °C durante 3.5 h, como se observa el inicio abrupto de la caída de la resistencia se presenta a 87.5 °K, con una resistencia de .03187 ohms y un temperatura crítica de alrededor de los 30°K la transición entre el inicio y la T_c es de aproximadamente 58°K y es un tanto irregular. Además si observamos a la parte derecha del inicio la curva presenta una pendiente que generalmente corresponde a un semiconductor, es decir que el material se comporta como si fuese un semiconductor en el intervalo entre la temperatura ambiente y la temperatura donde comienza la transición al estado superconductor.

Otro aspecto importante a considerar es el de que después de este tratamiento, la pastilla no presentó el efecto de levitación magnética, al menos no a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido. Lo anterior de alguna manera confirma el hecho de la importancia del oxígeno en los materiales superconductores.

Después de realizar un recocido en oxígeno, a 500 °C durante 24 horas y siguiendo los mismos cálculos se obtuvo la siguiente gráfica

GRAFICA DE RESISTENCIA CONTRA TEMPERATURA DESPUES DEL RECOCIDO EN OXIGENO A 500 °C DURANTE 24 HORAS



En la gráfica anterior se muestran los resultados resistencia-temperatura después de un recocido en oxígeno a 500 °C durante 24 horas, dentro de las observaciones importantes, es que el material recupero el efecto de levitación magnética perdido con el recocido en vacío.

CAPÍTULO 6

LEVITACIÓN MAGNÉTICA

6.1 LEVITACIÓN EN TRANSPORTE

Una aplicación muy importante es en el transporte masivo, la idea que surge de utilizar una fuerza magnética para hacer flotar vehículos de transporte ha sido pensada desde hace muchos años y la idea de utilizar superconductores para lograr esto ha hecho que la idea tome fuerza se podría hablar de dos métodos posibles para lograr la levitación y estos serían los siguientes:

- Utilización de un sistema atractivo
- Utilización de un sistema repulsivo

El sistema atractivo ha sido estudiado en países como Estados Unidos y Alemania y se basa en que la fuerza magnética entre un material ferromagnético colocado en el seno de un campo magnético y la fuente que esta generando el campo magnético es siempre atractiva, entonces el peso del vehículo es sostenido por esta fuerza atractiva.

Las características básicas de este sistema son:

- A causa de la presencia del material ferromagnético el campo magnético necesario puede ser producido por imanes convencionales hechos de metales normales.
- El uso de electroimanes de metales normales requiere de un entrehierro de alrededor de 1 cm entre el material ferromagnético y los electroimanes. Aún con un diseño adecuado utilizando metal normal el costo es mucho menor si se utilizan electroimanes superconductores
- La fuerza magnética aumenta cuando el entrehierro se hace más pequeño y es menor cuando disminuye su tamaño, esto nos indica que el sistema es inestable y que se necesita para lograr su estabilización un mecanismo que le permita regular la corriente y por lo tanto la fuerza atractiva.

Entre las desventajas que presentaría este sistema se podrían mencionar las siguientes:

1. Tendría problemas a velocidades superiores a los 250 Km/h esto es debido a que si observamos un tren convencional no puede viajar a más de 300 Km/h ya que la posición vertical del pequeño entrehierro tiene que ser mantenido dentro de una variación no mayor de 2 milímetros sobre una distancia de 10 metros.

Otra razón es que el sistema es inestable con respecto al movimiento vertical.

Aunque estas desventajas no hacen imposible la operación a altas velocidades se requeriría de una gran cantidad de energía eléctrica para lograr mantener un entrehierro del tamaño adecuado para velocidades mayores. es por esto que al usar electroimanes superconductores el tamaño del entrehierro seria mayor, pero el control de las corrientes seria el problema a resolver.

El sistema de levitación por repulsión se podría decir que presenta mejores perspectivas, este sistema funciona bajo una aplicación de la ley de Lenz de inducción de corrientes eléctricas, al tener campos magnéticos que varían con el tiempo en donde existe una espira de material conductor, el campo magnético que genera la corriente inducida da a lugar un campo magnético que presenta una polaridad opuesta al campo magnético original creándose una repulsión entre ambos campos magnéticos.

Algo importante a considerar del sistema repulsivo es la disipación de energía que se presenta en el conductor. Esta disipación depende de la frecuencia de excitación y tiene un máximo para un cierto valor de la frecuencia, sin embargo esta disipación tiende a un valor de cero mientras se hace mas grande la frecuencia de excitación.

Una de las características mas importantes de este sistema de repulsión se debe a la utilización de electroimanes superconductores para proporcionar los campos magnéticos que se requieren, estos electroimanes superconductores hacen posible generar un campo magnético intenso en un volumen grande y esto presenta grandes efectos en el diseño del sistema .

Las características mas importantes de los sistemas repulsivos se podrían enumerar de la siguiente manera.

- El entrehierro entre los electroimanes y el material conductor puede ser de un orden de magnitud mayor que para el caso del sistema atractivo. Esto como se ha mencionado es de vital importancia para el diseño de transporte que desarrollen grandes velocidades.
- Un campo magnético intenso, generado sobre un gran volumen por los electroimanes superconductores puede incorporarse a un sistema de propulsión y de esta manera se tiene que los mecanismos de levitación y de propulsión serán compatibles.

El uso de materiales superconductores cerámicos que presentan una temperatura crítica elevada hace atractiva la idea del uso de materiales superconductores en transportes masivos. En la gráfica siguiente se muestra el sistema de levitación por repulsión.

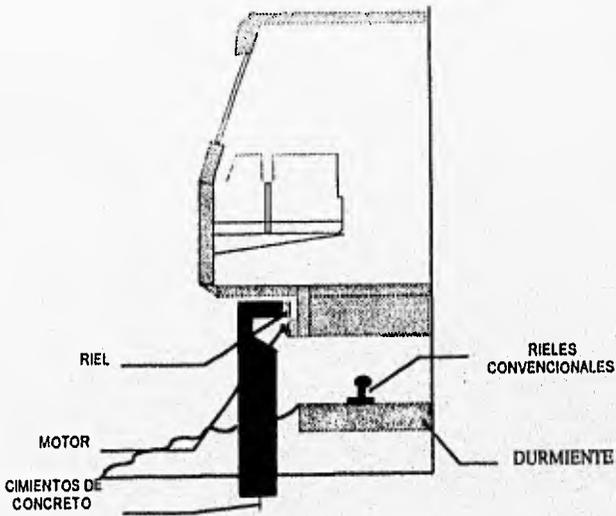


Fig. 6.1.- Sistema de levitación por repulsión.

6.2.- PRUEBA DE LEVITACIÓN REALIZADA CON UNA PASTILLA CERÁMICA DEL COMPUESTO 1-2-3 DE ITRIO BARIO Y COBRE

Esta prueba de levitación se realizó con una pastilla del compuesto llamado 1-2-3 que tiene como elementos básicos al itrio, bario y cobre que tiene una temperatura crítica de 90°K y tiene como refrigerante al nitrógeno líquido, siguiendo los siguientes pasos en la realización de la prueba de levitación:

- En un recipiente se coloca nitrógeno líquido y a continuación se procedió a introducir a la pastilla en el recipiente esperando a que alcanzara su temperatura crítica.
- Una vez que la pastilla ha sido enfriada se procedió a colocar un imán por encima de la pastilla introducida en el recipiente con nitrógeno líquido observándose que el imán empieza a levitar por encima de la pastilla como lo muestra en las figuras 6.2 y 6.3.
- En la figura 6.4 se muestra una prueba que se hizo para mostrar que la pastilla efectivamente flotaba se pasó un alambre entre la pastilla y el imán y se observó que efectivamente la pastilla flotaba.
- Una última prueba que se hizo fue dar un pequeño empujón al imán y se observa que este empieza a girar y no se detiene hasta que la pastilla no alcanza su temperatura crítica.

Lo observado en la prueba de levitación es debido al denominado efecto Meissner que consiste en resumen en lo siguiente:

- Al acercarse un imán a un material superconductor se genera magnéticamente una imagen como si el superconductor fuera un espejo.
- Visto lo anterior el imán es siempre repelido por su imagen en este caso el superconductor.
- La fuerza de repulsión es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo la levitación.

Como ya se menciona en este capítulo una de las aplicaciones de este efecto se da en vehículos de transporte masivo que flotan sin fricción con el piso.

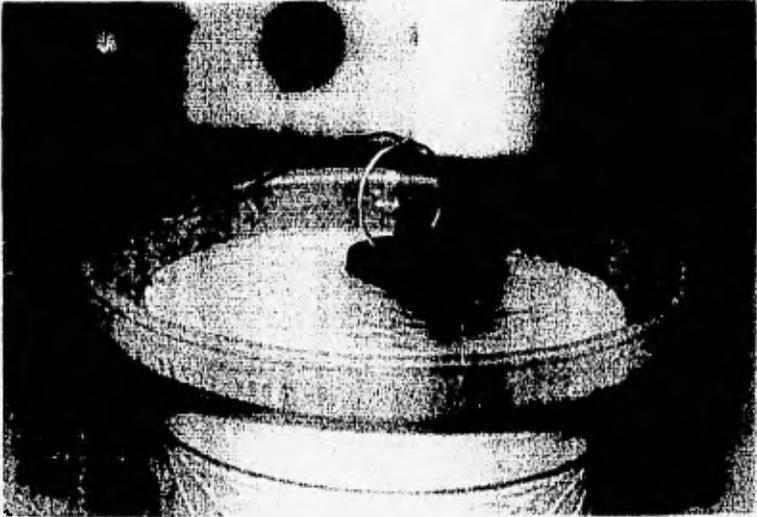


Fig. 6.2.- Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación



Fig. 6.3.- Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación



Fig. 6.4.- Gráfica de lo observado al realizar la prueba de levitación

CAPÍTULO 7

PERSPECTIVAS FUTURAS

7.1 SISTEMAS DE DEFENSA

Dentro de las aplicaciones en los sistemas de defensa de la superconductividad es que podrían escudar contra explosiones nucleares con computadoras de alta rapidez y motores generadores. Conceptualmente hay una pequeña diferencia entre la defensa y las aplicaciones comerciales. Pero en la práctica las diferencias serán predominantes a nivel de aparatos y componentes que producen una fuerte radiación, es por eso que en los sistemas de defensa el costo de la realización de productos es muy diferente a la de los mercados comerciales.

En 1978 la agencia de investigación de proyectos avanzados de defensa (DARPA) de los Estados Unidos empezó a consolidar y desarrollar la investigación de embarcaciones electromagnéticas ó armas con barras bobinadas, la meta inicial al parecer era un cañón para la marina con el consentimiento de la iniciativa estratégica de defensa (S D I) .

Mucho del trabajo del departamento de defensa de los Estados Unidos (DOD) ha sido dirigido hacia los sistemas de alta velocidad capaces

del lanzamiento de proyectiles al espacio. Otra de las grandes preocupaciones son las aplicaciones comerciales o sea el desarrollo de maquinas o de armas para esto se tiene el anhelo de desarrollar buenos superconductores, por esto es que trata de empujar a una fase de investigación mas rápida de la superconductividad y de esta manera poder tener productos en el mercado. A causa de la importancia de la superconductividad en los servicios en general dentro de los Estados Unidos DARPA tiene expectativas de desarrollar los superconductores de alta temperatura crítica.

El objetivo del programa de DARPA es desarrollar el proceso de fabricación de materiales superconductores con temperaturas de transición sobre los 90 °K. Para lograr su objetivo el programa plantea las siguientes actividades:

- Aprovechar los resultados de las investigaciones para la comprensión de los materiales y desarrollar una ciencia industrial para apoyar la fabricación de materiales y de prototipos.
- Concentrar esfuerzos para desarrollar tan rápidamente como sea posible una tecnología industrial basada en el proceso de fabricación de nuevos superconductores con materiales cerámicos.
- Sintetizar el proceso y fabricación de materiales en ingeniería en cuanto a forma y tamaño incluyendo una caracterización completa del material, demostración de los componentes y una determinación de la viabilidad para usarlos en escenarios Industriales avanzados.

- Acortar el tiempo de investigación y desarrollo de la investigación
- Contribuir al desarrollo de una base industrial para la construcción de componentes superconductores.

Entonces el superconductor en desarrollo tendrá propiedades apropiadas para aplicaciones grandes como pequeñas, y se tendría la delantera en la fabricación de máquinas y aparatos con materiales superconductores.

Dentro de las perspectivas futuras que pueden tener los superconductores en un futuro podrían tenerse las siguientes.

- Rayos laser con electrones libres para investigación y aplicaciones en armas militares.
- Aparatos de almacenamiento de energía de todas clases que guarden la energía y más tarde proveerla a equipos que la demanden.

7.2 CABLES SUPERCONDUCTORES

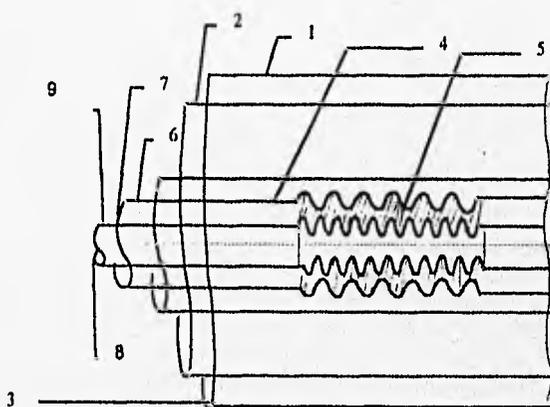
La dificultad que pueden presentar los cables superconductores es que necesitarían de una cubierta refrigerante que los cubriera para mantenerlos a una temperatura inferior a la temperatura crítica del material del que esta fabricado.

Uno de los objetivos principales seria el de construir un cable que trabajara a la temperatura ambiente pero eso aún no se ha logrado.

Podíamos hacer algunas consideraciones sobre posibles cables conductores a partir de un par de ellas:

- Aislamiento térmico
- Sistema que se emplea en el conductor eléctrico

Podíamos considerar un posible superconductor en base a la siguiente figura:



1) TUBO DE PROTECCION
2) SUPERAISLAMIENTO
3) VACIO
4) ESPACIADORES
5) FUELLES

6) NITROGENO
7) ESCUDO FRIO
9) SUPERCONDUCTOR

Fig.7.1.- Tipo de cable superconductor.

Como se observa en la figura el aislamiento y el conductor se fabricarían con tubos rígidos. Ahora bien que dificultades podrían presentarse en este tipo de cables:

- La longitud máxima de manufactura de este cable sería solamente de 25 metros debido a sus condiciones de rigidez.
- Se necesitaría de una gran cantidad de uniones que lo harían muy costoso.

Que tipo de ventajas se podrían obtener con un cable de estas características :

- Todos los conductores podrían acomodarse en una envoltura térmica rígida común, lo que reduciría en una disminución de las pérdidas térmicas.
- La capacidad de transmisión de corriente sería mucho mayor que los métodos convencionales,

Se podrían hacer consideraciones sobre algunos otros tipos de construcciones que definitivamente también tendrían sus desventajas.

7.3 ELECTRÓNICA

Supongamos que tenemos como material al niobio, el campo magnético crítico de este es mucho mayor que el del tantalio por ejemplo. Si consideramos que tenemos a ambos elementos inicialmente en estado

superconductor. Ahora si hacemos circular una corriente I_1 por el alambre de tantalio, que como esta en estado superconductor no opone resistencia al paso de corriente. Ahora si hacemos pasar una corriente (I_2) por el alambre de niobio, se genera un campo magnético en el cual queda dentro el alambre de tantalio si la corriente (I_2) es lo suficientemente grande se puede generar un campo magnético que lleve al tantalio a su estado normal al ocurrir esto lógicamente aparecerá una resistencia en el alambre de tantalio reduciéndose así el valor de esa corriente, sin embargo el alambre de niobio permanece en estado superconductor ya que el campo crítico del niobio es mayor que el del tantalio para la misma temperatura. entonces el valor de la corriente que pasa por el alambre de tantalio puede controlarse con una corriente menor.

El alambre de tantalio recibe el nombre de alambre de paso o simplemente paso. El alambre de niobio recibe el nombre de alambre de control ó simplemente control, por lo general el calibre del alambre de paso se toma lo mas grande posible para así tener en el la mayor cantidad de corriente. Al circuito descrito en los párrafos anteriores y que se muestran en la siguiente figura se les da el nombre de criotrones.

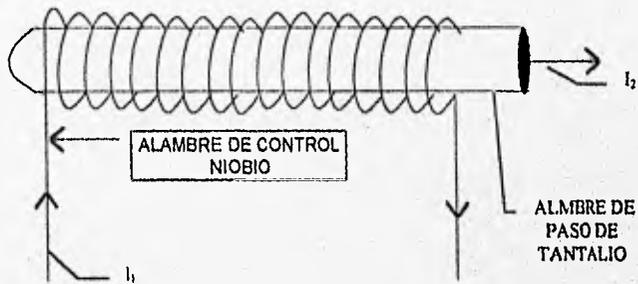


Fig.7.2.- Esquema que muestra el criotron o relevador superconductor

El uso de estos criotrones se vio limitado ya que existían los transistores que tenían grandes aplicaciones y que además funcionaban a temperatura ambiente, con la aparición de los nuevos superconductores se podrían volver a intentar en el desarrollo de los criotrones, esto es debido que en estos materiales la temperatura de refrigeración es mucho más alta, los criotrones se han usado para controlar corrientes en circuitos de imanes superconductores.

Una de las aplicaciones más importantes debe ser la producción de campos magnéticos, generalmente se han utilizado electroimanes superconductores que sirven para producir campos magnéticos altamente

estables y que tienen aplicación en los estudios de la resonancia magnética y la microscopia electrónica de alta resolución.

Por otro lado es de esperarse que los posibles motores y generadores superconductores tendrán un gran auge en tiempos venideros ya que en el funcionamiento de estos se utilizan campos magnéticos intensos, también se pretende utilizar superconductores para la levitación de trenes de transporte de pasajeros o de carga.

A continuación se presentan algunas características que deben presentar los superconductores comerciales:

- La mayor temperatura crítica posible, esto es por que mientras mayor sea esta temperatura crítica mayor será la temperatura de operación de los dispositivos que se fabriquen.
- El mayor campo magnético crítico posible por que como se pretenden utilizar los superconductores para generar campos magnéticos intensos, mientras mayor sea el campo magnético que se quiere generar mayor deberá ser el campo magnético crítico
- La mayor densidad de corriente crítica posible esto es debido a que mientras mas grande sea la densidad de corriente crítica que la muestra soporte antes de pasar a un estado normal, más pequeño será el dispositivo que se quiera fabricar, de esta manera el material superconductor será menor.
- La mayor estabilidad posible, esto es debido a que los superconductores son inestables bajo cambios repentinos de corriente , de campos

magnéticos o de temperaturas o bien choques mecánicos o por degradación del material por el paso del tiempo

- Facilidad de fabricación ya que si no se puede construir a gran escala será completamente inútil en su aplicación comercial
- Costo mínimo ya que siempre este será una gran limitante para su aplicación en gran escala.

7.4 COMERCIALIZACIÓN DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Dentro del mundo actual Estados Unidos de Norteamérica dedica muchos recursos para investigaciones sobre la superconductividad y Japón va mercantilizando el fenómeno aunque los Estados Unidos tratan de lograr que además de la investigación que se realice se tenga un desarrollo una pregunta que nos surge es que si la industria de los Estados Unidos verdaderamente tiene dificultades para comercializar el diseño en productos basados en tecnologías nuevas como es la superconductividad y se tendrá como respuesta que si ya que desde la década de los sesenta los productos mas comercializados provienen de ingeniería y ciencia de Japón ya que dentro de las aplicaciones básicas se encuentra aparatos basados en la electrónica campo dominado como ya se menciona por Japón.

Un punto importante es decir que la comercialización de tecnologías nuevas depende básicamente del trabajo que pudiera realizar el sector privado, las empresas privadas usan mas resultados científicos y técnicos observados en investigaciones realizadas en Universidades y crean una tecnología más grande basada en esa información, algunas compañías

apuntan hacia el conocimiento organizado de las características técnicas y de la fabricación del producto.

En un principio con la aparición primeramente del semiconductor los japoneses aprovecharon la habilidad e ingenio de personas dedicadas al estudio de estos temas.

Actualmente la comercialización del superconductor de alta temperatura depende básicamente del conocimiento científico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro del desarrollo de esta investigación se ha pretendido mostrar la importancia del fenómeno de la superconductividad en el futuro de la humanidad principalmente en el aspecto tecnológico, es importante mencionar que de llegar a encontrarse superconductores que funcionen a una temperatura ambiente la revolución que habría en el mundo científico sería impresionante ya que las aplicaciones no tendrían límites y de esta manera el campo de la investigación tendría un campo de acción importante.

Como se manejo al principio de la investigación esta tenía un propósito de presentar un material de información del fenómeno de la superconductividad y sus aplicaciones, lamentablemente el campo de investigación es limitado a ciertos institutos y no se le ha dado una real importancia al fenómeno ya que en muchas partes existe un total desconocimiento o un nulo interés en ingresar al campo de la investigación del fenómeno, dentro de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan sería importante fomentar el interés de sus diferentes componentes desde directivos hasta estudiantes de entrar en investigaciones y trabajos enfocados a realizar estudios mas profundos sobre el fenómeno de la

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

superconductividad y posibles aplicaciones, dentro de la investigación desarrollada en lo referente al capítulo de Análisis de Fabricación se pretendía realizar el experimento de construcción de la pastilla superconductora para mostrar el fenómeno Meissner, Aunque definitivamente los equipos necesarios para su realización se dificultaba conseguirlos ya que como se muestra en la explicación en ese capítulo son equipos con características muy definidas, sin embargo creemos que este experimento ya ha sido aplicado por diferentes investigadores, y nuestro interés era mostrar el proceso que se sigue en la construcción de esta pastilla y en función de esto se pudiera retomar para la aplicación en alguna otra investigación, respecto de las perspectivas futuras que tiene la superconductividad dentro de los ejemplos que se manejaron se muestra que estas son amplias aunque también con sus respectivas limitantes, creemos firmemente que si se fomentara la investigación en base a lo que ya se trabaja actualmente se obtendrían resultados interesantes, dentro de lo observado se podría concluir que realizando trabajos interdisciplinarios entre las distintas áreas que tienen aplicación en el fenómeno se podría avanzar en una mayor proporción y se obtendrían mejores resultados,

Otra observación que es importante mencionar es que se trataron de escoger ejemplos de aplicaciones sencillas que tuvieran una fácil comprensión pero que sin embargo las aplicaciones son muchas y muy variadas aunque muchas de ellas ya muy complejas y no siendo el objetivo de esta investigación se han mencionado pero sin entrar en una explicación muy detallada, por que como se ha mencionado anteriormente el objetivo era presentar un trabajo que mostrara de una manera sencilla una introducción al fenómeno de la superconductividad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esperamos que la investigación que se presenta resulte de fácil acceso y comprensión de lo que es el fenómeno de la superconductividad y de sus alcances.

BIBLIOGRAFIA

H.M. Rosenberg, "El estado sólido", Alianza Universitaria de textos, Madrid 1991.

T.P.Orlando and K.A.Delin, "Foundations of Applied Superconductivity, Addison Wesley, 1991.

M. Thinkman, "Introduction to superconductivity", Robert. E. Krieger, 1980.

R. C. Taber. "Parallel plate resonator Technique for microwave loss measurements on superconductors". Rev. Sci. Instrument., vol. 61, # 8, pp 2200-2206, Aug. 1990.

R. C. Taber, J. N. Hollenhorst, L.S. Cutter, T.L. Bagwell, N. Newman, and B.F. Cole. "High-Temperature Superconducting resonator" IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. vol 39, # 3, pp. 398-404, May 1992.

A. J. Berlinski, C. Kallin, G. Rose and A.C Shi. "Two-Fluid interpretation of the superconductivity of clean BCS superconductors," Phys Rev B. vol 48, pp. 4074-4079, 1993.

R. Popel "Surface Impedance and reflectivity of superconductors" Phys. vol 66, pp. 5959-5957, 1989.

J. H. Hinken, "Superconductor Electronics", Berlin, Springer-Verlag 1988

D. S. Linden, "A modified Two-Fluid model of superconductivity for superconducting surface resistance calculation" M.S. Thesis, MIT, 1993