

300617

3

Zef



UNIVERSIDAD LA SAL

ESCUELA DE INGENIERIA

Incorporada a la U.N.A.M.

" SUPERCONDUCTIVIDAD: ESTADO
ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE USO "

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

Tesis Profesional

Que para obtener el Título de
Ingeniero Mecánico Electricista

P r e s e n t a

Luis Felipe Aguilar Zermeño



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 está 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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INDICE

INTRODUCCION	1
1.- HISTORIA	2
1.1 Generalidades	2
1.2 Principios de la superconductividad	3
1.3 Descubrimiento de aleaciones de niobio	4
1.4 Descubrimiento de aleaciones superconductoras con base de litio y bario	5
1.5 Cerámicas superconductores	5
1.6 Superconductores a temperatura de nitrógeno líquido ..	6
1.7 Desarrollo del compuesto YBaCuO	7
1.8 Desarrollos posteriores al descubrimiento del YBaCuO ..	8
1.9 Superconductores de bismuto y talio	8
1.10 Conclusiones	10
2.- ESTRUCTURA CRISTALINA	13
2.1 Superconductividad y la tabla periódica	13
2.2 Concentración de oxígeno y características de $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$	16
2.3 Estructura 1:2:3	16
2.4 Microanálisis de superconductores YBaCuO	22
2.5 Características estructurales del compuesto YBaCuO con impurezas de Fe	26
3.- CARACTERISTICAS BASICAS	28
3.1 Elementos y compuestos superconductores	28
3.2 El efecto Meissner y la reversibilidad de la transición superconductoras	28
3.3 Propiedades magnéticas	30
3.4 Profundidad de penetración	32
3.5 Energía superficial	34
3.6 Campo, temperatura y densidad de corriente críticas ..	36
3.7 Degradación de la superconductividad	39
3.8 Teoría BCS	41
3.9 Teoría de los excitones y bosones	44
3.10 Teoría de los plasmones	44
3.11 Teoría Ginzburg-Landau	44
3.12 Conclusiones	45
4.- FABRICACION	47
4.1 Generalidades	47
4.2 Fabricación de superconductores en bruto	47
4.2.1 Fabricación de compuestos BaLaCu_3 y SrLaCuO	47
4.2.2 Fabricación de superconductores en bruto por aglomeración	48
4.2.3 Crecimiento de grano y eliminación de poros	52
4.2.4 Preparación de cerámicos con sustitución del itrio ..	54

4.2.5	Fabricación de supercondutores por el método de función	57
4.2.5	Fabricación de alambres superconductores	57
4.2.7	Importancia del oxígeno en la fabricación de superconductores	58
4.3	Fabricación de películas superconductoras	60
4.3.1	Método electroquímico	60
4.3.2	Proceso de deposición por evaporación o rocío	61
4.3.3	Características del sustrato	61
4.3.4	Preparación de películas por rocío	63
5.-	USOS Y PERSPECTIVAS DE LOS SUPERCONDUCTORES	65
5.1	Introducción	65
5.2	Transmisión de energía	65
5.3	Almacenaje de energía magnética superconductoras	66
5.4	Imanes superconductores	68
5.5	Generadores superconductores	69
5.6	Trenes magnéticos	71
5.7	Interconexiones electrónicas	72
5.8	Uniones Josephson	74
5.9	Colisionador superconductor (SSC)	76
5.10	Bolómetro superconductor	81
5.11	Resonador nuclear magnético	81
	CONCLUSIONES	83
	DEFINICIONES	85
	BIBLIOGRAFIA	87

INTRODUCCION

Los albores de una revolución tecnológica marcarán los fines del siglo ^{XX}. Desde el anuncio del descubrimiento de un material superconductor de alta temperatura, que permite el libre flujo eléctrico sin oponer resistencia alguna, ha causado gran interés, sobre todo en la porción correspondiente a la comunidad científica, que ha iniciado una carrera por el éxito en el área. Las posibilidades que genera el descubrimiento han alimentado la imaginación.

La superconductividad es un concepto no fácil: A temperaturas suficientemente bajas, ciertas sustancias y elementos pierden su resistencia al paso de la electricidad. Los beneficios potenciales son enormes.

La investigación de la superconductividad es una de las disciplinas con mayor impacto en la sociedad científica; por esta razón, el apoyo en la formación de grupos de investigación básica y aplicada en el área, es muy importante en un país como México, si en el futuro se desea participar competitivamente en las industrias de alta tecnología.

Los científicos mexicanos conscientes de la importancia del descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas críticas en cerámicos de óxidos de tierras raras, han realizado estudios, experimentos, pruebas, congresos y sesiones especiales sobre la física y tecnología de los superconductores. Han efectuado trabajos en diferentes congresos, como resultado de las investigaciones de diferentes grupos que están trabajando en este campo dentro de nuestro país. El alto nivel de los trabajos ha sido notorio a nivel internacional.

Es grato saber que los investigadores, tecnólogos y profesionistas que se dedican a la superconductividad, siguen trabajando para que el volumen y calidad de trabajos siga en aumento, en beneficio de la comunidad internacional y especialmente de nuestro país.

En este trabajo se intenta acumular los conocimientos básicos, los últimos descubrimientos y algunas de las posibles aplicaciones, así como formar una idea clara del futuro a corto, mediano y largo plazo de la superconductividad para personas interesadas en el tema, que no tengan los conocimientos técnicos necesarios para comprender el fenómeno.

La falta de un conocimiento cierto, la gran cantidad de materiales y el continuo descubrimiento de nuevos compuestos superconductores, hace muy difícil la tarea de presentarlos en su totalidad con bases científicas, por lo que se presentan los compuestos con las características más marcadas en los diferentes estudios; sin embargo, es importante que el lector sepa que la física de superconductores de alta temperatura es enteramente rica, y a la vez muy confusa, debido a la ineficiencia de los medios de comunicación científica entre laboratorios.

1 HISTORIA.

1.1 Generalidades.

La superconductividad había sido un fenómeno oculto que había sido relegado sólo a experimentos científicos esporádicos. El descubrimiento de la superconductividad a temperatura ambiente, según creen los científicos, podría llevarnos a grandes ahorros de energía, y a una tecnología totalmente nueva.

Superconductividad es un nombre que bien describe el fenómeno. Este, involucra a una notable transición que ocurre en muchos metales y compuestos que son enfriados a temperaturas cercanas al cero absoluto, que equivale a 0 K (-273.16 C), y representa la ausencia total de calor, la temperatura más fría concebible.

Según se aproximen los metales a este límite, pierden de repente toda su resistencia eléctrica y se convierten en superconductores. Esto, los hace capaces de transportar corrientes eléctricas sin pérdida alguna de energía, y en algunos casos, capaces de generar campos magnéticos inmensos.

Los científicos han reconocido por años que las implicaciones de este fenómeno podrían ser enormes, pero un obstáculo ha estado en el camino: el alcanzar y mantener las temperaturas necesarias para lograr la superconductividad en estos metales es difícil, y la mayoría de las veces prohibitivamente caro.

Pero, con una serie de rápidos descubrimientos, los investigadores en todo el mundo han empezado a confeccionar diferentes clases de materiales que se vuelven superconductores a temperaturas significativamente más altas, niveles que, aunque son mucho menores que la temperatura ambiente, son más fáciles y económicos de alcanzar. Estos logros han tenido un gran efecto en la materia que, a principios de 1985, habrían extraído la más grande admiración de los científicos, y atraer la mirada de políticos y del mundo en general.

Desde la sesión anual del "American Physical Society's" el 18 de marzo de 1986, han habido muchos reportes científicos de nuevos materiales superconductores y cada vez a mayores temperaturas.

Un efecto que alguna vez sólo podía ser detectado por equipos sofisticados, ha llegado a ser un tema común en conferencias: una muestra de los nuevos materiales puesto en nitrógeno líquido y un imán puesto sobre él "flotando", esto, debido al rechazo del superconductor a los campos magnéticos, este fenómeno es conocido como el "Efecto Meissner".

El hecho es que la "competencia" entre científicos, cada vez se vuelve más intensa, se dice que esto es como cuando el transistor fué inventado. Estos investigadores luchan por el premio Nobel, mientras que las naciones industrializadas luchan por tener la supremacía y control comercial potencial.

del fenómeno, sirvan como ejemplos el Japan's Ministry of International Trade and Industry que planea subsidiar un sector investigador privado y establecer en Nagoya un centro para probar equipos hechos con materiales superconductores; y en Washington, el Departamento de Energía que decidió en 1987, duplicar el apoyo económico para estudios de la superconductividad, y formó una comisión nacional para coordinar la investigación y desarrollo de la superconductividad.

El impacto social y tecnológico podría ser en los próximos años como lo fué el que produjo el transistor.

1.2 Principios de la superconductividad.

Desde que el físico alemán Heike Kammerlingh Onnes descubrió la superconductividad en 1911, hasta la última serie de descubrimientos, sólo había una forma de producir el fenómeno: bañando el metal apropiado, (y después fueron ciertas aleaciones metálicas) en helio líquido, que se obtiene bajando su temperatura a 4.3 K (-268.8 C) a la cual se licúa. Pero el proceso es caro y requiere mucha energía.

En la figura 1.1 se ilustra una gráfica de la resistencia eléctrica en función de la temperatura para una muestra de mercurio en las proximidades de la temperatura crítica (T_c), como fué determinada en 1911 por H. Kammerlingh Onnes.

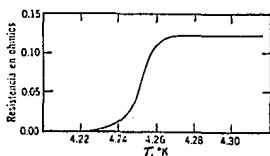


Figura 1.1 Resistencia eléctrica del mercurio en función de la temperatura.

A demás, a menos de que el helio líquido esté herméticamente sellado en un recipiente aislado, rápidamente se calienta y se vaporiza. Así que el uso práctico del superconductor, había sido limitado a algunas ideas.

En 1911, Kammerlingh Onnes, observó que una muestra de mercurio enfriada a 4.3 K (-268.8 C), presentaba sólo una pequeñi-

sima parte de su resistencia eléctrica a temperatura ambiente.

Onnes, pronto imaginó las ventajas que prometía tal fenómeno, que después llamaría "superconductividad". En un escrito suyo, anunciando su descubrimiento, dice: "Materiales que podrían transportar increíbles cantidades de corriente pues no generan calor". Un editor de "The Electrician", una revista inglesa, publica una opinión personal sobre el descubrimiento de Onnes y propone que solenoides de cable superconductor, transportando grandes cantidades de corriente, podrían generar campos magnéticos no imaginados hasta entonces.

Pero dos años más tarde el júbilo se derrumba al descubrir Onnes, que aún pequeñas corrientes eléctricas y/o campos magnéticos de unos cuantos cientos de gauss, cancelaban el estado superconductor del material.

Aunque Onnes previó que su descubrimiento abriría camino hacia la construcción de poderosos electroimanes compactos, él y muchos otros investigadores se venían frente a un obstáculo: al pasar suficiente corriente por los superconductores conocidos hasta entonces (plomo, estaño, mercurio y algunas aleaciones), para generar campos magnéticos significativos, éstos perdían su capacidad de superconducción.

1.3 Descubrimiento de aleaciones de niobio.

En los años cincuenta, los científicos descubren aleaciones como niobio-estaño y niobio-titanio, que conservaban su capacidad superconductoras aún en presencia de intensos campos magnéticos, pero el avance hacia el logro de obtener superconductividad a temperaturas prácticas, era lento.

En 1953, John Hulm en la Universidad de Chicago, encontró un material: vanadio-3 silicón (V_3Si), que se volvía superconductor a 17.5 K (-255.66 C).

La segunda gran desilusión que han sufrido los investigadores y científicos en el campo de la superconductividad, aún estaba por aparecer. A principios de los años cincuenta, John Hulm y George Hardy de la Universidad de Chicago, descubren el primero de los superconductores de alta temperatura de este tipo, los cuales tienen lo que los químicos llaman una estructura cristalina A15. Pronto, los investigadores de los Laboratorios Bell, Bernd Matthias y Theodore Geballe, descubren otro componente A15: niobio-estaño. Entonces en 1960, Eugene Kunzlev, del mismo laboratorio, impresiona al mundo científico, demostrando que el niobio-estaño podía transportar 100,000 A/cm², en un campo de 8.8 teslas (88,000 gauss), mucho más de lo imaginado hasta entonces, y además, un segundo material: niobio-titanio, fue encontrado con las mismas características superconductores, con la ventaja de ser más dúctil. El desarrollo de imanes superconductores basados en Nb_3Sn , sirvió como base para los que ahora se usan en Tevatron, en Fermilab y en aparatos de imágenes de resonancia magnética. El optimismo de principios de siglo se revivía.

Esta vez, el principal obstáculo era lograr las temperaturas críticas de los materiales a base de niobio, como del rango de 20 K (-253.16 C): esto significaba usar helio líquido como único enfriador, y dichos sistemas de enfriamiento resultaban tan complicados que no eran económicamente prácticos en la mayoría de las aplicaciones.

Más estudios de Matthias y Geballe en los sesentas, lograron elevar la temperatura de transición arriba del punto de ebullición del hidrógeno líquido 20 K (-253.16 C), logrando gracias a esto una T_c de 23.2 K (-249.96 C) con películas delgadas de Nb₃Ge (1973 por John Gavaler).

Para 1973, a 62 años del descubrimiento de la superconductividad a 4.3 K (-268.8 C), la temperatura más elevada lograda por los científicos era de sólo 23 K (-250.16 C), es decir, sólo 18.8 K se había aumentado la temperatura de transición, lográndolo con una aleación Nb₃Sn, y ese mismo año se llegó a 23.2 K (-249.96 C) con la misma aleación.

1.4 Descubrimiento de aleaciones superconductoras con base de litio y bario.

En 1973, David Johnston en la Universidad de California, descubre superconductividad en LiTiO₂ a 13.7 K (-259.46 C). En 1975, Arthur Sleight de Du Pont Research, descubre superconductividad en BaPb_{1-x}Bi_xO₃ a 13 K (-260.16 C). Estos descubrimientos no superaron la más alta temperatura crítica conocida, ni causaron excitación entre los científicos, pero éstos óxidos mostraron algunas características irregulares, siendo la más notable que su T_c fué mucho más elevada que la esperada debido a sus densidades electrónicas.

1.5 Cerámicos superconductores.

Karl Alex Müller, un físico del laboratorio de investigaciones de IBM en Zurich, Suiza, decidió dedicarse a la superconductividad, campo en el que había logrado cierto éxito.

Müller y su colega George Bednorz, guiaron sus investigaciones intuitivamente. La idea de buscar superconductividad en la clase de cerámicos llamados perovskitas, se le ocurrió a Müller en Sicilia, en el verano de 1980, cuando recibió una carta de Claude Michel y Bernard Bednorz, de la Universidad de Caen, en Francia, en la que le informaban que en un compuesto cerámico, que debería impedir el paso de la corriente o actuar como aislante, los químicos habían encontrado signos de conductividad eléctrica. El equipo de IBM se dedicó de lleno a la superconductividad, pero decidió, en vez de usar las aleaciones metálicas o los AIS, que tenían el récord de temperatura crítica más elevada, atender los óxidos metálicos conocidos como cerámicos. Algunos técnicos han propuesto a los cerámicos como superconductores potenciales, aún cuando son "malos conductores" a temperatura ambiente, de hecho, los cerámicos son usados como aislantes en las líneas de transmisión de altos voltajes.

1.6 Superconductores a temperatura de nitrógeno líquido.

Müller y Bednorz decidieron alterar el método de los franceses al preparar el compuesto LaBaCuO : En vez de simplemente mezclar los polvos de óxidos de lantano, bario y cobre, decidieron disolverlos en agua primero y después calentarlos hasta 1255 K (982 C), variando cantidades. El material tenía una estructura parecida a un "sandwich" con capas de átomos de lantano y bario alternando con capas de átomos de cobre y oxígeno. Bednorz hizo pasar una corriente a través de la muestra, y la resistencia eléctrica cayó bruscamente a 75 K (-238.16 C), y llegó a cero ohms a los 10 K (-260.16 C). Nunca nadie había observado el fenómeno a esa temperatura. Y fué así como se logró el gran salto en temperaturas críticas, en 1985.

Este salto, trajo de repente la superconductividad a un terreno práctico, ya que el helio líquido puede, ahora, reemplazarse por nitrógeno líquido que se transforma de gas a líquido a 77 K (-196.16 C), y que es bastante más barato y puede ser manejado más fácilmente.

Los cerámicos también son capaces de generar campos magnéticos muy intensos. Así, si estas nuevas sustancias pueden ser dirigidas hacia recursos prácticos, y de hecho, la mayoría de los científicos lo cree, la tecnología podrá ser transformada.

En abril de 1986, en la investigación de superconductividad, cada pequeño incremento en el valor máximo conocido de T_c , era recibido con gran entusiasmo, y mantenía viva la esperanza de que la aplicación de la superconductividad a gran escala fuera posible algún día. Este sorpresivo gran avance parecía irreal: sin embargo, nadie desechó el descubrimiento, y científicos de todo el mundo se sintieron satisfechos al ver que la máxima T_c conocida brincaba a tan "altos grados" en 1986. Pero antes de que terminara el año, había ya tres reportes independientes: La Universidad de Tokio (dirigidos por Shoji Tanaka), Laboratorios AT&T Bell (con Bertram Barlogg al frente), y el Instituto de Física de Beijing, que sustituyendo el bario por estroncio, en el tipo de óxidos estudiados por Bednorz y Müller, la T_c podía ser elevada aún a 40 K (-233.16 C).

En la última semana de diciembre de 1986, la Universidad de Houston, al mando de Paul Chu, reporta características superconductoras a 52 K (-221.16 C) en BaLaCuO bajo presión de 11 kbar aproximadamente. Lo que lo puso en ventaja sobre los otros investigadores.

Se descubrió que el compuesto seguía siendo superconductor a 52 K (-221.16 C) estando a 11,000 veces la presión atmosférica normal, y que, forzado a mayores presiones, esta perdía su efecto.

Se pensaba que altas presiones "aplastaban" la estructura molecular del compuesto, y que ésto de alguna manera aumentaba la temperatura de transición hacia la superconductividad, per-

ro cuando se vió que más presión no tenía efecto, se intentó comprimir las moléculas desde "dentro", reemplazando el bario por estroncio, que es similar químicamente pero con estructura atómica más pequeña. La temperatura se elevó a 54 K (-219.16 C). Después se cambió a calcio, elemento con átomos aún más pequeños, pero esta vez la temperatura descendió bruscamente. Entonces Chu y su equipo intentaron con itrio, que es al igual que el lantano, una "tierra rara" (así es llamado un grupo de 15 elementos químicos), con mejores resultados.

Maw-Kuen Wu (del grupo de Paul Chu), alcanzó grandes resultados con itrio, éxito que llevó a Chu a patentar su compuesto el 12 de enero de 1987, y que mostró la posibilidad de superconductividad a 90 K (-183.16 C).

1.7 Desarrollo del compuesto YBaCuO.

Con el anterior descubrimiento, la transición a superconductividad, estable y reproducible, entre 80 y 93 K (-193.16 y -180.16 C), fué observada resistiva y magnéticamente en un compuesto YBaCuO a presión ambiental y bañado en nitrógeno líquido; se hace hincapie, debido a que en el pasado hubieron casos en que decaimientos fortuitos e irregulares de la resistividad eléctrica, fueron confundidos con superconductividad. Así, el 16 de febrero de 1987, se anuncia formalmente la superconductividad a 93 K (-180.16 C).

Wu y Chu repitiendo el experimento, logran mejorarlo en 5 K, llegando a 98 K (-175.16 C), después de someter el compuesto a una serie de tratamientos químicos y térmicos.

La carrera entre laboratorios industriales y de gobierno, de universidades e investigadores particulares en todo el mundo, por la supremacía en la tecnología de la superconductividad había comenzado.

Aunque Chu se negó a revelar la composición exacta de su compuesto antes de presentar su reporte en "Physical Review Letters", el 2 de marzo de 1987, los demás científicos siguieron trabajando en los diferentes compuestos.

El compuesto YBaCuO ha sido llamado un verdadero regalo de la naturaleza, ya que los tres primeros elementos se combinan en una relación 1:2:3 (el oxígeno varía) para ser superconductor. Habiendo sido el descubrimiento prácticamente imposible de no ser así.

La estructura molecular del material superconductor está compuesta, entre muchas y diversas variantes, de un átomo de itrio, dos de bario, tres de cobre y siete de oxígeno. Otras combinaciones se han hecho con lantano, neodimio, europio, escandio, iterbio y gadolinio, entre otros.

En el centro de investigaciones de Almaden de IBM, los científicos lograron duplicar el compuesto, analizando el mismo, pasaron la información de su estructura cristalina a sus colegas de Yorktown Heights, N.Y., donde lograron hacer una

delgada película de la sustancia durante sólo unas horas.

Mientras tanto, en Berkley, Universidad de California, un grupo de científicos, incluyendo al físico teórico Marvin Cohen, quien curiosamente había predicho la existencia de superconductividad a altas temperaturas desde hacía dos décadas, logró alcanzar el récord de 96 K (-175.16 C).

En mayo de 1987, el equipo de Chu obtuvo signos de superconductividad a 225 K (-48.16 C), pero no en una forma constante, sino extremadamente inestable, en un compuesto de varias fases, y siguió trabajando en él, pues si se logra aislar la fase superconductor, estaríamos más cerca de la superconductividad a temperatura ambiente.

En junio de 1987, Stanford Ovshinsky, de "Energy Conversion Devices, Inc." de Troy, Mich., anunció que algunas regiones de un material experimental, (una mezcla de itrio, bario, cobre, flúor y oxígeno), mostraron signos de superconductividad a la temperatura de 305 K (31.84 C), sin embargo, nunca confirmó su anuncio y nadie logró duplicar sus resultados con materiales similares.

1.5 Desarrollos posteriores al descubrimiento del YBaCuO.

Los especialistas en materiales avanzan en procesos y técnicas de fabricación, diseñadas para incrementar las densidades de corriente de los superconductores cerámicos. Así mismo, intentan resolver el problema de la fragilidad del compuesto de itrio, así como su sensibilidad al contenido de oxígeno y las condiciones ambientales.

En enero de 1988, Hiroshi Maeda, del "Japan's National Research Institute for Metals", de Tsukuba, reporta un compuesto de bismuto que rebasa los 106 K (-167.16 C), siendo un óxido de bismuto, bario, calcio y cobre.

En México, el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, obtiene un material similar al logrado por IBM, a fines de febrero de 1988. Este fue el primer centro de investigación en lograr la hazaña en Latinoamérica, y uno de los primeros en el mundo. En el Instituto de Física, diez días después, se obtuvo un material que muestra también la transición superconductor, bajo similares características.

Para febrero de 1988, un nuevo material cerámico fue encontrado: óxido de talio, bario, calcio y cobre, en la Universidad de Arkansas. Este material alcanza la resistividad cero también a los 106 K (-167.16 C); en mayo del mismo año, IBM-Almaden, con el mismo material, variando las proporciones, alcanza los 125 K (-148.16 C).

1.6 Superconductores de bismuto y talio.

Los materiales de bismuto, contienen una fase superconductor: 2:1:2:2 (dos átomos de bismuto, uno de bario, dos de calcio y dos de cobre). De hecho, el material de bismuto tiene dos distintas fases superconductoras 2:1:2:2, variando única-

mente la localización de los átomos de oxígeno y tienen unas temperaturas de transición de 85 K (-188.16 C) y 106 K (-167.16 C), respectivamente. Los científicos han tenido dificultad para aislar la fase de 106 K (-167.16 C).

El material de talio tiene una fase superconductor 2:2:2:3 (dos átomos de talio, dos de bario, dos de calcio y tres de cobre), con más alta temperatura de transición. En el mes de marzo de 1986, IBM-Almaden, logra exitosamente aislar la fase de alta temperatura para lograr los 125 K (-148.16 C). Estos últimos compuestos, sugieren ya la naturaleza de la "superconductividad cerámica", tienen un elemento más, y la fase del material de talio 2:2:2:3, tiene un plano más de oxígeno y cobre en su estructura que el material de itrio; según parece, la complejidad de los compuestos va en relación con las temperaturas críticas cada vez más altas.

El científico Edward Engler, de IBM-Almaden, fue capaz de variar la Tc controlando el número de planos de talio en el material de talio. La fase 2:1:2:2 de dos planos, tiene una Tc de 108 K (-165.16 C) y la fase 2:2:2:3 de tres planos, tiene una Tc de 125 K (-148.16 C), y una combinación de dos y tres planos alcanza 118 K (-155.16 C).

Desgraciadamente el talio es muy venenoso, y podría ser impráctico para aplicarlo, sin embargo, puede ser la base de materiales con las mismas características.

Los descubrimientos de nuevos materiales superconductores ya no son tan rápidos, pues cada vez se incluyen más variantes que se deben controlar.

En los primeros meses de 1988, "Sumitomo Electric Industries Ltd." en Osaka, Japón, logró una densidad de corriente de 3.5 MA/cm² a 77 K (-196.16 C), con una película hecha de óxido de holmio, bario y cobre, análogo, como muchos otros, al compuesto YBaCuO.

En México, la evolución en el campo ha sido considerable. El IFUNAM, decidió institucionalmente enfrentar el reto, consiguió el material, conformó el equipo de laboratorio necesario, y logró reproducir el material de IBM, sin embargo, lo verdaderamente difícil consiste en superar las limitaciones de dicho material, la principal barrera es que no transmite grandes densidades de corriente y que no es lo suficientemente flexible para aplicaciones prácticas.

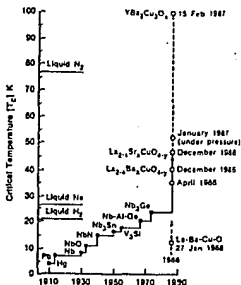


Figura 1.2 relación de los progresos en incrementos de T_c contra tiempo.

1.10 Conclusiones.

Mientras los científicos, teóricos y experimentales, se encuentran ocupados tratando de entender la física de los nuevos superconductores, y pensando en la forma de convertirlos en productos útiles para la sociedad, todos nos preguntamos si la T_c podrá ser elevada aún más. Uno de los mayores obstáculos es el hacer los nuevos materiales de formas "usables" en la práctica, pues mientras los metales son maleables, los cerámicos no, y un material flexible tiene grandes ventajas sobre uno quebradizo.

Para resolver el problema de la fragilidad, se requerirá una ingeniería que necesita aún mucho desarrollo, pero que, afortunadamente ya se está desarrollando en varios países dentro de los cuales México es vanguardista.

Se han desarrollado diferentes métodos para la aplicación práctica de objetos superconductores de formas irregulares, como es recociendo materiales no superconductores con materiales superconductores, o fabricando alambres con óxidos parcialmente reaccionados por extrusión.

Figura 1.3.- Un electrolito
YBaCuO, puede ser formado
y extruido en su estado
no-superconductor. Una vez
sinterizado, se vuelve
frágil.



Pero más fundamental, es el hecho de que los nuevos cerámicos pueden ser superconductores a temperaturas altas, y pueden generar campos magnéticos intensos, pero sólo pueden transportar una pequeña parte de la capacidad de corriente de un superconductor convencional, y no hay arreglo a este problema en corto plazo, aunque hay avances considerables. Lo que se espera en los próximos años es un desarrollo tal, que pueda modificar los óxidos para permitir grandes flujos de corriente a altas temperaturas.

También existe un problema humano, que puede atrasar el progreso en el campo de la superconductividad: la poca disponibilidad de los científicos de intercambiar información acerca de sus experimentos, pues los investigadores han sido aconsejados por abogados de patentes de revelar lo menos posible, hasta que su trabajo sea legalmente protegido.

La competencia va más allá de los derechos legales, los diferentes grupos de investigación quieren establecer que no han copiado a algún otro grupo en los diferentes avances en el campo.

Existen grupos de científicos en México, los cuales están buscando, al igual que otros en todo el mundo, la forma de entender por qué los cerámicos se vuelven superconductores, así como la fabricación de los mismos, afortunadamente México está, a nivel mundial, dentro de las primeras potencias en el campo de la superconductividad. Se han estado haciendo estudios sobre la microestructura de estos cerámicos, tomando fotografías de estos materiales con microscopios electrónicos, rayos X y ultrasonido, con resultados muy interesantes, que

pronto ayudarán a comprender el fenómeno de la superconductividad.

A mediados de 1990, se reportaron efectos relacionados con superconductividad, aunque no superconductividad real, estable y reproducible, a 240.4 K (-32.7 C), como bruscos decaimientos en la resistividad a distintos grados de magnitud en muestras de diferentes fases.

El impacto de superconductividad a temperatura ambiente sería incalculable.

2 ESTRUCTURA CRISTALINA.

2.1 Superconductividad y la tabla periódica.

La tabla 1 indica ciertas regularidades en la aparición de superconductividad en los elementos puros. Los metales del grupo V y VII tienen tendencia a poseer elevadas temperaturas de transición, y los grupos pares, temperaturas de transición bajas. Las aleaciones y los compuestos intermetálicos del tipo BCS, (ver sub-capítulo 3.8) siguen la misma regla general, siempre que se tome un promedio de la fracción atómica de los números de las columnas. Por ejemplo, una aleación de 50% Mo (grupo VI) y 50% Ti (grupo IV) tiene un número promedio de columna 7 y posee una T_c más elevada que el Mo y el Ti por sí solos. Como funciones de este promedio, las temperaturas críticas de las aleaciones y compuestos, tienden también a variar periódicamente, como los elementos puros.

Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
Na		Mg												Al	Si	P	S	Cl	A
K		Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb		Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs		Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr		Ra	Ac	Th	Pa	U													

(Algunos de los elementos parecen ser superconductores)

Tabla 1.- Tabla periódica indicando los elementos puros superconductores y las temperaturas de transición.

El valor máximo de T_c no aparece exactamente para una razón de electrones de valencia a átomos de V, sino para el valor 4.75. Así, una aleación de 75% atómico de Nb (grupo V) y 25% atómico de Ir (grupo IV) posee la razón óptima y, en efecto,

la T_c más elevada de cualquier aleación NbTi.
 La figura 2.1 compendia las observaciones de los investigadores hacia 1957, sobre el comportamiento periódico de T_c .

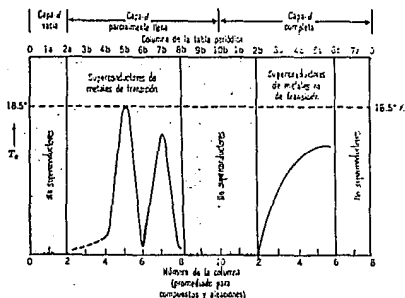


Figura 2.1.- La variación de T_c con la posición en la tabla periódica. Según S. Matthias.

La tabla 2 da una lista de T_c y H_c para varias aleaciones y compuestos con los campos críticos más elevados logrados a mediados de siglo.

MATERIAL	ESTRUCTURA	T_c (°K)	H_c A 4.2°K (AMP-VUELTAS/METRO)
Nb ₃ Sn	Tungsteno-beta	18.5	1.6×10^7 (Aprox.)
Nb ₃ Al	Tungsteno-beta	18.0	(7)
V ₃ Si	Tungsteno-beta	17.0	1.5×10^7 (Aprox.)
V ₃ Ge	Tungsteno-beta	16.8	2.8×10^7 (Extrapolado)
NbN	CCC (Sal de Piedra)	16	0.8×10^7 (Aprox.)
Nb-25% Zr	CC (Solución Sólida)	10.8	0.56×10^7
Nb-60% Ti	CC (Solución Sólida)	8.7	0.8×10^7

Tabla 2.- Temperatura y campo críticos para materiales con elevado H_c y elevada T_c .

A la temperatura ambiente, muchos de estos compuestos poseen la llamada estructura "tungsteno-beta" β -Nb₃, que está ilustrada en la siguiente figura. Los átomos de B forman una red CCC; los átomos de A están localizados en ubicaciones de tetra-

tetraedrales en tres cadenas ortogonales. Cualquier causa que rompa las cadenas, produce una disminución brusca en H_c y T_c . Algunos superconductores tungsteno-beta se transforman, de hecho, en otras estructuras por transformaciones martensíticas a temperaturas de helio o hidrógeno líquidos. De todos modos, los superconductores tungsteno-beta poseían los valores más elevados de H_c y T_c hasta el descubrimiento de los óxidos superconductores. Ningún superconductor del tipo A₁₅ posee un número de columna promedio menor que 3.

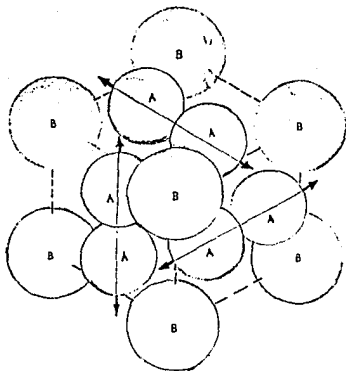


Figura 2.2.- La estructura tungsteno-beta. Los átomos A están en ubicaciones tetraedrales, en las caras de una celda CC de átomos B. Hay continuidad de cadenas de átomos A según indican las flechas.

Como ya hemos visto, los compuestos superconductores formados por niobio o vanadio que fueron utilizados a partir de 1973, cuando John Gavaler logró 23.2 K (-249.93 C) de T_c con una película de Nb₃Se, tienen una estructura del tipo A₁₅, que es un símbolo cristalográfico para estructuras tungsteno-beta; estos superconductores A₁₅ incluyen a los compuestos con composición Nb₃X o V₃X, donde X es un elemento metal de no transición. (Estos compuestos ya habían sido utilizados por Matthias, Hardy y Hülm en 1952, logrando desde entonces la más alta T_c : 17 K (-256.16 C) con V₃Si.

2.2 Concentración de oxígeno y características de $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$.

El descubrimiento de superconductividad en estos elementos en 1973 y 1975 respectivamente, mostró en estos óxidos una T_c mucho más elevada de la que se esperaba por sus densidades electrónicas.

La temperatura crítica para este compuesto depende sensiblemente de la concentración de bismuto, y es máxima cuando $x=0.25$, pero la amplitud de transición en monocristales bajo estas condiciones es de sólo 0.25 K (-272.91 C). Sin embargo, son muy útiles para los teóricos, pues se consideran más fáciles para estudiar el mecanismo de apareamiento de electrones gracias a su estructura, que también es perovskita, aunque se presentan algunas dificultades para obtener muestras homogéneas.

En lo que respecta a la concentración de oxígeno "y", se ha reportado que recociendo la muestra en vacío, se reduce la señal diamagnética. Pero esta pérdida de superconductividad puede ser reestablecida recociendo la muestra una vez más, ahora en una atmósfera oxigenada. Para este compuesto, se ha obtenido la máxima $T_c = 41$ K (-232.16 C) (a punto medio de la transición) optimizando el tratamiento de oxígeno.

Otros estudios hechos por Bell Communications sobre las propiedades superconductoras de este compuesto en función de la concentración de bismuto, demuestran que la T_c más elevada y la transición más pronunciada son para una $x = 0.15$, e independientemente AT&T determinó $x = 0.15$ como la mejor composición para superconducir. Ambos estudios están de acuerdo en que la amplitud de la transición con estos valores no excede de 1.5 K a 2 K, nadie ha reportado superconductividad estable para valores de "x" menores que 0.05 o mayores que 0.4.

2.3 Estructura 1:2:3.

En 1986, Müller estudia el compuesto $Ba_{1-x}La_{2-2x}Cu_3O_{7-2y}$ y su resistividad eléctrica para $x = 1$ y $x = 0.75$, llegando a la conclusión de que en el rango de concentración investigado, compuestos del sistema $BaLaCuO$, son metálicos a altas temperaturas.

La superconductividad sobre 30 K (-243.16 C) fué descubierta no por casualidad, sino por una investigación cuidadosamente planeada, aunque sin embargo la suerte tomó algún papel. Claude Michel y Bernard Raveau logran en 1984, en el sistema $BaLaCuO$, una T_c de 75 K (-198.16 C), preparando muestras recocidas en aire a 1273.16 K (1000 C). Se ha logrado obtener especímenes monofásicos de $Ba_{1-x}La_{2-2x}Cu_3O_{7-2y}$, con estructura del tipo K_2NiF_4 , que es la fase superconductoras, y una muestra con $x = 0.15$, mostró una resistencia cero a 23 K (-250.15 C).

Se han reportado una gran cantidad de compuestos con la composición química $RBaCu_3O_{7-2y}$, donde R es un metal de

transición, una tierra rara, con superconductividad arriba de los 90 K (-127.16°C).

La estructura 1:2:3, ha mostrado por sí misma, una facilidad para reemplazar el itrio con otros iones isoelectrónicos (escandio, lantano, neodimio, samario, europio, gadolinio, holmio, erbio, iterbio, leuterio, terbio, tulio, disprosio y praseodimio). Sin embargo, se han logrado diferentes grados de éxito: para algunos átomos, se han preparado estructuras monofásicas de 1:2:3, por ejemplo, para neodimio y samario, logrando más altas transiciones que su análogo de itrio, y logrando con praseodimio sólo una fase aislante.

La fuente de estas diferencias puede ser el factor de ordenamiento y la cantidad de oxígeno. La figura compara los modelos de difracción de rayos-x para itrio, samario, neodimio y praseodimio.

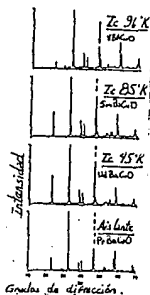


Figura 2.3.- Modelos de difracción de rayos-x para $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $\text{SrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ y $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.

La explosión de estudios experimentales en 1:2:3, se acompaña de diversos puntos de vista teóricos que tratan de dar cuenta del por qué de las altas transiciones superconductoras. Desde 1964, Little propuso que las altas transiciones pueden ser posibles a través de un modelo, involucrando polarizaciones electrónicas. Este mismo año, Ginzburg propone otro mecanismo para mejorar la T_c implicando un modelo termodinámico. (Ver sub-capítulo 3.11).

Estas y otras propuestas para mecanismos no mediados por fonones, atrajeron la atención hacia las estructuras cristalinas, pero la teoría BCS de acoplamiento mediado por fonones, dió una nueva plataforma de estudio. (Ver sub-capítulo 3.8).

El compuesto YBaCuO se le ha considerado como un regalo de la naturaleza, debido a que sus tres primeros elementos se combinan fácilmente en una relación 1:2:3 (la cantidad de oxígeno varía).

La mayoría de los materiales superconductores con cuatro elementos, pueden contener cualquier número de las llamadas "fases", cada una de las cuales tiene una diferente fórmula química y/o estructura cristalina. El compuesto de itrio 1:2:3 es único, los cuatro átomos son tan químicamente diferentes entre ellos que no se mezclan en el mismo sitio, si lo hicieran, muchas más fases se formarían y el compuesto posiblemente nunca hubiera sido encontrado.

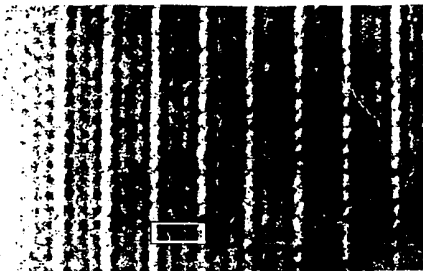
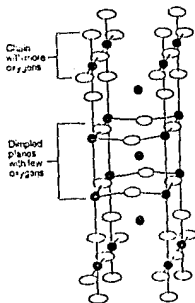
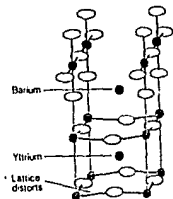
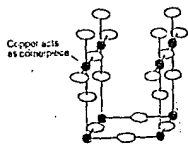
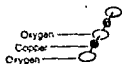


Figura 2.4.- Aumento de una muestra de $\text{YBaCuO}_{x \rightarrow y}$. Las tres líneas oscuras juntas, corresponden a átomos de bario (las oscuras) e itrio. Las líneas más claras hacen suponer carencias de oxígeno en los planos de cobre entre los planos de itrio. El recuadro blanco (cajas, 0,4 x 1,2 nm) limita la celda unitaria del cristal.

Sin duda, el más conocido de los nuevos superconductores cerámicos es el YBaCuO , cuya estructura cristalina se muestra. Los cerámicos normalmente impiden el paso de electrones, así que el por qué el material se comporta así, es el centro de

investigación, comparando sus estados superconductores y no superconductores.



Lattice extends in all directions at 90° angles

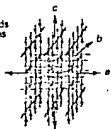


Figura 2.5.-

1.- El cristal se forma de una unión de átomos. La base de las uniones, es de átomos de oxígeno y cobre alternados.

2.- Los átomos de cobre trabajan como "esquinas" en la red a 90 grados, formando una celda tridimensional.

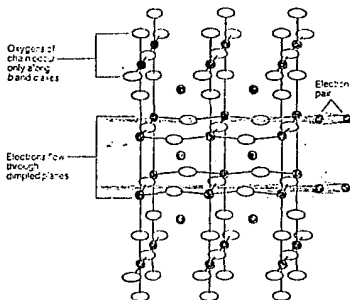
3.- Dentro de esas celdas, hay iones suspendidos de itrio y bario alternándose. Debido a que ambos tienen cargas espujan a los átomos de oxígeno más próximo, distorsionando la red.

4.- La secuencia de bario e itrio, se repite hacia todos lados. Las regiones alrededor del itrio tienen menos átomos de oxígeno y son los llamados planos distorsionados. Las regiones alrededor del bario son llamadas regiones de cadena y tienen más átomos de oxígeno.

5.- La red se extiende en todas direcciones en ángulos de 90 grados.

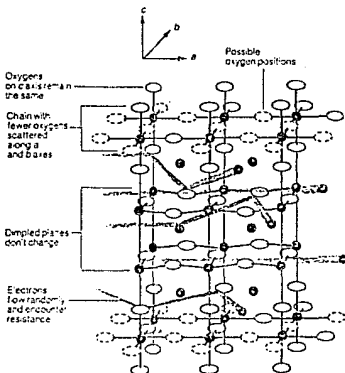
Figura 2.6.-
SUPERCONDUCCION.

Debido a su estructura, la red del YBaCuO, crea una red anisotrópica. Los electrones parecen fluir solamente a través de los planos. Y aunque ellos normalmente se repelen entre sí, parecen acercarse juntos en un proceso llamado apareamiento de Cooper. Posiblemente es la cadena rica en oxígeno la que crea condiciones que permiten a un electrón seguir a otro. Los científicos siguen buscando pistas para este extraño comportamiento, examinando el material en su estado superconductor y no superconductor.



NO-SUPERCONDUCCION.

Cuando un material no superconduce, los electrones se mueven en todas direcciones, colisionándose instantáneamente con cualquiera de los átomos de la red. Esto los va frenando, entregando energía en forma de calor (proceso llamado resistencia eléctrica). La diferencia crucial podría ser en el estado no-superconductor que algunos átomos de oxígeno en la cadena desbaratan de la red. Cualquiera que sea la causa que evita el rápido flujo de electrones, produciendo la superconductividad aún no es determinada.



La capacidad de transportar grandes densidades de corriente parece ser responsable de la orientación de los cristales en el material. Una película epitaxial delgada de $YBaCuO$ fue capaz de soportar $100,000 \text{ A/cm}^2$, y aquellas cuya mayoría de cristales tienen sus ejes largos en ángulos rectos al plano de la película, tienen los más altos niveles. De aquí se deduce que si todos los materiales pueden ser alineados en un compuesto, su capacidad de transportar corriente será muy alta.

El $YBaCuO$ es altamente anisotrópico (conduce electricidad más fácilmente en una o dos direcciones que en otras), esto parece ser debido a su estructura cristalina, la cual es ortorrómbica. Conduce electricidad predominantemente en las regiones de cobre-oxígeno, entre las capas de itrio y bario, ambas en cadenas unidimensionales y planos bidimensionales. El itrio y bario, o cualquiera de los elementos que los han sustituido, donan electrones para el acoplamiento del par de Cooper, pero por sí solos están lejos de conducir. De alguna forma, la unión del cobre y el oxígeno es crítica, pero aún no se sabe el por qué, y de alguna manera las impurezas en la estructura cerámica juegan un papel importante.

Se ha determinado que la fase superconductorá en el sistema es una perovskita deficiente de oxígeno $YBaCu_3O_{7-x}$.

Cuando un material cambia a su estado superconductor, primero la región superconductorá fuerte y después la más débil, pierden su resistencia hasta que una conexión completa pueda hacerse a través de todo el material.

Regiones no superconductoras en materiales multifásicos forman enlaces débiles que limitan la cantidad de corriente que pueda manejar el material. Los límites de grano entre los cristales, son el principal ejemplo de enlaces débiles; un monocristal de $YBaCuO$ que consista de cualquier número de celdas unitarias básicas del compuesto con átomos unidos con la misma orientación, podrá transportar mucha más corriente que el material policristalino debido a la ausencia de límites de grano.

Menos límites de grano, no es la única razón por la que películas delgadas de monocristales hayan logrado tan altas densidades de corriente. A diferencia de los superconductores antes conocidos, los cerámicos son altamente anisotrópicos, esto es, su densidad de corriente crítica varía radicalmente dependiendo de la dirección en la que la corriente fluye a través del cristal. El campo crítico también cambia dependiendo de la orientación del campo aplicado. En el plano formado, en un cristal $YBaCuO$, por los ejes a y b, puede fluir una corriente mucho más grande que a lo largo del eje c (aproximadamente 100 veces mayor). Por lo tanto, se trata de alinear los cristales de las películas para que la corriente fluya perpendicularmente al eje c.

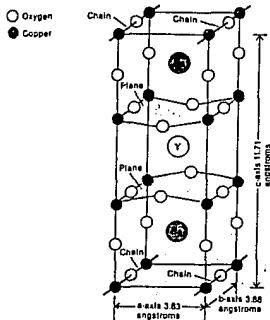


Figura 2.7.- La celda básica del cristal $YBaCuO$, contiene dos planos distorsionados de cobre y oxígeno que pueden ser el principio de la superconductividad. Cadenas de cobre y oxígeno también se encuentran como causa del fenómeno hasta el descubrimiento de la superconductividad de los compuestos de bismuto y talio, en las que no existen tales cadenas.

Existe un proceso de crecimiento de películas que aprovecha la tendencia de los cristales de la película de alinearse con los cristales del sustrato en que son depositados. Estas películas epitaxiales, son las llamadas películas orientadas o monocristalinas, mismas con las que se lograron $100,000 A/cm^2$ mostrando la inherente capacidad de transportar altas corrientes de los buidos.

2.4 Microfilielas de superconductores $YBaCuO$.

Los reportes de temperaturas superiores a $100 K (-173.16 C)$, en los cuales el material no es estable, sugieren la posibilidad de la coexistencia de diferentes composiciones en el mismo material.

En un trabajo de IFUNAM, muestras preparadas por el método convencional: la sinterización y normalado de polvos, (ver capítulo 4) con composición nominal $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, mostraron una temperatura de transición de $97.9 K (-175.25 C)$ con el punto de inflexión a $105 K (-168.16 C)$.

Se obtuvieron espectros en diferentes puntos de la muestra,

para obtener el análisis cuantitativo de los diferentes espectros.

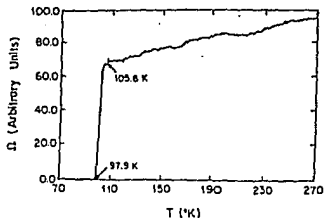


Figura 2.6.- Resistividad contra temperatura para el sistema YBaCuO.

La superficie original mostró carbón como contaminante principal, el cual es fácilmente removido por un bombardeo de iones de argón. La figura siguiente muestra el espectro de la muestra, después de remover el carbón de la superficie.

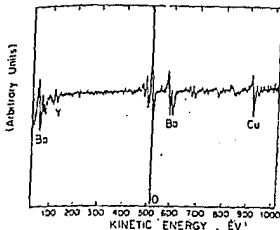


Figura 2.7.- Espectro de una muestra después de remover los contaminantes superficiales con bombardeo de argón.

Después de varios minutos de bombardeo, debido a la erosión iónica, se asegura que se han removido varias monocapas del material, pero las concentraciones relativas permanecen constantes como lo muestra la figura 2.10.

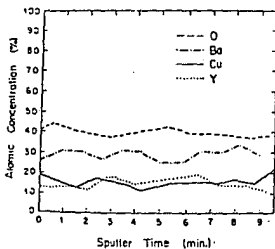


Figura 2.10.

Después se estudiaron diferentes granos de la muestra con diferente morfología, encontrando que diferente morfología corresponde a diferente composición química: granos planos facetados y granos irregulares.

Los granos de forma irregular presentan un espectro como el que se muestra en la figura 2.11. Lo más notable en este espectro es que la razón de los picos Ba:O es considerablemente mayor en comparación con la composición promedio obtenida en la figura 2.9.

En la figura 2.12 se presenta un perfil de composición en uno de estos granos, la concentración de bario está por encima de los demás elementos y es más abundante que el oxígeno.

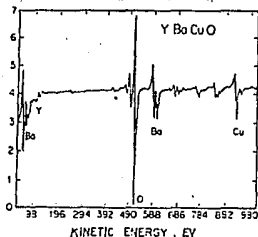


Figura 2.11.- Espectro de un grano irregular. Fase rica en bario.

La característica más común en el material con los granos facetados. En la figura 2.13 se muestra una micrografía de la muestra en donde se aprecian las dos diferentes fases. Al hacer un análisis en uno de los granos facetados (figura 2.14), se encuentra que la composición química es muy similar a la encontrada en el espectro de la figura 2.9, y muy similar a la composición de la primera zona (figura 2.15), lo que nos indica que ésta es la fase más abundante en el material.

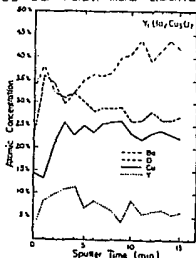


Figura 2.12.- Perfil de composición de un grano irregular.

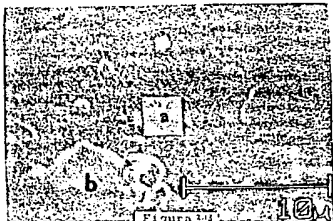
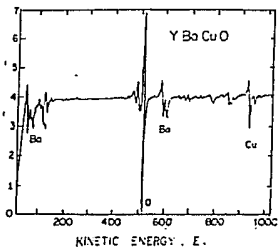


Figura 2.13.- Micrografía de la superficie de la muestra. a) Zona regular facetada. b) Granos de forma irregular.

Los resultados muestran la existencia de dos fases predominantes: Una con estructura granular, que cubre toda la superficie de la muestra con estructura granular irregular y rica en bario, lo que indica un descenso en la concentración de oxígeno y, por consiguiente, una mayor abundancia de vacancias de oxígeno en esta fase; y la otra, correspondiente a la composición nominal del material, con estructura planar bien definida (planos facetados) en los cuales la relación Ba:O permanece constante.



2.14.- Espectro de un grano plano regular facetado.

Los granos regulares facetados están cubiertos en la superficie por granos irregulares ricos en bario, esto se comprueba por el hecho de que después de un prolongado bombardeo de los granos irregulares, siempre se encuentra un grano plano regular. Esto sugiere fuertemente que el bario se segrega a la superficie formando una nueva fase que rodea a la otra más abundante, y es esta nueva fase enriquecida en bario, la que podría estar jugando un papel muy importante sobre las propiedades generales del material superconductor.

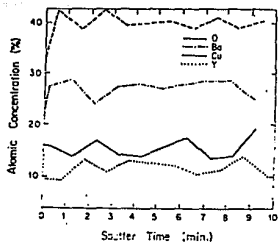


Figura 2.15.- Perfil de un grano plano regular facetado.

2.5 Características estructurales del compuesto $YBaCuO$ con impurezas de Fe.

El estudio de los superconductores cerámicos con impurezas de Fe, presenta un interés teórico en la medida en que estas impurezas no destruyen la superconductividad, y las variaciones que en las propiedades provocan estas inclusiones. Esto parece deberse a que la estructura cristalina es altamente complicada, y a que el fenómeno de superconductividad es de baja dimensionalidad, queriendo decir con esto que "no todos los electrones libres para el proceso de conducción estarían involucrados en la superconductividad".

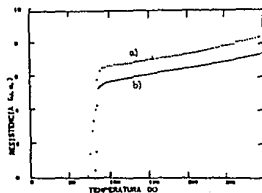
Para obtener muestras con concentraciones de Fe con $x = 0.125$ se parte de Y_2O_3 , DuO , Fe_2O_3 y $BaCO_3$, una vez molidos, mezclados y compactados a temperatura ambiente, se recocan a 1223.16 K (950 C) durante tres horas y se sinterizan a 1273.16 K (1000 C) durante otras tres horas, posteriormente se recocan una vez más a 1223.16 K (950 C) en una atmósfera rica en oxígeno, con una estancia de 4 horas, y después templando al contacto con el aire.

Para las muestras con concentraciones de Fe $x = 0.125$ y $x = 0.0625$ se usan los mismos materiales de partida y una vez mezclados se sinterizan a 1173.16 K (900 C) durante 10 horas y se recocan a 1273.16 K (1000 C) por dos horas, dejándoles después enfriarse lentamente hasta temperatura ambiente.

Las temperaturas críticas de transición superconductora T_c , medidas en curvas de resistencia contra temperatura, dependen del contenido de hierro y de oxígeno, siendo mayor la T_c para la menor concentración de Fe (ver Figura 2.16), sin así, para el compuesto con una concentración de $x = 0.125$, las temperaturas críticas puedan ser tan altas como 90 K (193.16 C).

Figura 2.16.- Variación de la T_c con la concentración de Fe.

a) $x = 0.125$ $T_c = 70 \text{ K}$ (-203.16 C)
 b) $x = 0.0625$ $T_c = 81 \text{ K}$ (-193.16 C)



Los difractogramas tomados para las muestras $x = 0.125$ muestran un incremento regular del parámetro "c" de la celda unitaria a medida que T_c disminuye y no se observa ningún cambio en el parámetro "a".

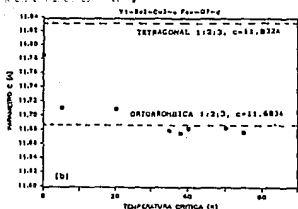


Figura 2.17.- Parámetros de la red para Fe $x = 0.0125$.

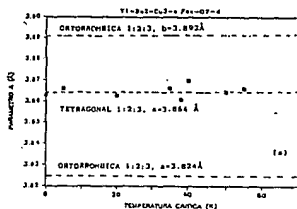


Figura 2.18.- Variación de los parámetros de la red para Fe $x=0.125$.

Para $x = 0.0625$, se observa una mezcla de fases de estructuras tetragonal y ortorrónicas, lo mismo que sucede a materiales con más impurezas de Fe, en los cuales existe una transición de la fase tetragonal a partir de cierta concentración crítica, que se ha encontrado no puede ser menor de $x=0.0625$.

De lo que se concluye que aunque la temperatura crítica de los óxidos superconductores se ve afectada por la inclusión de Fe, las cantidades toleradas son mucho mayores de las que soportan los superconductores tipo BCS. Por otro lado, se notan cambios de estructura generados por las impurezas de Fe en la perovskita original.

3 CARACTERISTICAS BASICAS

3.1 Elementos y compuestos superconductores.

La temperatura crítica de superconductores tratados hasta 1957, oscilaba en los valores de 20.05 K (-253.11 C) para una solución sólida entre Nb_3Al y Nb_3Ge , logrado por Matthias, quien había apuntado algunas regularidades en la aparición de superconductividad y los valores de temperatura crítica, las principales de las cuales son:

- 1.- La superconductividad se había observado sólo para substancias metálicas, para las cuales el número de electrones de valencia Z yacen entre 2 y 8.
- 2.- En todos los casos que involucran metales de transición, la variación de T_c con el número de electrones de valencia muestran una cresta máxima para $Z = 3, 5$ y 7 según la figura 3.1.
- 3.- Para un valor dado de Z , algunas estructuras cristalinas parecen mas favorables que otras.

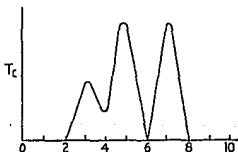


Figura 3.1.- No. de valencia de electrones /átomo.

3.2 El efecto Meissner y la reversibilidad de la transición superconductora.

Si un conductor perfecto fuera puesto en un campo magnético externo, ningún flujo magnético podría penetrar la muestra. Corrientes superficiales inducidas mantendrían el flujo interno y persistirían indefinidamente. Para la misma muestra, si un conductor "normal" estuviera en un campo externo antes de llegar a ser un conductor perfecto, el flujo interno sería encajado dentro por corrientes inducidas persistentes aún si el campo externo fuera removido.

Por esto, la transición solamente de un espécimen perfectamente conductor de estado normal a estado superconductor, no sería reversible y el estado final del espécimen dependería

de la trayectoria de la transición. Por ejemplo, las figuras 3.2 y 3.3 muestran la configuración del flujo para una esfera perfectamente conductora llevada del punto "a" de la figura 3.2 al punto "c", por las diferentes rutas: a-b-c y a-d-c, respectivamente. La distribución final del campo en c como en b, depende ya sea de la procedencia de vía b o de vía c, y la irreversibilidad de la transición es evidente.

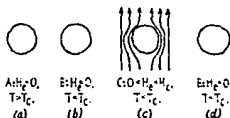


Fig.3.2

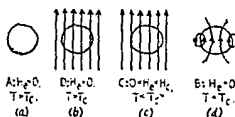


Fig.3.3

Figura 3.2 y 3.3

Las mediciones cuidadosas de la distribución del campo alrededor de una muestra esférica hechas por Meissner y Ochsenfeld (1933), sin embargo, indican que prescindiendo de la trayectoria de la transición, la situación en el punto c es siempre como muestra la figura 3.2-c: El flujo magnético es expulso del interior del superconductor y la inducción magnética B desaparece. Este es el llamado efecto Meissner, que nos muestra que la transición superconductor es reversible.

La Figura 3.4 ilustra esto, mostrando las curvas B vs. H_e , ambas para un conductor perfecto y para un superconductor, tomando el caso de una muestra cilíndrica con ejes paralelos al campo aplicado. Donde H_e es un campo externo uniforme.

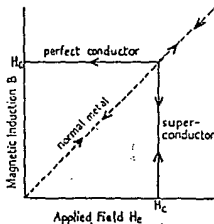


Figura 3.4

En campos crecientes, ambos especímenes tienen $B = 0$ hasta que H_e es igual a H_c , cuando se convierten en normales y B es igual a H_e . Si el campo es ahora disminuido, la inducción dentro del conductor perfecto es mantenida hasta un valor crítico $B = H_c$ por corrientes superficiales, y en tanto cero el espécimen es dejado con un momento magnético neto como lo muestra la figura 3.3-d.

El superconductor, sin embargo, expelle el flujo en la transición y vuelve reversiblemente a su estado inicial con $B = 0$ para $0 < H_e < H_c$.

La desaparición de la inducción magnética, correspondiente a la expulsión del flujo magnético es la característica básica de cualquier material superconductor ideal.

Es enteramente independiente de la forma en que se conecte la muestra, así que si uno tiene un superconductor con una perforación, el efecto Meissner ocurre en el metal, y sólo el hoyo podrá ser atravesado por un flujo magnético.

Las propiedades magnéticas de un anillo superconductor, por ejemplo, son esencialmente determinadas por el tamaño relativo del diámetro del anillo con el diámetro del hoyo.

3.3 Propiedades magnéticas.

Las propiedades magnéticas de los superconductores son muy notables. Primeramente, debe notarse que las propiedades magnéticas de los superconductores son sensitivas a los defectos estructurales de cualquier tipo. En este apartado, se contemplará solo el comportamiento de los materiales estructuralmente perfectos o ideales.

El comportamiento magnético ideal de los superconductores se divide en 2 clases: tipo I y tipo II. Los superconductores tipo I son completamente diamagnéticos, o sea $B = 0$ dentro de ellos, o en forma equivalente $M = -H$. Este comportamiento (ver figura 3.5) recibe el nombre de efecto Meissner; todo el campo magnético es excluido del superconductor.

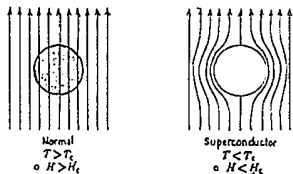


Figura 3.5.- El efecto Meissner. Cuando la muestra se vuelve superconductora, todo el campo magnético es expulsado de ella. Los superconductores tipo I ideales, se comportan de esta manera, y también los superconductores tipo II ideales con campos magnéticos bajo H_c .

La figura ilustra una complicación geométrica: cuando la muestra se vuelve superconductor, el campo se concentra a los lados de la muestra. Como resultado, es posible exceder el valor crítico a los lados de la muestra y no en las partes superior e inferior cuando ocurre esto, la muestra debe estar con una mezcla de regiones normal y superconductor, denominado "estado intermedio". El estado intermedio es completamente análogo a cualquier mezcla de 2 fases, y se puede evitar el análisis, si limitamos la descripción a la magnetización de cilindros largos paralelos al campo magnético. En las superficies de estas muestras, el campo magnético es uniforme, en consecuencia, o son superconductores (siempre menores que H_c) o son normales (campos mayores que H_c), por nunca se encuentran en un estado intermedio. El cilindro largo del tipo I paralelo al campo, excluirá completamente el campo si éste es menor que H_c , y será penetrado completamente si es mayor a H_c .

Usualmente, la magnetización del estado normal es despreciable comparada con la magnetización en el estado superconductor.

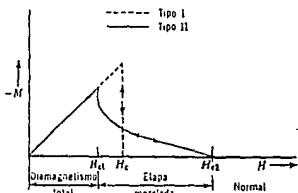


Figura 3.6.- Curvas de magnetización para superconductores tipo I y II. El área bajo ambas curvas de magnetización es la ensa.

Los superconductores tipo II se comportan en forma diferente, según indica la figura; con campos aplicados menores que H_{c1} , el material es diamagnético y en consecuencia, el campo es excluido completamente. H_{c1} recibe el nombre de campo crítico inferior. Con H_{c1} , el campo comienza a penetrar la muestra y la penetración aumenta hasta que el campo llega a H_{c2} . Con H_{c2} , la magnetización desaparece y la muestra se vuelve normal. H_{c2} recibe el nombre de campo crítico superior. La magnetización de un superconductor tipo II desaparece gradualmente a medida que aumenta el campo, en vez de abruptamente como en uno tipo I. Sin embargo, el superconductor tipo II

es completamente superconductor para todos los campos bajo H_{c2} .

Las curvas de magnetización de la figura son reversibles, sean del tipo I o II. Así, la magnetización en cualquier punto de las curvas es independiente del historial del campo y de la temperatura antes de llegar a este punto.

3.4 Profundidad de penetración.

Según London, el campo aplicado no disminuye súbitamente a cero en la superficie de un superconductor tipo I. En lugar de esto, H decae exponencialmente según:

$$H = H_0 (e)^{-x/\lambda} \dots\dots\dots (Ec.1)$$

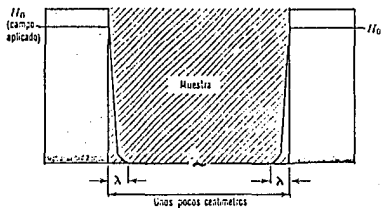
Donde, H_0 es el valor del campo aplicado en la superficie y x es la distancia hacia adentro desde la superficie, como resultado, el campo es relativamente elevado dentro de una distancia x desde la superficie.

La profundidad de penetración λ , varía de 300 a 5000 angstroms dependiendo del material. la figura 3.7 indica la penetración del campo magnetico en una muestra en bruto y en una película cuyo espesor es menor que la profundidad de penetración. En muestras ordinarias cuyas dimensiones son mayores que 5000 angstroms, la mayor parte del volumen no es penetrado por el campo, y en consecuencia $M \approx -H$. Una película delgada no demuestra el mismo diamagnetismo que una muestra de gran tamaño, pues es penetrada al menos parcialmente por el campo aplicado. La muestra se vuelve normal cuando aumenta la energía libre del estado superconductor por su diamagnetismo.

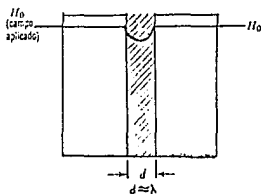
La energía libre necesaria para producir la transición es justamente el área bajo la curva de $-M$ en función de H . Como la película delgada es penetrada por el campo posee una curva mucho más aplanada de $-M$ en función de H . El área bajo la curva tiene que ser la misma que la del material en bruto, ya que se trata de las mismas fases y en consecuencia, de la misma diferencia de energía libre. Como resultado, la curva para una película delgada, se prolonga hasta campos más elevados.

Cuanto más delgada es la película, mayor es el campo crítico. Experimentalmente, el valor de H_c para las películas delgadas, es mucho mayor que las muestras en bruto.

El decaimiento del campo en la superficie de un superconductor tipo II ideal entre H_{c1} y H_{c2} es complicado, por lo que bastará recordar que si H es menor que H_{c1} , el campo penetra los superconductores tipo I y II hasta una distancia pequeña pero definida. El campo decae dentro de una distancia desde la superficie donde puede ser de varios cientos hasta varios miles de angstroms, dependiendo del material superconductor.



(a) Una muestra en bruto



(b) Una película delgada

Figura 3.7.- Penetración del campo en un superconductor en bruto y en una película delgada.

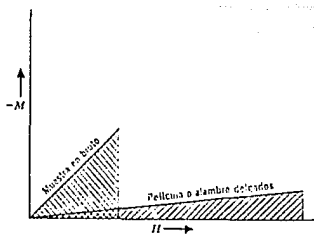


Figura 3.8.- Curvas esquemáticas de magnetización para una muestra en bruto y para una película delgada o alambre, de espesor aproximadamente igual a λ . Ambos son tipo I.

3.5 Energía superficial.

Para poder explicar el efecto Meissner en superconductores tipo I, es necesario postular una energía superficial positiva, entre las fases normal y superconductoras. Si no hubiera energía superficial entre las fases normal y superconductoras, la energía libre magnética de la muestra, podría disminuir por la formación de capas alternadas de fases normal y superconductoras, como lo indica la figura.

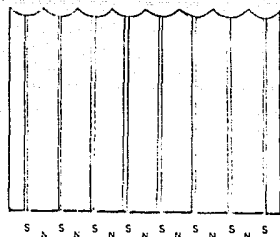


Figura 3.6.- Estructura de capas alternadas de fases superconductoras y normal de un superconductor hipotético. El espesor de las capas superconductoras es del orden de λ , pero el de las normales es menor. La muestra sólida en bruto es penetrada casi completamente, disminuyendo la energía libre de magnetización. La energía superficial positiva entre fases evitaría la situación ilustrada.

Las capas normales serían muy delgadas y de pequeño volumen, y las superconductoras tendrían un espesor del orden de la profundidad de penetración λ . El material sería entonces casi completamente penetrado por el campo magnético y la energía libre magnética, considerablemente reducida. La muestra sería todavía esencialmente superconductoras. Para explicar porqué no se produce esta situación, es necesario asumir la existencia de una energía superficial positiva entre las fases, la que es suficientemente grande para compensar la reducción potencial de la energía magnética.

Consideremos ahora la posibilidad de una energía superficial negativa en la estructura de 2 fases. En este caso, el campo penetraría la muestra fácilmente y disminuiría la energía libre de magnetización. Como resultado de la penetración de campo, el estado superconductor debería persistir entonces hasta campos magnéticos más elevados.

En 1957, Abrikosov calculó las propiedades magnéticas para un superconductor con energía superficial negativa, prediciendo

curvas de magnetización para el superconductor tipo II, como la descrita en la fig 3.6. Según la teoría de Abrikosov, el campo magnético penetra la muestra en líneas, en vez de capas. La fig 3.10 indica una configuración clásica. Las regiones normales en los centros de las líneas de flujo, están rodeadas por vórtices o remolinos de supercorrientes. Una línea de flujo junto con su vórtice de corriente se denomina flujoide, mismos que parecen fijarse en las impurezas del material.

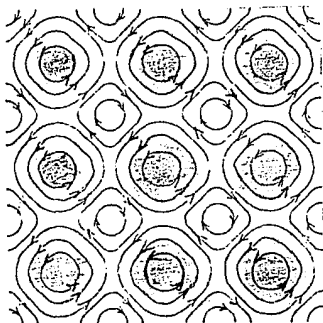


Figura 3.10.- La penetración del campo magnético en un superconductor con energía superficial negativa. El sombreado indica la intensidad de campo y las líneas, el flujo de corriente. Las líneas de flujo (que son normales al papel y centradas en los puntos oscuros), rodeadas por anillos de corriente, se denominan flujoides.

Para H_c , aparecen flujoides en la muestra, y a medida que aumenta el campo aumentan en número. Para H_{c2} los flujoides llenan completamente la sección transversal de la muestra y la superconductividad tipo II desaparece.

Películas delgadas de superconductores tipo II no se comportan en la forma bosquejada en la sección "Profundidad de Penetración" para películas delgadas tipo I. Aún cuando una película tipo II posea un espesor no mayor que la profundidad de penetración, los flujoides se mueven como siempre para adentro y hacia afuera, y las propiedades del tipo II en bruto, persisten.

3.2 Campo, temperatura y densidad de corriente críticas.

La superconductividad desaparece si se aumenta la temperatura de la muestra sobre la temperatura crítica o si se aplican un campo magnético o una densidad de corriente suficientemente elevados. El campo aplicado no deberá exceder el campo crítico H_c , y en forma similar, la superconductividad desaparece si se excede la densidad de corriente crítica J_c .

Tanto H_c como J_c dependen de la temperatura y entre sí. La figura ilustra el caso crítico en función de la temperatura para una corriente cero para 7 elementos.

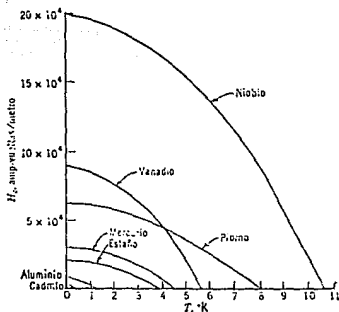


Figura 3.11.- El campo crítico en función de la temperatura para diversos elementos superconductores. El niobio y el vanadio son superconductores tipo II, los demás son tipo I.

La densidad de corriente no es una función simple de H o T ; J_c desaparece para H_c y T_c , y se espera que tienda a cero gradualmente cerca de H_c y T_c .

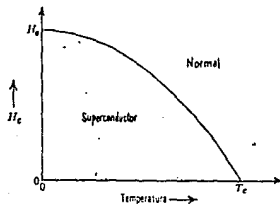


Figura 3.12.- El campo crítico en función de la temperatura.

Debajo de la temperatura crítica T_c , los superconductores exhiben un perfecto diamagnetismo, y la corriente fluye en la superficie del material; arriba de T_c se vuelven resistivos. Los materiales con comportamiento así, son llamados del tipo I (incluye la mayoría de los metales puros). Otra variedad, los llamados del tipo II, (incluye a compuestos intermetálicos y algunos metales puros) cambian a un estado intermedio, parte superconductora y parte resistiva sobre el campo crítico original, y no se vuelven completamente resistivos hasta un campo magnético más grande.

Los 3 valores críticos a los cuales la transición a superconductividad toma lugar, varían en una relación discutida a la temperatura, campo y corriente a que se expone el material. Es lo mismo para un superconductor si el campo es aplicado externamente o generado por una corriente fluyendo por él.

Por ejemplo, mientras más baja de la temperatura crítica sea la temperatura de enfriamiento de un superconductor, mayor será la densidad de corriente y campo críticos; así mismo, si una corriente pequeña fluye en el material, la temperatura y campo magnético se vuelven mayores. Lo que separa la conductividad resistiva de la superconductividad para el material en particular es, de hecho, una superficie crítica en 3 dimensiones, representando temperatura, campo magnético y densidad de corriente.

Los cerámicos tienen campos magnéticos críticos tan altos que la instrumentación de los puede medir, se estiman hasta 250 o 350 T a bajas corrientes y temperaturas.

Campos críticos y densidades de corrientes altas. típicamente van de la mano con temperaturas críticas altas; consecuentemente la densidad de corriente de los cerámicos tiene una gran importancia.

El sistema BaPb en bruto, tolera corrientes de hasta 1500 A/cm², cuando lo mantiene a 4.2 K (-268.96 C) en campos magnéticos nulos, mientras que el Nb-Sn maneja 10⁷ A/cm² bajo las mismas condiciones; además a 77 K (-196.16 C, punto de operación para sistemas enfriados por nitrógeno líquido), la corriente crítica disminuye a 400 A/cm².

Para compuestos de bismuto y talio (descubiertos en 1988), las mediciones de densidad de corriente, indican que están en la línea de los cerámicos de itrio.

Es importante tener en cuenta para determinar la T_c más elevada hay que considerar no a la T_c de un superconductor, la resistencia se reduce repentinamente, sin embargo, la transición, caracterizada en los nuevos óxidos, es más ancha. Un método conveniente para determinarla es el llamado "punto medio", que es el punto en la curva de la resistencia en la cual la resistencia se ha disminuido a la mitad del valor entre la temperatura de comportamiento normal y superconductor.

Es también muy importante saber las temperaturas a las cuales la resistencia disminuye un 10% y un 90%, respectivamente.

para obtener un estimado de qué tan anchos es la transición y saber si es simétrica la curva con respecto al punto medio, y así, conocer mejor el comportamiento del material.

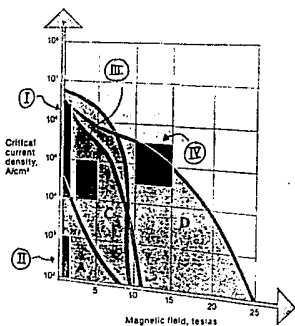
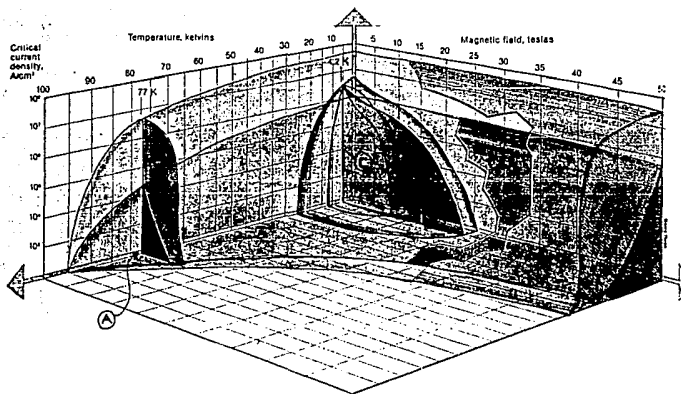


Figura 3.10.- Tres parámetros: Temperatura, densidad de corriente y campo magnético, determinan cuando un conductor pierde su resistencia eléctrica. El valor crítico de cada parámetro que marca la transición a superconductividad, varía con algún

caso en los otros dos. Por ejemplo, mientras la temperatura y campo magnético se incrementan, el valor crítico de densidad de corriente destruye. Por consiguiente, la superconductividad florece así, pero desaparece arriba. Una superficie crítica tridimensional es única para cada superconductor. En el caso de YBaCu, las superficies críticas para películas delgadas (B) y material en bruto (A) exceden los 77 K (-195.15 C), la temperatura del nitrógeno líquido. Datos de campos arriba de 30 T o corrientes, pueden ser no muy precisos, pues no se han hecho las mediciones. Las superficies críticas para superconductores tradicionales, niobio-titanio (D) y niobio-estaño (E), son más pequeñas y forzadas a operar a 4.2 K (-268.98 C), temperatura del helio líquido. Cuando los cerámicos A, E y metales C y D, operan respectivamente a 77 y 4.2 K (-195.15 y -268.98 C), son comparados para densidad de corriente y campos magnéticos; la muestra del cerámico en bruto A es inferior. Los requerimientos de campo y densidad de corriente para algunas aplicaciones, se muestran en los recuadros. La categoría I, incluye interconexiones electrónicas y detectores de resonancia magnética. Categoría II, alambres de cobre (como referencia). Categoría III, levitación magnética, generación, transmisión y almacenamiento de energía. Categoría IV, aceleradoras.

3.7 Degradación de la superconductividad.

Dentro de la serie de perovskitas del tipo $Y(x-n)M_{(n)}CuO_n$, donde M = Ba (bario) + Ca (calcio), Mg (magnesio), Sr (estroncio) o Si (silicio), se ha encontrado que la resistencia eléctrica presenta variaciones importantes a temperaturas críticas muy elevadas (200 K o -72.15 C).

La figura 3.14 ilustra la pérdida de la resistencia eléctrica alrededor de los 210 K (-63.14 C). Se presenta un mínimo a 150 K (-123.14 C) aproximadamente. Esta variación tiene un comportamiento anómalo, con respecto a la variación casi lineal de la resistencia eléctrica (R), con la temperatura de enfriamiento, que siguen algunos metales y los superconductores cerámicos del tipo YBaCuO.

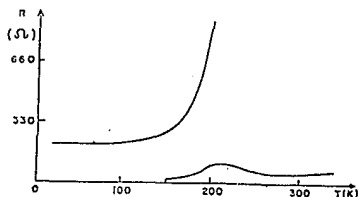


Figura 3.14.- Pérdida de la resistencia eléctrica en función de la temperatura de enfriamiento, obteniéndose un mínimo en R a 150 K (-123.14 C) aproximadamente.

Aunque R no es nula a las temperaturas mencionadas, la caída brusca indica que hay una fase parcial con características superconductoras, la cual es responsable del cambio de R , por tanto de un mecanismo de conducción, a través del cual se establece una trayectoria de conducción entre granos. Así, la existencia de fases parciales superconductoras, incluidas dentro de una matriz no superconductoras, provocaría el efecto ilustrado en la figura 3.14, es decir, la variación rápida de R hasta un valor pequeño diferente de cero.

Por otra parte, se ha encontrado que las propiedades superconductoras de algunas de las perovskitas modificadas se degradan con el tiempo o con los ciclos térmicos efectuados durante el proceso de medición de la resistividad eléctrica. En la figura 3.15, se muestra la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura de enfriamiento para una muestra cerámica superconductoras con una composición nominal $Y_{1-x}M_xCuO_4$. En el primer caso (curva 1), la temperatura crítica T_c es de 90 K (-183.16 C) aproximadamente, y para la curva 2 (segundo caso), la T_c es de 53 K (-205.16 C).

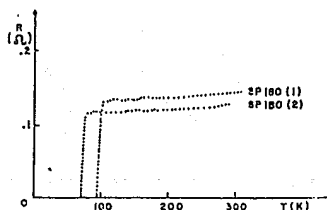


Figura 3.15.- R en función de T para la muestra $Y_{1-x}M_xCuO_4$. La curva 1 es para la muestra después de varios ciclos térmicos que se le han aplicado.

La curva 1 corresponde a la medición efectuada sobre la muestra recién sinterizada, mientras que la curva 2 está asociada a la serie de mediciones efectuadas después de varios ciclos térmicos. Así, el descenso de T_c hacia la izquierda (aproximadamente 20 K) indica claramente una degradación de las propiedades superconductoras debido a los tratamientos térmicos.

Los cambios en las propiedades eléctricas del material están relacionados con las características estructurales y composicionales de los sólidos en cuestión. En particular, la variación del contenido de oxígeno estructural está vinculado directamente a la pérdida de las propiedades anteriormente mencionadas. Por lo tanto, estos resultados indican que pro-

bablemente la pérdida de oxígeno estructural debida a los ciclos térmicos, provoca la degradación de la superconductividad.

Debe hacerse notar, que en los nuevos materiales, tanto la conductividad eléctrica como sus propiedades magnéticas, han resultado de gran interés, debido a que presentan una fuerte dependencia con la deficiencia de oxígeno en las muestras. Cuando se descubrió que la superconductividad está también presente no sólo en metales puros sino también en algunos compuestos formados por óxidos, se observó que estos óxidos eran buenos conductores a temperaturas altas, y que, para temperaturas bajas, antes de llegar al estado superconductor, la resistividad aumentaba con un comportamiento tal como el de un semiconductor. Actualmente existen estudios sobre la conductividad eléctrica y las propiedades magnéticas del óxido $YBaCuO$ para valores diferentes de la deficiencia de oxígeno (x), que básicamente se resumen en lo siguiente:

- 1).- Para muestras con " y " cercana a cero, la conductividad eléctrica sigue un comportamiento lineal como función de la temperatura hasta llegar al estado superconductor (figure 3.16-a).
- 2).- Para valores de " y " > 0 , la conductividad eléctrica como función de la temperatura, tiene inicialmente un comportamiento lineal, al bajar la temperatura la conductividad disminuye hasta llegar a una temperatura en la que la muestra se vuelve superconductora (figure 3.16-b). Debe hacerse notar que para valores de " y " > 0.5 , las muestras no son superconductoras.

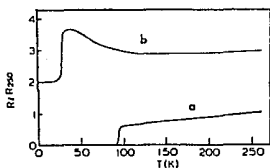


Figura 3.16-a y 3.16-b.

3.8 Teoría BCS.

Los cerámicos descubiertos, sus investigaciones y desarrollo, han llevado a parecer obsoleta la teoría ganadora del premio nobel, que parecía regir el comportamiento de la superconductividad.

La teoría clásica ha sido, sin embargo enormemente exitosa para mejorar el entendimiento y desarrollo de materiales superconductores a altas temperaturas. Es llamada "Teoría BCS" debido a las iniciales de John Bardeen, Leon Cooper y Robert

Schrieffer, quienes la desarrollaron en 1957 en la U. de Illinois, medio siglo después del descubrimiento de la superconductividad, y haciéndolos merecedores del premio Nobel en 1972.

John Bardeen consideró la visión del físico Fritz London, en los años treinta, de que los electrones superconductores están en un estado de orden muy marcado. En metales normales chocan a través de la red cristalina, pero en metales superconductores, London observó que se movían juntos siempre y absorbían cualquier resistencia a su movimiento del núcleo de la red cristalina.

Esta teoría se basa en el hecho, establecido por Cooper, de que en presencia de una interacción atractiva los electrones se acoplan en pares de momento y spin opuestos.

La teoría explica que un electrón moviéndose a través de la red, atrae iones positivos que aún lentamente los hace vibrar. Un cuanto de energía de vibración, llamado fonón, atrae otro electrón con spin magnético y momento opuestos, (spin + y spin - y momento + y momento -) en una forma tal, que se mueven en sincronía, como uno frente a un espejo. Los electrones en un par, pueden estar bastante y separados por otras moléculas, pero están "enlazados" indirectamente, (como por un resorte), así, cada movimiento de un electrón, aún un choque, es cancelado por el movimiento de su "socio".

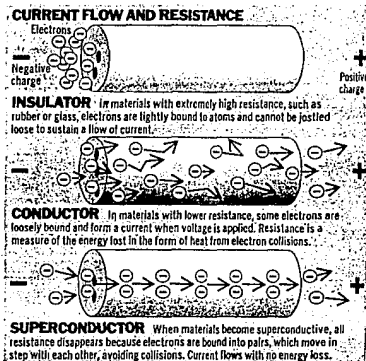


Figura 3.17.-

Además, los pares viajan en armonía con otros pares, así, sobre cualquier circunstancia, los electrones se mueven como uno solo, en un orden impresionante.

Los enlaces entre los electrones son tan tenues que permanecen intactos solo a temperaturas extremadamente bajas. Aún

un pequeño calor presta a los electrones suficiente energía para superar la atracción de los fonones, y un "desenlace" de los electrones ocurre a la temperatura crítica y elimina la superconductividad. La fuerza de interacción electrón-fonón, es mayor en materiales con temperatura de transición mas elevados; pero la BCS predice un límite superior a la fuerza de la interacción, y por lo tanto, la máxima Tc que se "podría" lograr, está entre 30 K y 40 K (-243.16 C y -233.16 C).

La Tc en la Teoría BCS depende, entre otros factores, linealmente de la frecuencia de los fonones, la cual para obtener un lazo de unión en la Tc, podría ser llevada a la frecuencia de Debye; la mas alta frecuencia de fonones en una red; pero si esta temperatura se eleva mas allá de la frecuencia de Debye, la interacción atractiva del apareamiento, disminuye. Para tales temperaturas, los electrones podrían volverse tan "pesados" que tendrían un estado parecido al "polarón".

Esto sugiere algo más que debe actuar en los superconductores óxidos para aparear los electrones. Lo que sea, requiere una nueva teoría ó una extensión de la BCS con diferente mecanismo de apareamiento de electrones; cualquiera que éste sea aún es desconocido y controversial.

Lo que parecía mas remarcable era el plano "cobre-oxígeno", encontrado en todos los superconductores cerámicos, hasta los compuestos de talio y bismuto. El sistema YBaCuO de 93 K (-178.16 C) con un átomo de itrio por cada 2 de bario y 3 de cobre (1:2:3) tiene una celda unitaria consistente en 2 planos de cobre-oxígeno emparedando al átomo de itrio y cadenas de cobre y oxígeno a cada lado de los átomos de bario (estructura análoga al mineral llamado perovskita).

La mayoría de las teorías formuladas, están basadas en el enlace peculiar entre los átomos de oxígeno y cobre. Un átomo de cobre debe donar 2 electrones para llenar la órbita exterior del átomo de oxígeno, pero en el compuesto de itrio, el cobre parece oscilar entre donar 2 y 3 en una valencia de 2.3. Posiblemente los átomos de oxígeno acepten sólo 1.7 electrones, o posiblemente la química del cobre-oxígeno, hace que el oxígeno actúe así y no el cobre.

Algunas otras teorías enfatizan más sobre el papel que desempeña el oxígeno. En los compuestos 1:2:3 el contenido del oxígeno cambia la valencia para la unión Cooper. Curiosamente el oxígeno interviene directamente en el fenómeno; con muchos espacios vacíos de oxígeno, el material no superconduce.

La mayoría de los científicos, consideran que sea cual fuere el mecanismo, está relacionado con la teoría BCS, sin embargo, se cree que el mecanismo del fonón, de los superconductores metálicos, no es el mayor contribuyente en el apareamiento de los cerámicos. Las frecuencias del fonón, varían con la masa del átomo, y por lo tanto, con un isótopo de un elemento determinado por el número de neutrones. Según la teoría BCS, con el uso de diferentes isótopos en los superconductores, cambia la temperatura de transición, en una forma predeci-

ble. Pero el uso de diferentes isótopos de oxígeno, bario y calcio en el compuesto YBaCuO no hace variar la T_c considerablemente.

3.8 Teoría de los excitones y aniones.

Dos categorías alternativas de la teoría se han propuesto: una relacionada con la BCS es el modelo de "excitones", que nos indica que pares de huecos de electrones (excitones), comparten la misma función atractiva, como los fonones lo hacen en los metales.

En 1973, David Alexander, James Bray y John Bardeen, proponen un nuevo mecanismo para la superconductividad, sugieren que en "sandwiches" metal-semiconductor, el apareamiento sobre electrones en el metal pueden ser mediados por pares de "huecos de electrones", llamados excitones, en el semiconductor. En una extensión de este mecanismo, específico para los óxidos, argumenta que el apareamiento es mediado por la transferencia de electrones de cobre al oxígeno vecino. Este argumento nace debido a que los niveles "d" del cobre son muy cercanos en energía a los niveles "p" del oxígeno, la configuración instantánea de cobre y oxígeno puede ser vista como un "excitón". El enlace es fuerte porque la distancia cobre-oxígeno es pequeña y porque la densidad del electrón es baja, por lo que otras interacciones no son considerables.

Y otro modelo parecido a BCS señala una interacción magnética como contribuyente principal.

En superconductores tradicionales, el antiferromagnetismo (la alternancia del spin del electrón, en líneas de átomos en retículos normales), no existe. En los óxidos, por otro lado el antiferromagnetismo existe en un fase aislante. Restos de ferromagnetismo aparecen en el estado superconductor, de acuerdo a estas teorías, contribuyen al fenómeno.

Este tipo de razonamiento, lleva a la conclusión de que los cerámicos son un nuevo tipo de metal, conduciendo cargas no a través de electrones sino a través de otras partículas como "bosones cargados". Aunque exista urgencia por saber a ciencia cierta el porque los cerámicos son superconductores, aún no se sabe.

3.10 Teoría de los plasmones.

Vladimir Ivasin, sostiene que la interacción del apareo en los óxidos es mediada no solo por fonones de baja frecuencia sino también por plasmones. Argumenta que la dispersión del plasma es de un sistema bidimensional, y que estos plasmones bidimensionales dan una contribución significativa a la interacción de apareo.

3.11 Teoría Ginzburg-Landau.

Tiempo después de la teoría BCS, los soviéticos Vitaly Ginz-

burg y Lev Landau, bosquejan teorías parciales, las cuales explican el fenómeno macroscópicamente pero no microscópicamente, a través de principios de termodinámica sin que aún haya sido considerada como aceptable.

Su teoría fue lograda mediante un método termodinámico. Su tratamiento permite conocer las variaciones en el orden superconductor debido al tamaño y a los efectos del campo magnético.

3.12 Conclusiones.

En 1958 Palmer Peter de MASH, junto con Mau-Yuen Wu, reportaron que una muestra de $YBaCuO_7$, dopada con óxido de plata, no solo levitaba sobre un imán, sino que se mantenía en suspensión debajo de él. La levitación, como hemos visto se debe a que el superconductor no tolera ningún campo magnético en su interior: cuando un imán se acerca, corrientes circulan sobre la superficie, creando un campo opuesto que mantiene al imán a distancia.

Según Peters, la raíz del fenómeno de suspensión es la tendencia de los óxidos a tolerar ciertos campos que penetren en su interior mientras que el flujo es fijado por impurezas.

Contaminado con un buen conductor como el óxido de plata, aparentemente refuerza el flujo en las impurezas, atrayendo a sí al imán a cierta distancia, balanceado con una fuerza de expulsión del superconductor, combinado con la gravedad.

Allen Hermann, observó en 1958, el fenómeno en algunas muestras del superconductor de óxido de talio, sin contaminar, lo que podría implicar otros mecanismos aún desconocidos.



Figura 3.13.

Lo que importa, por ahora, no es si la superconductividad se debe al apareamiento de electrones, sino que es lo que determina la interacción atractiva entre pilos y en que configuración está el par.

Existe la posibilidad de apareamientos generalizados, no solo como el considerado en la teoría BCS sino en estados de triple-spin. Es independientemente del mecanismo de enlace en los nuevos fillos, lo que tiene también gran importancia es el efecto, en las capas bidimensionales de cobre y oxígeno.

En resumen: el material superconductor posee una resistividad eléctrica cero, si no se exceden la temperatura, el campo magnético y la densidad de corriente crítica.

Los superconductores presentan dos tipos de comportamiento magnético: El superconductor tipo I ideal, excluye completamente el campo magnético hasta que excede el campo crítico. El superconductor tipo II ideal, se comporta en forma similar con campos pequeños, pero permite después una penetración gradual del campo y retorna al estado normal cuando se completa la penetración. El campo magnético no posee una discontinuidad en la superficie de un superconductor tipo I, sino que decae a cero en una distancia corta denominada profundidad de penetración. Las películas delgadas de espesor menor que la profundidad de penetración, poseen campos críticos elevados, debido a su reducida magnetización. Los superconductores tipo II no ideales, pueden llevar elevadas densidades de supercorriente en elevados campos magnéticos, debido a la presencia de imperfecciones estructurales.

4 FABRICACION

4.1 Generalidades.

Los investigadores esperan poder fabricar los materiales superconductores útiles en dos grandes áreas principalmente: electrónica y aplicaciones para grandes corrientes, como imanes y cables de transmisión. Para electrónica, la meta es depositar los materiales en películas delgadas para aplicaciones en uniones Josephson e interconexiones de circuitos integrados y películas gruesas para aplicaciones en circuitos impresos. Para aplicaciones de grandes corrientes, se requieren piezas en bruto del material superconductor en forma de alambre, cintas o toroides.

En casi todos los grupos de investigación, las películas delgadas están avanzando rápidamente, mientras que los materiales en bruto se están desarrollando mucho más lentamente.

Las películas delgadas, rociadas o evaporadas sobre un sustrato, no se ven tan afectadas por la fragilidad de los cerámicos y han demostrado corrientes críticas a 77 K (-195.16 C) tan altas como 4 MA/cm², de dos a tres veces más altas que la alcanzada por alguna muestra en bruto. Esto es debido a que las películas pueden ser procesadas para obtener las mejores proporciones en un compuesto superconductor. Los últimos compuestos se han logrado mezclando y sinterizando óxidos de cobre e itrio y carbonato o nitrato de bario, y recociendo la mezcla en presencia de oxígeno. El resultado con frecuencia contiene fases de compuesto superconductor y no-superconductor. Por ejemplo, la fase superconductora del compuesto YBaCuO, contiene átomos en relación de un itrio, dos bario y tres cobre, no obstante aún esta fase 1:2:3, contiene regiones de superconductividad débil.

4.2 Fabricación de superconductores en bruto.

4.2.1 Fabricación de compuestos BaLaCuO y SrLaCuO.

Bednorz y Muller, prepararon el compuesto BaLaCuO, mezclando la relación apropiada de nitrato de bario y óxidos de lantano y cobre y precipitando la muestra sólida.

El sólido precipitado se calentó a 1173.16 K (900 C) durante cinco horas, presionándolo en forma de pastilla a 4 Kbar y sinterizado a 1173.16 K (900 C).

Estudios de difracción por rayos X, revelaron más tarde que las muestras preparadas de esa forma consistían de tres fases: La_{1-x}Ba_xCuO₂ y con estructura perovskita, La_{2-x}Ba_xCuO_{4-y} del tipo LaNiF₄ + CuO₂.

La proporción relativa de estas fases en una muestra depende del tratamiento térmico.

Se puede determinar la composición y estructura de la fase

superconductores, refiriendo las intensidades de línea, en difractogramas de rayos X a la fracción de la muestra que sea superconductora.

Ahora, la mayoría de los laboratorios preparan muestras de $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, y $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{4-y}$, de los siguientes compuestos: La_2O_3 , CuO y BaCO_3 (ó SrCO_3).

Recientemente Paul Mackiewicz de AT&T, sugirió que el uso de fluoruro de bario como material primario, produce superconductores capaces de transportar grandes densidades de corriente, sin que se hayan reportado resultados satisfactorios oficialmente.

Los polvos son mezclados en la relación apropiada y calentados en aire por varias horas. La mezcla es enfriada y presionada como pastilla y sinterizada de nuevo entre 1173.16 K (900 C) y 1373.16 K (1100 C). Este procedimiento da como resultado un material de una fase con estructura del tipo K_2NiF_4 para x menor a 0.3.

Un recocido adicional de la muestra, algunas veces es necesario para valores más grandes de x y así mejorar las propiedades superconductoras de la muestra.

Algunos grupos han hecho monocristales de $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{4-y}$ y $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)_2\text{CuO}_{4-y}$.

Tener la concentración exacta de oxígeno es una de las dificultades que se encuentran al hacer crecer los cristales, lo cual traería mejores propiedades superconductoras. Aunque la transición en monocristales obtenida hasta ahora no es tan significativa.

Las temperaturas críticas de $\text{Ba}_x\text{La}_{2-x}\text{CuO}_{4-y}$ y $\text{Sr}_x\text{La}_{2-x}\text{CuO}_{4-y}$ dependen sensitivamente de la concentración de bario o estroncio.

Dos muestras con la misma composición química, pueden tener diferentes temperaturas críticas si estas tuvieran diferentes tratamientos térmicos. La deficiencia de oxígeno, el factor "y" en $\text{Ba}_x\text{La}_{2-x}\text{CuO}_{4-y}$, $\text{Sr}_x\text{La}_{2-x}\text{CuO}_{4-y}$ y $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, depende de la temperatura y de la atmósfera en la que los polvos se sinterizaron. El factor "y" es extremadamente difícil de controlar y debe ser optimizado para cada material y composición.

3.3 Fabricación de superconductores en bruto por aglomeración.

Los superconductores cerámicos con T_c elevada son rígidos y quebradizos, características que dificultan su aplicación en la fabricación de bobinas, alambres, etc. En un trabajo realizado por el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, que se presenta a continuación, se logra una técnica de uso común en la fabricación de compuestos cerámicos que permite la extrusión o moldeado del material, de hecho este mismo procedimiento, con algunas alteraciones, se ha utilizado

do para obtener filamentos superconductores muy delgados (20 micras) con un gran porcentaje de flexibilidad.

El método consiste en mezclar el polvo superconductor o polvos de óxido básico a base de los cuales se obtiene el material, con un polímero que posteriormente se quema. Ambas mezclas dan resultado, sin embargo, se ha observado que la mezcla más conveniente depende del polímero usado.

Los polímeros con los que se han hecho pruebas son: colioximetileno y una solución de acetato de polivinilo en agua. De estos dos, el que resulta más manejable es el último, dado que puede ser utilizado a temperatura ambiente. Es por eso que es este material con el que se han realizado más pruebas. Sin embargo, el primer, secado y extruido en caliente parece ser más prometedor.



Figura 4.1 Cinta y alambre superconductores: antes de sintetizar, la cinta (izq.) es aleable y puede ser soldada; después de sintetizar, se vuelve muy frágil. Cierta flexibilidad se ha logrado en materiales sintetizados (der.)

El método más comúnmente usado consiste en mezclar los óxidos básicos en las siguientes proporciones en peso:

óxido	65%
agua	14%
polímero	20%

Generalmente se agregan muchas cantidades adicionales de agua para facilitar la mezcla, con resultados satisfactorios. El agua sirve como vehículo para este polímero, pero su secado es lento y en ocasiones produce grietas y rupturas en la muestra durante el curado del polímero.

Así mismo, se usan a veces el material superconductor con la emulsión de acetato de polivinilo en agua. Estos polvos son obtenidos del producto de la reacción a 1223.16 K (950 C) de Y_2O_3 , $BaCO_3$ y CuO molidos hasta un tamaño de partícula entre 1 y 10 micras. En este caso, la mezcla nunca adquiere la

condensación adecuada para ser extruída. Aunque el material superconductor, reacciona con el agua. En este caso, el polivinilileno necesita ser secado. Ya que el proceso no involucra la presencia de agua. Así mismo, el polivinilileno puede mezclarse con el polvo superconductor, enfriarse y guardarse, dejando para el momento más adecuado la etapa de extrusión en caliente. A diferencia del acetato de polivinilo que debe trabajarse inmediatamente después de mezclado.

Es inconveniente agregar que el material sufre una reducción importante de volumen durante el secado del polímero y la sinterización. Si el proceso utilizara parte de los óxidos originales, entonces la reducción en volumen se debe no sólo a la eliminación del polímero y a la sinterización de los polvos, sin también a la reacción que da lugar a la estructura cristalina del superconductor. Si se mezclan los polvos de material ya superconductor, la reducción en volumen que sufre el material es menor, puesto que se elimina la reducción en volumen asociada a la reacción en estado sólido que produce la estructura superconductor.

El tratamiento térmico partiendo de los óxidos básicos, es el siguiente:

- 1) Calentamiento lento a 30 C/min hasta 573.16 K (300 C), seguido de una estancia de 15 minutos a 573.16 K (300 C), para quemar el polímero completamente.
- 2) Ascenso a 50 C/min hasta 1223.16 K (950 C), y permanencia en esa temperatura durante 6 horas, para que se lleve a cabo la reacción y la sinterización.
- 3) Enfriamiento a 60 C/min hasta 723.16 K (450 C), a esa temperatura se oxigena el material durante dos horas en una atmósfera rica en oxígeno.
- 4) Enfriamiento a temperatura ambiente.

Partiendo del polvo superconductor, las etapas en el tratamiento térmico son las siguientes:

- 1) Calentamiento lento a 30 C/min hasta 573.16 K (300 C), y 15 minutos a 573.16 K (300 C) para quemar el polímero completamente.
- 2) Ascenso a 50 C/min hasta 1223.16 K (950 C), y estancia de 2 horas para sinterizar.
- 3) Enfriamiento a 723.16 K (450 C), y oxigenación a esa temperatura durante 2 horas.
- 4) Enfriamiento a temperatura ambiente.

La figura ilustra una curva de resistencia contra temperatura de una muestra cilíndrica de aproximadamente 1 mm. de diámetro, obtenida a partir de polvo ya superconductor mezclado con acetato de polivinilo.

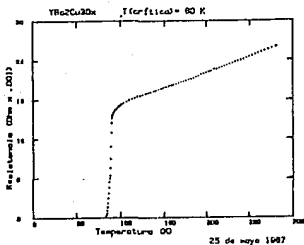


Figura 4.2 Curva de resistencia vs. temperatura para un alambre cilíndrico extruído.

A continuación se muestra una microfografía de un filamento superconductor (1 mm. diámetro), obtenido a partir de los óxidos básicos mezclados con acetato de polivinilo.



Figura 4.3 a) Superficie de un cilindro superconductor. b) Corte del mismo cilindro.

Es importante hacer notar que la muestra puede ser "parchada" con la misma especie aglomerada, sin que después del tratamiento térmico pierdan su conductividad eléctrica considerable-

El proceso descrito representa una alternativa real de fabricación de sistemas basados en superconductores de alta temperatura, desarrollada y aplicable en México. Sin embargo, faltan muchas pruebas por hacer, tanto mecánicas como de corrientes y campos críticos, así como de otros polímeros aglomerantes, obtener filamentos delgados más flexibles, incrementar la densidad de corriente y campos críticos, mejorar el diseño de soporte mecánico, de bobinas y otras geometrías y mejorar la calidad de los productos finales.

El compuesto $YBaCuO$ antes de sintetizarse tiene un tinte verdoso y no es superconductor. Al ser sintetizado y reducido en oxígeno es un superconductor de tinte negro.

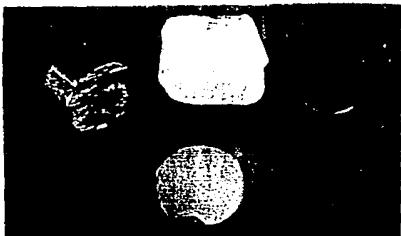


Figura 4.4 Para forjar una pieza superconductora, la mezcla de polvos (terriba itrio, bario y cobre) es verdosa (abajo), y debe ser sintetizada y reducida en oxígeno para ser un superconductor de tinte negro.

4.2.3 Crecimiento de grano y eliminación de poros.

La corriente fluye por los cristales y debe sortear la frontera entre uno y otro grano, pues hay huecos imposibles de salvar, lo cual reduce el número de trayectorias posibles. Finalmente, la corriente se satura por falta de caminos suficientes, y es por ello que la calidad y cantidad de los límites entre cristales puede ser determinante en la cantidad de corriente que puede fluir. (Ver Figura 4.5)

La idea fundamental para el desarrollo de un monocristal, se basó en el crecimiento de un solo grano. En la mezcla de itrio, bario, cobre y oxígeno, se preparó un monocristal de una micra de grosor alcanzando $100,000 A/cm^2$. Probando así que las características del material no son por sí mismas in-

pedimento para transmitir grandes flujos de corriente. Entonces, la dificultad para transmitir grandes corrientes al reactor, puede reducir en la estructura granular de densidad la manera como se transmite el flujo.



Figura 4.5 Vista microscópica de policristales.
Destácanse las fronteras entre un y otro grano.

En una cámara de ultra alto vacío se colocó titanato de estroncio como sustrato, cuya red cristalina es similar a la del material superconductor. El titanio se emplea como guía que indica a los átomos del superconductor como deben acomodarse, mientras se van depositando en forma de vapor. El proceso toma varias horas, durante las cuales el material frío se solidifica en capas monomoleculares sobre el sustrato.

En el IFUNAM, se propone una técnica más simple: puesto que los cavidades son el obstáculo al flujo de corriente, se necesitan eliminarlos, para lo cual se está desarrollando un método que es, por mucho, más económico que el expuesto anteriormente: se somete al material a muy altas presiones y temperaturas; así todos los poros, o al menos la mayoría de ellos, pueden desaparecer y aumentar la densidad del material. El principio utilizado es la difusión superficial: cuando los átomos se calientan por largos períodos se despegan, eliminando los poros y logrando además un material más resistente a la fractura, ya que los poros representan fracturas ya iniciadas. Esta es una técnica usada por la industria por los artesanos de "brucos" para fabricar cerámica de alta temperatura.

El IFUNAM sigue observando la evolución de la estructura por calentamiento y presión isotática, solididad en la fase de elaboración.

Para 1990, el IFUNAM contaba con el equipo para producir con participación isotática, capaz de comprimir las costras a 200 atmósferas; no obstante, los primeros pasos están encaminados

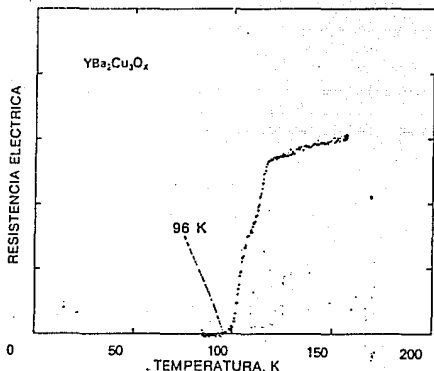


Figura 4.6 Gráfica de resistencia eléctrica vs temperatura de un material superconductor elaborado de $YBaCuO$, impreso en el IFUNAM.

Otro de los objetivos es estudiar la resistencia térmica del material para así poder incrementar la. Con la técnica antes descrita se han generado compuestos modificados más fuertes.

Un obstáculo al que se enfrentan los científicos mexicanos es la dificultad para conseguir algunos elementos con la pureza necesaria. Los elementos de la serie tierras raras (europio, itrio, lantano, cerolinio, etc.) no se producen en el país, aunque al parecer existe lantano sin extrañar en Orizaba, estos materiales tampoco se importan, por lo que no se encuentran en los laboratorios que comercializan sustancias y elementos. Afortunadamente existen algunos grupos en el Laboratorio Nacional de Fomento Industrial, en la Facultad de Química de la UNAM y en la Cámara de Fomento Químico, que tienen el encargo de investigar la disponibilidad de las materias primas para fabricar estos materiales.

2.4 Investigación de cerámicos con sustitución del oxígeno.

Trasero después de los trabajos pioneros realizados en el sistema $Ba_{1-x}La_xCuO_{2.15}$, se descubrió que otros tipos de superconductores de $T_c = 90$ K (-183.16 C), representados típicamente por el sistema $YBaCuO_{2-x}$, donde el itrio puede ser

sustituir por la mayor parte de los átomos de calcio.

Esta clase de compuestos llamados *fillos* por sus características de flexibilidad y maleabilidad, se utilizan como el elemento activo en los dispositivos de transistores de película delgada para las aplicaciones tecnológicas.

Un procedimiento típico de preparación de estos materiales, es por reacción en estado sólido.

Los reactantes típicos (CaO , CuO y BaO , con $\text{R} = \text{Y}$, Nd , Sm , La) son reaccionados con una matriz cerámica. En seguida son triturados con un mortero para obtener un polvo homogéneo, la pasta es entonces prevenida en forma de pastilla.

Método 1.- La pastilla se calcina a 1173.16 K (900 C) durante 18 horas y se sinteriza a 1273.16 K (1000 C) durante 4 horas, se enfría lentamente hasta temperatura ambiente.

Método 2.- La pastilla se calcina a 1223.16 K (950 C) durante 2.5 horas, se introduce a una atmósfera de oxígeno durante 3 horas y se sinteriza en la misma atmósfera de oxígeno durante 3 horas, se enfría rápidamente hasta temperatura ambiente.

La temperatura de transición superconductor se determina por mediciones de resistencia eléctrica en función de la temperatura $R(T)$ y se define como la temperatura para la cual $R(T)=0$, dentro de la precisión experimental, con el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, es de 10^{-7} ohms).

Las muestras preparadas se resumen en la tabla III.

Tabla III

#	Composición	Fase	Método	T_c (K)
1	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	1-2-3	1	85
2	$\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	"	"	80 (6)
3	$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	"	"	87
4	$\text{LaBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	"	"	66
5	$\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_8\text{O}_{13-x}$	"	2	90

Tabla 3.

El método 2 produce la más alta temperatura de transición. Concluyendo a este respecto se debe a la dopación. En todos los casos se obtiene un material homogéneo se puede preparar una estructura de película entre óxidos.

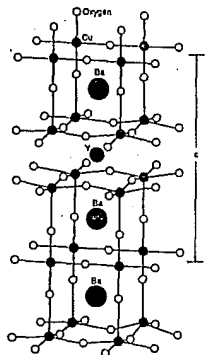


Figura 4.7 Celda unitaria de la fase superconductora 1:2:3.

El desplazamiento del oxígeno en los planos del cobre es lo que origina la distorsión ortorrómbica de la celda.

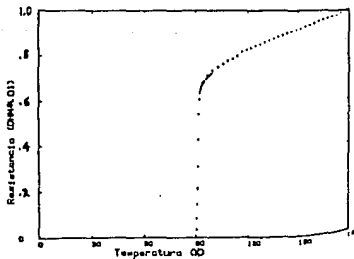


Figura 4.8 Comportamiento de la resistencia de la muestra # 3 en función de la temperatura. En muestra Tc=90 K (1-180.16 O).

Cuando la deficiencia de oxígeno es considerable, el material se transforma en tetragonal, que es una fase no superconductor.

Es claro que el comportamiento superconductor depende directamente tanto del contenido de oxígeno, como de la estructura cristalina, y los resultados confirman este hecho.

Otro método alternativo para calentar la pastilla a 1223.15 K (950 °C) de 3 a 16 horas, enfriar hasta temperatura ambiente, y enseguida se introduce en una atmósfera oxigenada con una temperatura de 673.15 K (400 °C) por 2 horas a más. Las muestras con este método tienen $T_c = 90$ K (-183.15 °C) en promedio, y son cercanas al óptimo de oxigenación.

Estos métodos han dado muestras de alta reproducibilidad y estabilidad.

4.2.5 Fabricación de superconductores por el método de fundición.

En 1967, se desarrolló en los Laboratorios AT&T un proceso para fabricar superconductores en bruto; este consiste en fundir en vez de sinterizar los óxidos aún sin preparar, y en controlar la cristalización mientras la mezcla se enfría, para producir un superconductor más denso, (más granos y menos límites) con granos localmente alineados, alcanzando de esta forma corrientes críticas a 77 K (-196.15 °C) de 17,000 A/cm² en campo magnético nulo, y 4,000 A/cm² a 1 Tesla.

4.2.6 Fabricación de alambres superconductores.

Ya que los materiales en bruto se rezagan frente a las películas, se contempla el uso de botas para la fabricación de alambres superconductores; se ha sugerido entre otras cosas, el enrollamiento de una película en forma de alambre, esta "alambre superconductor", deberá estar rodeado de un metal no superconductor (tradicionalmente cobre), para absorber las grandes corrientes por sí; el superconductor actúa como conductor normal. Los superconductores generarían mucho calor en su estado normal y se quemarían. También se sugiere que esta película superconductora sea depositada por fuera; depositada en radica gruesa, la película tendría suficiente área transversal para conducir grandes corrientes.

Otro método es el cubrir un alambre con el cerámico fundido dispersado uniformemente; sólo que, en este caso, el problema es parecido al problema de la difusión de los sustratos en la fabricación de películas. El cobre y el aluminio se oxidan en el superconductor y lo debilitan; solamente el oro y la plata no han dado muestras de reaccionar con el superconductor, pero si las temperaturas del proceso pueden bajarse para mitigar la difusión, otros metales los podrían volver útiles, ya que el oro y la plata implican, para aplicaciones en gran escala, un gasto excesivo.

Aún cuando se pudieran hacer alambres con los materiales conocidos actualmente, es difícil asegurar que puedan transportar grandes corrientes o que tengan la fuerza mecáni-

na necesaria para algunas aplicaciones. En tiempos magnéticos de los milisegundos de gases, los valores son aproximadamente el estándar de la línea trends, las pruebas realizadas son inferiores. Y un estudio comparativo de estos valores para ser útil en estos casos.

4.2.7 Importancia del oxígeno en la fabricación de superconductores.

En un procedimiento típico, Y_2O_3 , Eu_2O_3 (el óxido es muy hidrofóbico) y B_2O_3 son mezclados en una relación atómica 1:2:3. Se reaccionan con un mortero; el calentamiento se hace en crisoles de cuarzo, aluminio o platino; donde estos trabajan como un contenedor inerte mientras no se prolongue mucho el tiempo trabajando a temperaturas mayores de $1270^{\circ}C$ ($1000^{\circ}C$).

La reacción en estado sólido se lleva a cabo suavemente en un tiempo de 10 a 12 horas a $1173.15 K$ ($900^{\circ}C$). El polvo en esta etapa es enfriado y presionado en forma de pastillas, las cuales son sinterizadas calentándose a $1173.15 K$ ($900^{\circ}C$) otra vez, durante un par de horas. Si la cantidad de oxígeno es muy baja, o las muestras se sacan del horno pronto, pueden no tener las características superconductoras deseadas.

La figura muestra la sensibilidad de la transición superconductoras con el oxígeno.

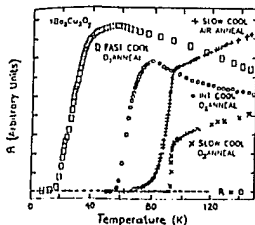


Figura 4.4 Curvas de resistencia versus temperatura, con muestras de $YBaCuO_3$, con diferentes condiciones de preparación.

Las más escarpadas y altas transiciones se obtienen cuando la muestra se calienta en una atmósfera rica en oxígeno, y se enfría lentamente a temperatura ambiente por varias horas.

Los cambios producidos en la T_c son debidos a los cambios introducidos en su estructura electrónica, y no debido a factores extrínsecos como las características granuladas de las muestras.

Preparaciones de $1:2:3$ bajo condiciones inertes, sufre inmediatamente un superconductor. Estos cambios en la estructura superconductor a $1:2:3$ son debidos a la disminución del contenido de oxígeno, haciendo la estructura tetragonal, y el incremento de oxígeno "desordena" los planos de la celda unitaria, dando un incremento a las cintas de CuO unidimensionales, que corren perpendicularmente a las capas bidimensionales de CuO en la estructura $1:2:3$, haciéndola ortorrómbica.

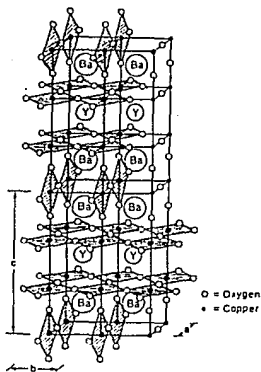
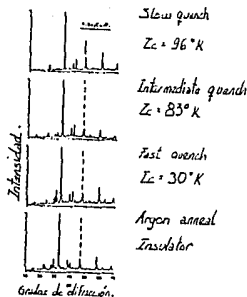


Figura 4.10 Modelo de la estructura de $(\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7)_x$, ilustrando las capas bidimensionales de CuO y las cintas unidimensionales de CuO .

La figura ilustra las redes de CuO que parecen ser esenciales para que se presente la superconductoridad, por lo tanto, el orden del CuO o en los planos, es un incremento en el carácter ortorrómbico de la celda unitaria. Debido a un estrechamiento más rápido a una menor presencia de oxígeno, la celda unitaria es más o menos tetragonal. Esta tendencia a caracterizarse tetragonal, hace ser seguida en la figura 4.11.

Las líneas de refracción entre 45° y 46° grados, reflejan cambios en las direcciones de las tres redes y muestran un cambio progresivo a un solo lado, cada vez más tetragonal, mientras el proceso de enfriamiento y la cantidad de oxígeno se varían.



4.11 Difracción de rayos X para $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ en caso diferentes condiciones de proceso.

Estos cambios se suman a la transformación estructural de alta temperatura ($900-1000^\circ\text{C}$ a 600°C aprox.) de la celos unitaria a tetragonal.

A esta temperatura la cantidad de oxígeno disminuye, por lo tanto, se debe asegurar el orden y cantidad de oxígeno en los planos unidimensionales, para evitar fallas (p.ej. una distorsión ortorrómbica más grande o la transformación a celos tetragonal). El calentamiento gradual es esencial para obtener las mejores propiedades superconductoras en muestras 1:2:3; aunque recientes descubrimientos parecen mostrar que el contenido de oxígeno no es tan relevante en el compuesto con base de bismuto.

Por lo tanto, el tiempo, la temperatura y la atmósfera de reacción, así como la composición de los elementos, son los factores esenciales en la fabricación de cerámicos superconductores capaces de transportar grandes cantidades de corriente a altas temperaturas.

4.3 Fabricación de películas superconductoras.

4.3.1 Método electroquímico.

En la búsqueda de nuevos métodos para producir superconductores de alta temperatura, son ya numerosos los científicos que participan.

Andrzej Wisniewski y Debbie J. Curran, proponen el uso de una técnica electroquímica para sintetizar películas superconductoras.

Se incorpora el bario a una película de óxido de cobre e ten-

hada sobre un electrodo de cobre: El primer paso hacia la obtención de una película laminar de material superconductor.

Se sumerge una laminita de cobre en una solución alcalina de hidróxido de bario y permitiendo que el voltaje aplicado a aquella, oscile cíclicamente entre -1.4 y 0.725 voltios, se logra que se forme sobre ella una oscura película de óxido de cobre, de unos 500 angstroms de grueso.

Al analizarla, se encuentra que contiene aproximadamente un átomo de bario por cada dos de cobre, relación muy cercana a la necesaria para lograr la síntesis de un superconductor de óxido de cobre basado en bario e itrio.

Wielkowsky y Ibravich poseían posteriormente una solución que contiene además, nitrato de itrio, pudiendo incorporar átomos de itrio y bario en la película de óxido de cobre.

Aun no se han logrado incorporar las proporciones correctas de bario e itrio, pero una vez que se establezca el proceso adecuado para conseguirlo, el material depositado electroquímicamente podrá secarse cuidadosamente, calentarse hasta una temperatura tal que adquiera sus propiedades superconductoras y luego tratarse con oxígeno para asegurar su composición correcta.

Este método electroquímico tiene la ventaja, a diferencia de otros, de proporcionar una película con los elementos necesarios, ya mezclados a nivel atómico.

Esta calidad de la mezcla puede hacer que disminuya la temperatura del calentamiento a la que tiene que someterse el material, y acortar el tiempo necesario para procesar la película y convertirla en superconductor. Sin embargo, la película resultante es muy quebradiza.

4.3.2 Proceso de deposición por evaporación e roció.

Hasta hoy, los científicos están a favor del proceso de deposición: todos los procesos que se utilizan ahora para depositar superconductores, fueron desarrollados para películas delgadas semiconductoras y metálicas: sin embargo, la vida es más fácil para los semiconductores, porque los materiales como silicio e dióxido de silicio, pueden evaporarse o rociarse de una sola fuente, y ya que los compuestos óxidos superconductores contienen tres o más elementos, la deposición se vuelve más complicada. Los elementos se evaporan o rocíanse diferentes, dependiendo de su punto de fusión y peso atómico. Para depositar una película de óxido de itronio-bario-cobre, tres crisoles, cada uno conteniendo uno de los tres elementos, deben ser calentados a diferentes promedios, pues sólo así los elementos se encontrarán en el sustrato en las proporciones correctas, los elementos también se rocían a diferentes promedios, requiriendo por lo tanto varias fuentes.

4.3.3 Características del sustrato.

Debido a que existe una interdifusión entre el sustrato y el

superconductiva, y que esta se incrementa con la temperatura de deposición, los investigadores se han esforzado a reducir los tamaños de los granos durante el proceso para lograr mejor prácticas sustrato de las películas.

General Electric, logró depositar una película delgada de YBaCuO en silicón, con 1000 A/cm^2 a 55 K (-213.16 C). Otras compañías han alcanzado resultados similares pero con menos densidades de corriente, no obstante, aún se esperan buenos resultados con sustratos de silicón, si se logra que la temperatura de deposición continúe disminuyendo.

Películas depositadas en sustrato de Al_2O_3 , muestran una temperatura crítica de ataque de 88 K a 81 K (-183.16 C a -192.16 C), alcanzando la resistencia cero de 45 K a 55 K (-228.16 C a -220.16 C). Lo que supone un gran número de defectos en la estructura. Efectivamente, estudios de la estructura revelan difusión de aluminio en las películas, dando respuesta a las T_c tan bajas.

Películas depositadas en sustratos policristalinos de BaTiO_3 y Ba_2TiO_7 , demostraron la importancia de la difusión durante el proceso de recocido: una película en sustrato BaTiO_3 muestra una T_c de ataque de 90 K (-183.16 C) y una T_c final de 62 K (-191.16 C). Sin embargo, la película Ba_2TiO_7 , muestra una T_c de ataque de sólo 73 K (-200.16 C) y una T_c final de 5 K (-269.16 C). Los estudios cristalográficos indican difusión de bario y titanio en estas películas.

La T_c con resistencia cero para películas en sustrato BaTiO_3 , es normalmente de 70 a 82 K (-203.16 a -191.16 C). La difracción de rayos X indica una estructura de granos equiaxiales en diversas proporciones. Usando sustratos de MgO , se producen películas con características parecidas a la de BaTiO_3 .

Las películas con mejor calidad han sido las logradas en SrTiO_3 . La constante de la red para $\text{SrTiO}_3 = 3.97$ angstroms en el eje "a", y es completamente favorable, considerando al $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9-x}$ con las mismas dimensiones.

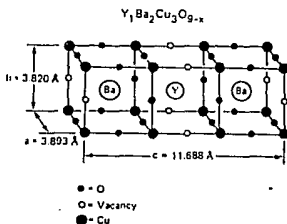


Figura 4.10 Celda unitaria ideal para $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9-x}$.

Una película relativamente epitelial, presenta el problema de que sólo es una película de un solo paso. La adaptación termodinámica a ortorrómbica, podría ser mejorada durante el recocido. La Tc más alta alcanzada por películas epitaxiales es de 11.5 K (-126.66 C).

El alto grado de control estequiométrico en este proceso, es una ventaja importante cuando se considera la manufactura.

Es muy importante considerar la producción de temperatura en el proceso. Los pasos usados para depositar cerámicos en películas, han ido de tres a dos: En el proceso original, la deposición a 523.16 K (250 C) creaba muestras amorfas de los materiales en el sustrato, el cual tenía que ser calentado a 1173.16 K (900 C) para formar la estructura cristalina 1:2:3, y entonces venía el recocido en origen a 773.16 K (500 C). Ahora, los materiales son depositados directamente en forma cristalina, guiados por el sustrato adecuado, a la temperatura de 573.16 a 773.16K (300 a 700 C), eliminando el segundo paso: estas temperaturas, se espera sigan disminuyendo, se han obtenido algunos éxitos inyectando oxígeno durante la deposición logrando algunos superconductores en un solo paso.

Un problema de fabricación que aún no tiene solución, es el hacer superconductores cerámicos que no reaccionen con la humedad atmosférica, que degrada las propiedades superconductoras. Se sugiere que cerámicos con la concentración precisa de elementos, son más resistentes.

4.3.4 Preparación de películas por rocío.

Para fabricar películas, varios laboratorios decidieron aprovechar su propia experiencia en la fabricación de pastillas sinterizadas, como una guía para la preparación de "blancos" pequeños para ser usados en procesos de deposición por rocío.

La deposición por rocío de un óxido tipo blanco, ofrece muchas ventajas de control estequiométrico, sobre otros métodos de deposición.

Preparación del blanco: Se producen los blancos de polvo presionado, para lo que se requiere un troquel o matriz de 50cm. de diámetro de acero inoxidable 18-8, que tiene la dureza requerida.

El polvo de $Y_2Ba_2Cu_3O_7$, se mezcla con el 1% de su peso en agua, molindolo con un mortero. El agua se agrega para poder utilizar los polvos, en las estructuras en los límites del troquel. Cuando un polvo compactado es sometido a una tensión uniaxial, la fuerza no es uniforme a través de todo el diámetro, resultando formaciones de fracturas. El problema se solucionaría, según se creía, agregando al polvo el 1% de algún líquido grasoso como lubricante, orientando después difícilmente en la pirólisis del ácido durante la etapa de sinterizado; obteniendo que el agua actúa suficientemente bien como lubricante y da además la ventaja de adherir el polvo presionado.

El polvo se espesa y después se quema a 1200°C K (930 °C) en presencia de oxígeno durante 12 horas. Después de sinterizarse, la muestra es completamente robusta y puede ser manejada por el usuario.

Deposición: Las películas se depositan usando el rocío reactivo del blanco de óxido sinterizado al ser bombardeado por un magnetrón en sustratos.

Durante la deposición, se utiliza un ambiente de argón y oxígeno; la relación de O:Ar, es controlada por medio de bombillas de flujo individuales para cada gas. Así, optimizar la cantidad de oxígeno logrando películas con muy buenos resultados.

Existen procesos de deposición por pulsos láser o rayos iónicos, los cuales microscópicamente "desbaratan" el material en bruto 1:2:3 y sinterizado, para la formación de películas delgadas con la misma proporción atómica del material "desbaratado".

5 USOS Y PERSPECTIVAS DE LOS SUPERCONDUCTORES.

5.1 Introducción.

Los superconductores, han despertado la imaginación de los investigadores, debido a su nula energía desperdiciada en calor por resistencia. Una línea de transmisión de energía, por ejemplo, la podría llevar de la planta al usuario con una eficiencia casi perfecta, un motor podría trabajar virtualmente sin pérdidas, un circuito integrado en una computadora con conexiones superconductores, podría operar con pérdidas de energía mucho menores que los actuales, produciendo menor calor y así permitir una mayor miniaturización de los equipos. Algunos superconductores que generan campos magnéticos intensos, pueden hacer levitar imanes, principio usado en trenes experimentales, baleros sin pérdidas por fricción, etc. Sin embargo, hasta ahora las aplicaciones se han visto limitadas a algunas aplicaciones científicas: cuando es necesaria la resistividad cero o para aceleradores de partículas para estudios específicos y algunas otras, debido al costo de mantener su baja temperatura de operación.

La investigación de superconductores y sus áreas de aplicación, son clasificadas en cuatro categorías:

- 1.- Investigación y/o manufactura de materiales.
- 2.- Alambres, cables, imanes y equipos nucleares de resonancia magnética.
- 3.- Electrónica (películas delgadas, uniones Josephson, interconexiones, computadoras, instrumentos, comunicaciones, sensores, etc.)
- 4.- Aplicaciones de alta energía (almacenamiento de energía, aceleradores de partículas, etc.)

5.2 Transmisión de energía.

Debido a que las magnitudes de energía que se transmiten se han ido incrementando constantemente, ha sido uno de los puntos que más atención ha merecido desde el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura. Las ideas que antes eran meramente atractivas, pero sin poder ser llevadas a la práctica, ahora toman más fuerza gracias al desarrollo de la superconductividad a alta temperatura. El continuo uso del aislamiento papel-aceite, nos da una idea del desperdicio existente, y la carencia de nuevos materiales para mejorar la conducción y reducir el costo.

La aplicación de la superconductividad a alta temperatura en la transmisión de energía, ha sido objeto de mucha investigación desde el descubrimiento del Nb_3Sn , capaz de superconducir una densidad de 100.000 A/cm^2 a 8.8 WB/m^2 (Tesla).

La figura muestra el aislamiento requerido para la transmisión de energía con materiales superconductores a bajas temperaturas. El avance del área de superconductividad elimina-

ria el costo del aislamiento tan ligero, sustituyendo el pro-
cedido.

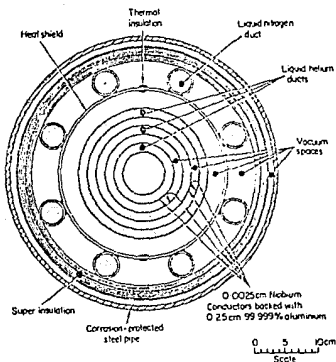


Figura 5.1.- Corte de un cable superconductor pro-
puesto para transportar 33 KV, 750 MVA.

Las líneas de transmisión de energía deberán de operar a una
santa parte de su capacidad crítica de corriente, para que las
pérdidas por AC y las fallas de corriente no lo vuelvan a su
estado normal. Para una densidad de 200,000 A/cm², la densi-
dad de corriente crítica deberá ser de 2 MA/cm². Se calcula
que usando cerámicos en líneas de transmisión, se podrá ahor-
rar un 23% (según datos del SMES) sobre un sistema supercon-
ductor de niobio-estaño.

5.3 Almacenaje de energía magnética superconductores.

La energía puede ser almacenada en un electroimán,eto consti-
tente en un cilindro o toroide con bobinas superconductoras.
La eficiencia con que puede ser recuperada la energía almace-
nada es muy alta (95%-99%). Siendo esta una de las mayores
ventajas en el área de almacenaje de energía, los electroimá-
neta pueden almacenar hasta 10.000 MW de electricidad.

Hoy en día ya están siendo desarrolladas las estaciones cen-
trales de almacenaje con cables de metales puros a bajas
temperaturas, teniendo al principio: isotópico el costo de
refrigeración; pudiendo ser la gran alternativa los supercon-
ductores de alta temperatura.

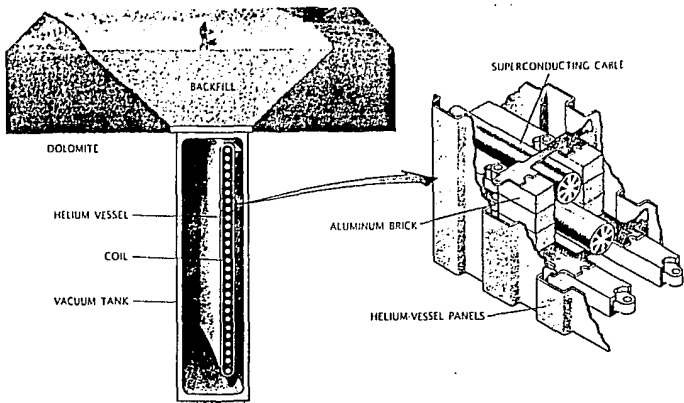


Figura 5.2.- Modelo de sistema de almacenaje de energía superconductora magnética.

Siendo ahora una viable solución en Estados Unidos el programa de "Sistema de Almacenaje de Energía" (SETEP), ha asignado un subprograma especial para la superconductividad: "Almacenaje de Energía Magnética Superconductora" (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage).

El almacenaje de energía magnética superconductora es una de las primeras aplicaciones a desarrollarse a gran escala. La Agencia de Defensa en los Estados Unidos, en 1987, pagó 14 millones de dólares por el desarrollo de un diseño con materiales a base de niobio, y se espera que a principios de la década de los 90, se contrate una compañía para fabricar un prototipo de la planta, con un presupuesto inicial de 50 millones de dólares. Sin embargo, se esperan mayores logros con los cerámicos de alta temperatura.

El SMES, consiste en alambre superconductor en forma de bobina de media milla de diámetro. La corriente circulará sin pérdidas indefinidamente, y podrá guardarse en horas en que la demanda es menor, para poder ser aprovechada en las horas pico. La corriente almacenada es DC, y deberá ser convertida a AC antes de salir a las líneas de transmisión. Los campos de carga y descarga podrán haberse en fracciones de segundo. Sin embargo, SMES deberá operar a densidades de corriente críticas cerca de 600,000 A/cm² en campos de 1.6 a 5 T.

Los cerámicos en bruto tienen aún mucho por ser investigados para ser aplicados en estos equipos, pero las películas han logrado demostrar las capacidades inherentes al material.

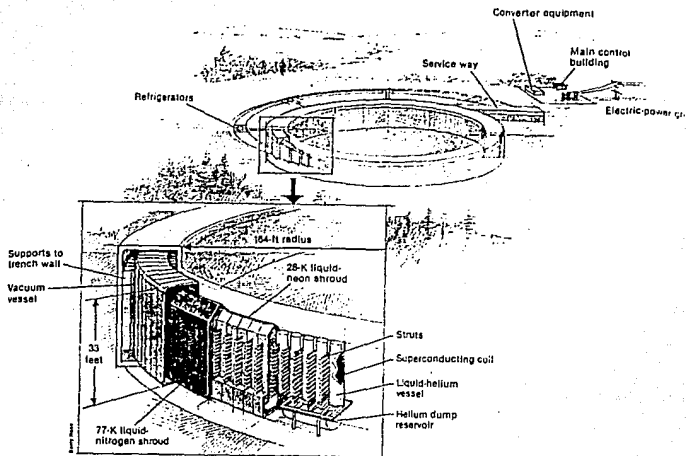


Figura 5.2.- Ya que un superconductor no ofrece pérdidas por resistencia, la corriente circulará por siempre en un anillo superconductor, principio para el almacenamiento de energía superconductora magnética. Un prototipo ha sido diseñado para el Sistema Estratégico de Defensa de los E.U.A., con superconductores de nioño enfriados con helio, neón, y nitrógeno líquidos.

5.4 Imanes superconductores.

Entre las muchas aplicaciones posibles, otra de las más útiles ha sido el solenoide de campo elevado. La producción comercial de solenoides necesita un poder 2,200,000 A/m, siguió al desarrollo del alambre superconductor tipo II no. del de Nb_3Sn y $NbZr$.

El costo de producción de un solenoide convencional capaz de producir un campo magnético de 10,000,000 A/m (100 KGauss aprox.) en un volumen de 50 cm^3 es de 10 veces que el de un solenoide superconductor embobinado con alambre de Nb_3Sn . Además un solenoide convencional como este necesita 2,000 KW de potencia y 3,300 lts/min de agua para enfriamiento, así como un espacio considerable para el equipo auxiliar, (super-

teris y sistemas de enfriamiento). Los solenoides superconductores, por otra parte, excepto poco espacio, no tienen consumo de potencia durante su funcionamiento y usa relativamente poco refrigerante de helio líquido. Aunque su uso está limitado en la actualidad principalmente a investigaciones de laboratorio, los solenoides superconductores pueden ser útiles algún día en la conversión magnetohidrodinámica de potencia y en otras áreas de ingeniería.

Si las propiedades con corriente alterna de los superconductores con campo y corriente elevados fueran tan buenas como sus propiedades con corriente continua, se podrían construir muchos equipos útiles. En un campo alterno, la histéresis magnética que acompaña al valor elevado de J_c , produce puntos locales calientes que llevan al superconductor al estado normal. Sin embargo, aún no se han llegado a producir comercialmente los transformadores, motores, generadores ni ningún aparato eléctrico similar.

5.5 Generadores superconductores.

Desde hace varios años han habido intentos de construir prototipos de generadores y alternadores de gran poder (mayores a 1000 MVA), manejando grandes campos usando alambres superconductores.

El uso de estas máquinas implica la necesidad de trabajar con el rotor a baja temperatura, misma que con el avance de la tecnología en superconductores de alta temperatura se ha incrementado, haciendo cada vez más posible la fabricación en serie. La figura muestra un corte esquemático de la morfología de un generador de AC semisuperconductor.

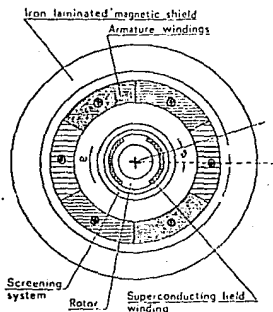


Figura 5.4.- Sección transversal esquemática sin escala de un generador superconductor a.c.

Lo más notable es la ausencia del circuito de hierro ro-

conestator y la presencia del campo y termo magnético.

Es necesario usar un escudo eficaz de reducir los efectos de corrientes electromagnéticas, esto se logra con un escudo rígido y pesado por estructura mecánica o electromagnética.

La transición de un conductor de estado superconductor a estado resistivo, puede de hecho, ocurrir, dañando al alambre, o bien una reducción de la superconductividad puede tomar parte bajo estas características.

Así que el escudo debe restringir los transitorios y, además, actuar como aislante térmico entre la temperatura de operación del rotor y la temperatura ambiente. Este sistema de escudo se logra usando dos o más cilindros hechos de material conductor fijos al rotor; la necesidad de usar al menos dos cilindros conductores de diferente material es reconocida por todos los investigadores debido a que las características eléctricas para un buen escudo magnético no son siempre las de un buen aislante térmico.

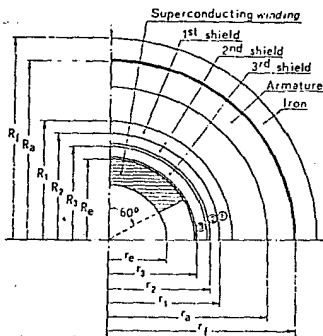


Figura 5.5.- Sección transversal de un sistema generador superconductor de a.c. 1).- Bronce; 2).- Acero inoxidable; y 3).- Cobre.

Los Trenes Magnéticos.

Uno de los puntos más tratados como beneficios potenciales de la superconducción, es sin duda alguna, el tren superveloz magnéticamente levitante, o mejor conocido como "Maglev". (del inglés magnetically levitated).

Esta es una predicción que no está muy lejos de volverse realidad, ya que los nuevos materiales superconductores prometen mayor fuerza y economía en electroimanes que los usados actualmente, ya que es el electroimán quien levanta y da propulsión a los vagones en prototipos existentes ya en Japón y Alemania (antes Democrática).

Desde 1979, un grupo japonés logró construir un maglev a base de superconductores de baja temperatura que alcanzó las 321 mph (516.6 kph), en una corrida de prueba; con 3 pasajeros logró alcanzar las 249 mph (400 kph). Esto por poco que parezca, rompió cualquier record, incluyendo el tan celebrado tren bala japonés, que viaja como máximo a 140 mph (225 kph) o al TGV francés que tiene el más rápido servicio de tren regular en el mundo, 185 mph (300 kph).

El maglev japonés es más rápido debido a que en vez de estar montado sobre rieles, éste flota 4 pulgadas (10 cm aproximadamente) sobre la guía, en un "colchón" magnético, por lo tanto, no existe fricción o temor alguno al descarrilamiento en una parte curva de la guía. El maglev cuenta con ruedas pero sólo son usadas algunas veces: cuando toma velocidad antes de elevarse a levitar, o para frenar después de aterrizar.

El principio del maglev es simple: Polos magnéticos opuestos se atraen, y polos iguales se repelen mutuamente. En el tren japonés, 8 electroimanes superconductores están construidos en los lados de cada vagón, y miles de bobinas motrices están sobre el piso de la guía. Cuando el tren está en movimiento, los electroimanes del tren inducen corrientes eléctricas en las bobinas de la guía, las cuales entonces se convierten en electroimanes. Según va creciendo la fuerza, los grupos opuestos de electroimanes repelen a los del tren y el tren comienza a flotar. Otras dos líneas de electroimanes, una en cada parte de la guía, en forma de "u", continuamente invierten polaridad para empujar o jalar a los vagones del vagón y así el tren se mueve sobre la guía.

Durante el diseño del tren, los ingenieros japoneses escogieron imanes superconductores por la sencilla razón de que a una corriente dada se requiere un poco menor campo magnético más intenso, y por lo tanto, más fuerza al levantaiento y propulsión del tren, que cualquier electroimán convencional.

La parte "clavada" en el proyecto es que el enfriador, helio líquido, que se necesita para los imanes superconductores es muy caro, y se requiere de un compresor de grandes dimensiones en cada vagón para recondensar el helio evaporado. Esto es el por que los ingenieros que trabajan en el maglev están

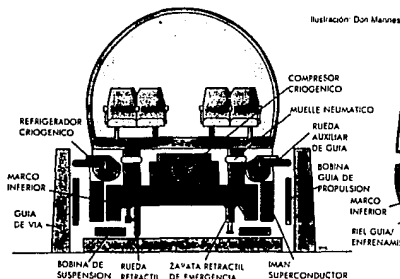
al igual que todos los científicos de esas épocas, tan interesados en la idea de tener superconductoras de alta temperatura.

Por otro lado, en Alemania Occidental, los expertos en el uso de alta temperatura no han sido tan esparcidos por los ingenieros del maglev, quienes en 1979 dejaron de usar superconductores en sus diseños. Ellos optaron por el uso de electroimanes convencionales.

El sistema alemán está basado en la atracción magnética, no en la repulsión. Los imanes están en grandes grupos a la parte de abajo del vagón que rodea la barra o guía en forma de "T". Cuando los imanes se energizan, empujan hacia la parte metálica inferior de la guía, levantando el tren. Los imanes de la pista proveen la propulsión.

Por ahora es difícil decidir cual técnica es mejor, sin embargo, consideremos que hoy es más económico el sistema alemán, aunque unas 100 mph (160 kph) más lento, seguramente cuando los superconductores de alta temperatura sean una realidad tangible, la diferencia será clara.

SISTEMA ELECTRODINAMICO (REPULSION)



SISTEMA ELECTROMAGNETICO (ATRACCION)

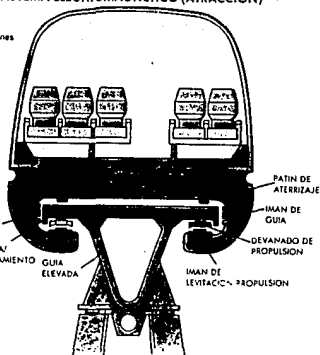


Figura 3.1.- En el tren japonés (izquierda), los imanes arriba del tren alzan, guían e impulsan al asar. En el tren alemán, (derecha), un devanado de propulsión también alza los imanes de suspensión, mientras que un conjunto separado de imanes colocados en el riel le proporciona la dirección y el enfrenamiento de emergencia.

5.7 Interconexiones electrónicas.

Para el proceso de fabricación de superconductores, son ne-

queridos temperaturas más bajas para ser compatibles con los semiconductores. Al ser realizadas tales interconexiones entre elementos semiconductores, tales interconexiones superconductoras pueden asegurar la más rigurosa protección de calor, aumentando la miniaturización de elementos y circuitos integrados.

Los materiales semiconductores cooperan óptimamente cerca de los 77 K (-195.16 C.) y no a temperatura ambiente 300 K (26 a 27 C) que es lo que se espera de los nuevos materiales superconductores, y la densidad de corriente necesaria es ya alcanzada suficientemente por las películas superconductoras.

Desafortunadamente, para que un superconductor logre su resistencia cero, debe ser procesado, y para ser depositado como película delgada se requieren de 873.16 a 973.16 K (600 a 700 C); los semiconductores, si son depositados antes que los superconductores, degenerarán al ser calentados arriba de 773.16 K (500 C). Depositando el superconductor primero, no se solucionaría el problema, ya que las propiedades de los cerámicos son sensibles a las temperaturas tibias y el ambiente al vacío en los que los semiconductores son procesados, debido a las cantidades de oxígeno requeridas por los superconductores.

Agregando además, que en la actualidad, las características de los superconductores de alta temperatura son casi igualadas por el cobre a 77 K (-195.16 C) que presenta una resistencia mínima.

La tecnología desarrollada ha sido mucho de que hablar a la prensa, que insiste en dar a conocer muchas de las posibles aplicaciones, sin considerar que el conocimiento actual en el área no es aún el necesario para desarrollar éstas en forma comercial. Se considera que ya menos se requerirán 10 años de estudios, muchos de ellos a prueba y error.



Figura 5.7.- Vista ampliada de un cristal superconductor de YBaCuO como interconexiones en un circuito integrado.

Las propiedades de los superconductores en esta temperatura están plenas, los han buscado en las zonas de los requerimientos de los circuitos que en los superconductores se dan aplicaciones de transmisión de energía, mismos que son los que llaman con más fuerza la atención del público en general. Las densidades de corriente alcanzadas por las películas delgadas son las requeridas por la electrónica; existiendo sin el problema de su comportamiento a altas frecuencias, pues al contrario que con DC, la corriente encuentra resistencia en AC, resistencia que se incrementa con temperatura, campo y frecuencia.

En los superconductores sintéticos, las pérdidas a altas frecuencias son mínimas debajo de los 77 K (-196.16 C). A frecuencias en el rango de 1 a 10 Gigahertz, se encuentran pérdidas en piezas en bruto, monocristales y películas delgadas, pérdidas mayores que el cobre arriba de 77 K (-196.16 C); pero a temperaturas menores, las pérdidas van disminuyendo hasta ser prácticamente despreciables junto con las pérdidas en cobre.

En telecomunicaciones no deben existir estas deficiencias. Se han probado muestras de YBaCuO en líneas de transmisión de datos arriba de 100 GHz, a la temperatura del helio líquido, sin mostrar ninguna distorsión. Las fibras ópticas, en comparación, están manejando datos en promedio de 10 GHz.

5.8 Uniones Josephson.

Una de las principales aplicaciones de los óxidos podrá ser, sin duda, las interconexiones entre elementos de un circuito integrado semiconductor, o entre circuitos integrados en un circuito impreso. Pero también son de considerarse las características de los superconductores para uniones de interrupción (switches).

Las uniones de túnel Josephson son una de las aplicaciones que han tenido suficiente desarrollo para lograr funciones lógicas, superando en velocidad a los transistores.

En 1962, Brian Josephson propone que si dos piezas superconductoras son separadas por una "unión débil", los electrones superconductores atravesarán esta restricción como si no existiera. La unión puede ser una pequeña porción de material no superconductor, un alambre o un sustrato microscópicamente delgado.

En 1961, se comprobó físicamente el efecto. Cuando la densidad de corriente excede la densidad crítica del material, el voltaje cae a lo largo de la barrera, "saltando" de cero a un valor proporcional a la resistencia de la barrera. Debido a que la densidad de corriente varía significativamente con pequeños cambios en un campo magnético, el estado de la unión es fácilmente controlado variando la corriente en un alambre vecino, que produce un campo magnético; así, pares de electrones superconductores atraviesan la barrera pudiendo este elemento producir dos estados que pueden representar unos y

ceros binarios.

El cambio ocurre en algunos picosegundos, haciendo las uniones Josephson los más rápidos interruptores existentes.

La principal restricción para la fabricación comercial, es debida a su incapacidad para amplificarse como un transistor. Se requiere un número mayor de uniones Josephson (elemento de dos terminales) para lograr las mismas funciones lógicas de un transistor (elemento de tres terminales). Sin considerar la dificultad que existe para fabricar las uniones con un "túnel aislante", debido al control que debe tenerse con las cantidades de oxígeno en los diferentes elementos que forman la unión.

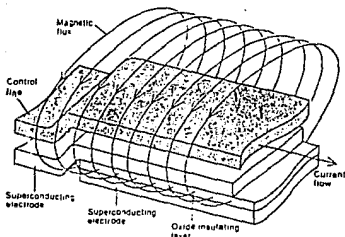


Figura 5.8.- Las uniones superconductoras Josephson, interrumpen (switchean) corriente aproximadamente cuatro veces más rápido que un transistor. El aislante delgado entre los dos electrodos superconductoras, pasa superconductividad bajo cierto valor dado de densidad de corriente crítica. Cuando un campo magnético generado por una corriente que fluye en un cable orbital disminuye la densidad de corriente crítica del superconductor, y la unión adquiere resistividad.

En embargo, va se ver fabricados SQUIDS (del inglés Superconducting Quantum Interference Device) conectando dos uniones Josephson en paralelo. Estas detectan cambios mínimos en los campos magnéticos. Estas uniones fueron hechas con la relativa construcción burda existente en la actualidad, no lográndose la sensibilidad suficiente para estos usos, pero si suficiente para medir campos magnéticos en la tierra y así encontrar minerales, petróleo, agua o fallas geológicas.

5.9. - Supercolisionador superconductor (SSC).

Este equipo del que tanto se ha hablado, es un túnel suficientemente grande para contener el equipo necesario, cubierto con un sistema superconductor de 52 miles (19000) pies, colocado bajo la superficie, dentro del cual se sostienen dos tuberías criogénicas, de 2 pies (61 cm) de diámetro cada una. El interior de cada tubería es más pequeño y conduce un haz de protones que se mantienen en su curso por imanes superconductores muy poderosos, que se encuentran rodeando el tubo. Con cada circuito del anillo, la energía de los protones en los dos tubos conductores es impulsada por un pulso de ondas de radio; en 15 minutos los protones son acelerados a lo largo del anillo, en dirección contraria, más de 7 millones de veces.

Después, compuertas electromagnéticas son abiertas, los caminos del haz de protones son cruzados. Pares de protones chocan, y parte de la energía de la colisión puede ser transferida a un promedio que por mucho excede la salida instantánea de todas las plantas de energía existentes en una región cuyo diámetro es mucho más pequeño que el diámetro de un protón. La energía que se logrará por una mínima fracción de segundo, es la concentración de energía que se calcula prevalecía en el universo después de 0.000001 segundos después del "big bang".

Nuevas partículas elementales que podrían potencializarse con tal energía, podrían mostrar como fue el origen de la masa.

El túnel, la tubería, los sistemas de operación y atención, computadoras y detectores de partículas, se cree podrán estar disponibles con la tecnología existente antes de que éste siglo termine. De hecho, un diseño básico de este equipo se ha probado en una escala de 1/20 de energía, conocido como el acelerador de partículas Tevatron, "The Fermi National Accelerator Laboratory" (Fermilab). Construido después de 30 años de experiencia en diseño y construcción de aceleradores de partículas.

Los protones son acelerados a una energía de 20 billones de electrón-volts (TeV) e inducidos a chocar. La energía de la colisión será (teóricamente) 40 TeV, o al menos 20 veces mayor a la lograda en el Fermilab. La energía máxima observable, así como la masa en un acelerador de partículas depende de los haces de partículas acelerados. El momento total de los productos de una reacción debe ser igual al momento total de las partículas reaccionantes.

El origen de la masa es un problema central para determinar las capacidades fundamentales del SSC. De hecho, muchas otras preguntas se generarán con su uso, pero de igual forma, muchos procesos físicos ahora desconocidos, serán posibles gracias al SSC.

Para entender como el SSC logrará sus características de diseño, será necesario trazar el camino de los protones a través de él, desde su fuente hasta los lugares de colisión.

En efecto, los protones son llevados por medio de un campo magnético uniforme que fuerza a los protones a seguir una semicircunferencia, mientras su energía es aumentada, así como la fuerza del campo magnético para mantener los protones en su órbita. El costo de los imanes que forman el haz es proporcional al diámetro de la región en el tipo conductor de haz en el cual se necesita un campo magnético uniforme.

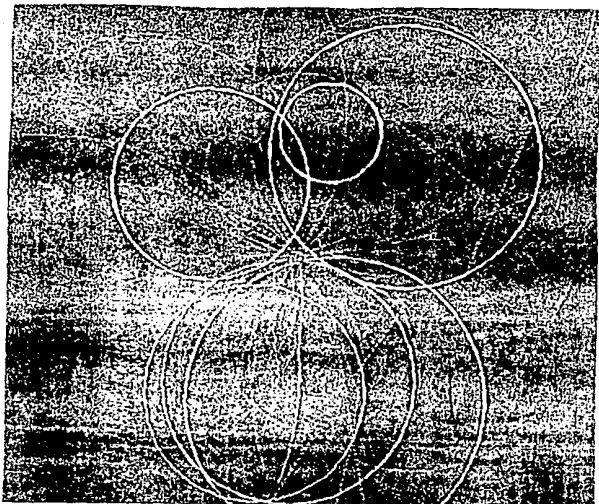


Figura 5.4.- Colisión simulada de dos protones, cada uno acelerado a la energía de 20 trillones de electron-voltios (TeV), por una lluvia de partículas aceleradas en la imagen generada por computadora.

La posibilidad de poner y enfocar el haz de partículas hacia al átomo de hierro en elemento clave en el ADN. En un principio se consideró la posibilidad de construirlo con electroimanes de cobre. Un anillo así, construido para acelerar protones a la energía de 20 TeV consumiría 4 billones de watts al menos. Llevarlo a costos de cooperación internacional; además las propiedades magnéticas del hierro y la capacidad del cobre para llevar corriente eléctrica limita los campos magnéticos a 1.7 veces de alrededor de 2 Tesla o 20,000 Gauss. (campo generado aproximadamente por cualquier motor de uso doméstico).

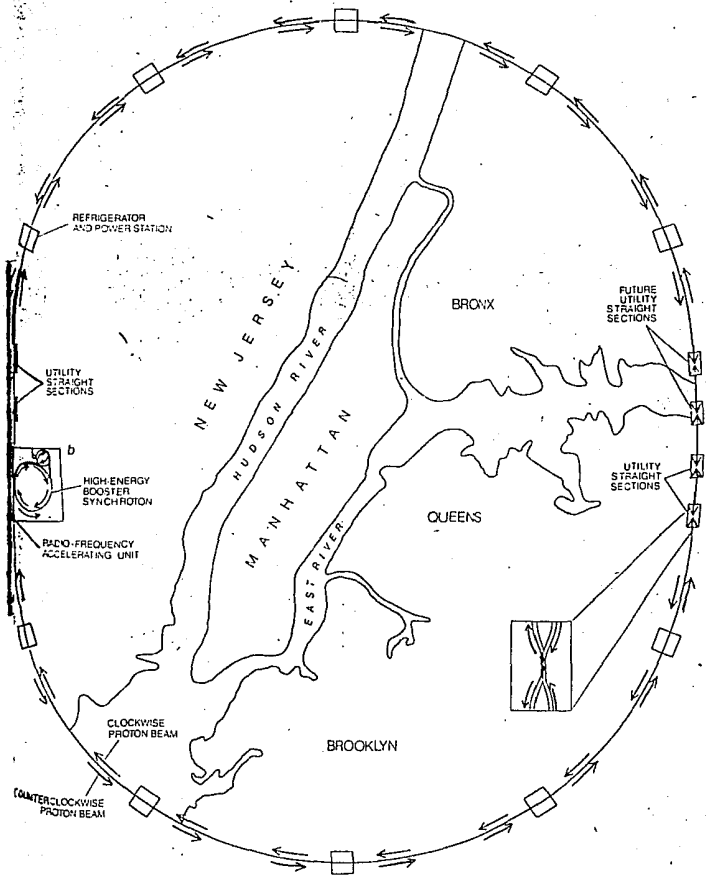


Figura 8.10 a.- Anillo principal del colisionador superconductor en el área metropolitana de Nueva York (zona azul).

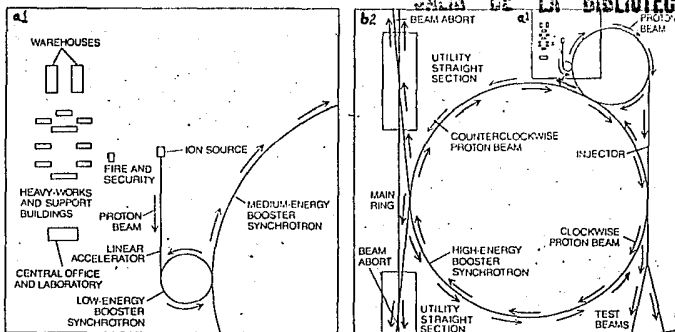


Figura 5.10 b.- Mapas esquemáticos del SSC:
a.- Oficinas centrales y complejo de laboratorios.
b.- Las series de 3 sincrotrones para acelerar los protones.

Imanes superconductores pueden minimizar ambos problemas, pueden reducir casi totalmente el gasto de consumo de energía en el sistema de aceleración, y pueden crear campos magnéticos varios veces mayores que los logrados por imanes convencionales. Un campo magnético más fuerte hace posible juntar los protones en un haz de menor diámetro para una energía dada, reduciendo el tamaño requerido por el anillo.

Con un electroimán convencional de cobre, la única energía necesaria sería la requerida para mantenerlo bajo la temperatura crítica. Los refrigerantes necesarios en el diseño del SSC, consumirían cerca de 10 millones de watt de energía haciéndolo impracticable.

El grupo de diseño decidió usar imanes superconductores con una fuerza de campo de 6.6 Tesla, fuerza que por sí sola consumiría al 20 millos (20.7 kW) del anillo principal.

Debido a que el SSC explorará un régimen de energía previamente desconocido, no es posible predecir exactamente las propiedades de los eventos por ocurrir, por lo que se intenta maximizar la variedad de detectores de partículas planeados para el diseño.

Las colisiones entre dos haces de protones serán generadas forzándolos a intersectar con cierto ángulo en algún punto determinado en el que estarán los detectores de partículas.

Se espera que con la precisión y detección de partículas se amplíe el conocimiento acerca de procesos elementales. Particularmente se espera conocer la solución al problema del origen de la vida. El SSC también generará y conducirá experimentos que se han hecho.

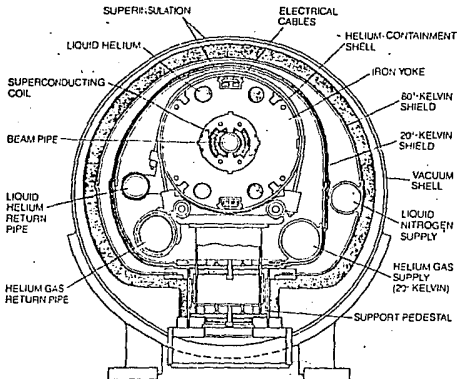
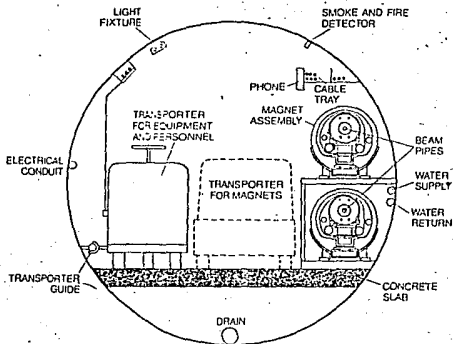


Figura 5.11.- Detalle del túnel principal propuesto para el SSC y detalle del encastre de los imanes para ser transportados al SSC.

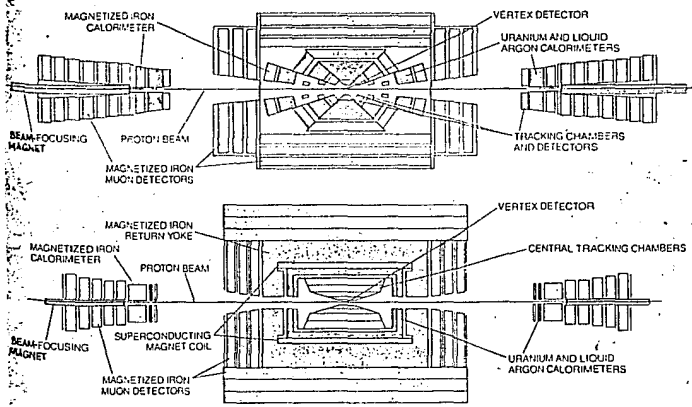


Figura 5.10.- Detectores de partículas aún por ser diseñados para cubrir completamente el espacio alrededor de la colisión de los haces de protones.

5.10 Bolómetro superconductor.

Desde 1942, D.H. Andrews ya había usado del cambio de resistencia en la transición superconductor de un metal para diseñar un bolómetro (instrumento que mide la intensidad de una radiación electromagnética, haciendo incidir sobre una lámina enfriada la radiación que se absorbe casi en un 100%). La energía absorbida se convierte en calor provocando una elevación de la temperatura, y por lo tanto una variación en la resistencia eléctrica de la lamina. El instrumento aprecia variaciones de una millonésima de grado y es utilizado por ejemplo, en astrofísica para medir la cantidad de energía emitida por las estrellas.

5.11 Resonador nuclear magnético.

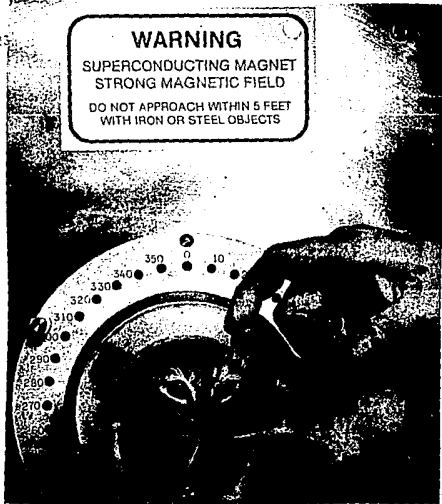
El resonador nuclear magnético o RMN, deviene como el instrumento más prometedor y eficiente en el campo del diagnóstico en medicina.

Como un planeta, el núcleo de un átomo gira sobre un eje. Al cambiar la posición general de los electrones que lo rodean, el núcleo también gira, pero en forma opuesta a los electrones. Este es el efecto que se produce cuando se aplica un campo magnético externo. El núcleo se mueve, pero al mismo tiempo también se resaca, en consecuencia, al quitar el campo magnético se cambia la posición de sus átomos. Al eliminar el campo se la polaridad magnética se logra que el núcleo se "relaje" y regrese a su posición original. El tiempo que toma esta operación es uno de los tiempos que detecta el RNM, y que tiene que ser primero en números y posteriormente en una imagen que se proyecta sobre una pantalla. El núcleo del residuo puede ser forzado a moverse, recorriendo distintos lapsos para alinearse.

Los pacientes no pueden sentir los efectos como se cree que se los medicina en los átomos de sus cuerpos, pero los médicos aún no determinan las consecuencias a largo plazo que el RNM provoca en el organismo. Hasta el momento, los investigadores no han detectado efectos secundarios agudos en los pacientes que han sido explorados con el RNM. Sin embargo, con el antecedente del retraso con que se descubrieron los daños que provocan los rayos X, los médicos no pueden garantizar que el organismo no resulte afectado por el poder de campo magnético.

Actualmente, el RNM sólo puede detectar cambios en el núcleo de hidrógeno, pero se espera que algún día pueda utilizarse a otros elementos tales como el fósforo, el calcio y el flúor, para recibir un caudal de información con respecto a la fisiología del cuerpo.

Figura 5.15



CONCLUSIONES

Para la aplicación práctica de los superconductores a la temperatura ambiente, se han desarrollado diferentes métodos de síntesis y fabricación, los cuales aún varían considerablemente, por lo que se plantea el problema de resolver entre los que podemos mencionar:

- 1.- La fragilidad de los cerámicos.
- 2.- La temperatura crítica aún es muy baja.
- 3.- La poca disponibilidad de los científicos de intercambiar información de sus experimentos.
- 4.- El desconocimiento real de las causas del fenómeno.
- 5.- Los costos de aplicación de los superconductores actuales son más caros en su fabricación y mantenimiento que el ahorro de energía que ofrecen.

Puedo afirmar, después de la investigación realizada, que si los cerámicos pueden alcanzar las temperaturas críticas cerca de la temperatura ambiente, los beneficios serán tantos, que las desventajas quedarán olvidadas; proponiendo que los costos de investigación y mantenimiento de los experimentos, pueden considerarse como una inversión, pues son las experiencias obtenidas las que con el paso del tiempo nos llevarán a dominar el fenómeno. Desgraciadamente los investigadores aún no logran las estructuras que los ingenieros necesitan para traer la superconductividad a la vida diaria, pero la revolución tecnológica no se pone en duda.

Es muy importante trabajar gobierno, universidades, laboratorios e industrias juntos, para lograr hacer de la superconductividad un beneficio social económico e industrial lo antes posible. Hoy se hace lo que se puede, sin embargo no se hace lo que se debe; se pueden llevar a cabo proyectos más ambiciosos con mayores recursos económicos, dando respuesta inmediata a los requerimientos de los investigadores, obteniendo respuestas en el área y evitando rezagos en las investigaciones. Afortunadamente nuestros grupos de investigadores mexicanos están profesional y académicamente preparados para competir con los extranjeros, y han habido ya resultados concretos y originales; agregando que, ahora que no solo en México, sino en todo el mundo, hay mucha gente brillante trabajando en la superconductividad, muchas cosas importantes que hace unos años ni siquiera eran imaginables, están muy cerca de ocurrir.

La prensa, a través de publicaciones populares, ha insistido en reportar superconductividad a temperatura ambiente con características y fenómenos que no han sido confirmados en ninguna ocasión, recurriendo al interés del lector por lo nuevo y desconocido, haciéndole creer que la superconductividad en la vida diaria es un hecho; lo que ha contribuido a la confusión, en cuanto a la situación real del fenómeno; siendo que la prensa debe ser factor de apoyo entre investigadores, universidades, gobierno y la sociedad en general.

Existe además, el problema de que no todas las aplicaciones prácticas requieren las mismas propiedades de un superconductor, lo que limita los estudios sobre un problema de aplicación específica. Sumado a que la teoría no es siempre lo que se requiere en la práctica.

"Cuando mucha gente piensa en soluciones para el mismo problema, es muy fácil esperar la respuesta en poco tiempo."

DEFINICIONES

CAMPO CRITICO (Hc). - El campo magnético sobre el cual desaparece la superconductividad.

CAMPO CRITICO INFERIOR (Hc₁). - El valor del campo cuando el flujo magnético penetra por primera vez en un superconductor tipo II.

CAMPO CRITICO SUPERIOR (Hc₂). - El valor del campo cuando la superconductividad desaparece para un superconductor tipo II.

CERAMICO. - Material esencialmente no metálico, formado por quemado o calentado, sin fundir, de polvos como materia prima.

DENSIDAD DE CORRIENTE CRITICA (Jc). - La densidad de corriente sobre la cual desaparece la superconductividad.

EFFECTO MEISSNER. - La expulsión del flujo magnético ($B = 0$) en un superconductor.

ELECTRON LIBRE. - Electrón no ligado por campos de potencial como en los átomos o moléculas.

ELECTRON VOLTIO (eV). - Trabajo realizado para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de un voltio.
 $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ julios.

ESTADO MIXTO. - La subdivisión fina de fases normal y superconductoras en un superconductor tipo II que se produce entre Hc₁ y Hc₂.

ESTADO NORMAL. - Un sólido superconductor en el estado normal presenta una resistencia eléctrica detectable.

ESTADOS INTERMEDIOS. - Una mezcla de regiones normales y superconductoras que se produce debido a campos magnéticos inhomogéneos en la superficie de la muestra.

ESTADO SUPERCONDUCTOR. - Un sólido en el estado superconductor presenta resistencia eléctrica cero.

FIJACION DE FLUJOIDES. - La atracción de los flujoídos por defectos de la red que tiende a inmovilizar los flujoídos.

FLUJOIDE O FILLO DE FLUJO. - Una región normal microscópica rodeada por corrientes circulantes en un superconductor tipo II para campos entre Hc₁ y Hc₂.

FONON. - Cuanto de energía vibracional, como los producidos por los iones en una red cristalina.

GRANO. - Cristal en el material en el cual la celda unitaria básica se repite en la misma orientación.

NIVEL DE ENERGIA ATOMICA. - Valor de energía que poseen los electrones ligados a núcleos atómicos.

NIVEL DE FERMI. - Energía de estado ocupado más rito, en la banda de energía más alta que contiene electrones en un metal a 0 K (-273.16 C).

SUPERCONDUCTOR TIPO I. - El que exhibe esencialmente expulsión completa del flujo debido a una energía superficial positiva entre las fases normal y superconductor.

SUPERCONDUCTOR TIPO II. - Uno al cual el flujo penetra parcialmente. Un superconductor tipo II se mantiene superconductor con campos aplicados superiores al campo crítico H_{c1} y menores al H_{c2} .

TEMPERATURA CRITICA (T_c). - La temperatura por encima de la cual un superconductor recupera su resistencia eléctrica normal.

TEORIA BCS. - La clásica explicación de superconductividad, presentada en 1957 por John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer.

VALORES CRITICOS. - Nivel de temperatura, campo magnético o densidad de corriente, arriba de los cuales el material deja de superconducir.

BIBLIOGRAFIA

THE INSTITUTE (New Supplement of the Institute of Electrical and Electronics Engineers) Vol. 12, No. 12.

INFORMACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA, Vol. 9, No. 130.

INFORMACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA, Vol. 9, No. 134.

CIENCIA Y DESARROLLO, Vol. XIV, No. 83.

ELECTRIC POWER SYSTEMS.

ENERGY STORAGE SYSTEMS.

I.E.E.E. SPECTRUM, Mayo 1988.

PHYSICS TODAY, Abril 1987.

DISCOVER, Agosto 1987.

DISCOVER, Enero 1988.

PREPARATION AND PROPERTIES OF ITTRIUM BARIUM COPPER OXIDE. BULK AND THIN FILM SUPERCONDUCTING. IPM, Almaden, San José Cal., 1988.

ENCICLOPEDIA DE LA CIENCIA Y LA TECNICA, Ediciones Nauta, S.A. 1979.

PROGRESS IN HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 20, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1989.

SUPERCONDUCTIVITY, E.A. Lynton, Septiembre 1987, 5a. Edición.

SCIENTIFIC AMERICAN, Febrero 1989.

MUNDO CIENTIFICO, Vol. 6, No. 55.

MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico., 8a. Edición, Vol. 1, 2 y 3, McGraw Hill.