



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROPIEDAD DE LA FACULTAD
DE QUÍMICA DE LA U. A. Q.

“APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD”

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

PATRICIA OLVERA VALERIO

DIRIGIDA POR

Dr. JOSÉ DE JESÚS CORONEL HERNÁNDEZ

FACULTAD DE
QUÍMICA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2006



BIBLOTECA

Indice

TRABAJO TEÓRICO

Introducción	3
1. Fundamentos Teóricos	4
1.1 Superconductividad	4
1.1.1 Clasificación de los superconductores	6
1.1.2 El efecto Meissner	7
1.2 Aplicaciones de la Superconductividad	8
1.2.1 La producción de campos magnéticos	8
1.2.2 Cables superconductores	10
1.2.3 Sistemas Inductivos de almacenamiento de energía	12
1.2.4 Aplicaciones en la electrónica	12
1.2.5 Uso actual de los superconductores tradicionales	13
1.3 El material YBaCuO	13
1.4 Métodos de procesamiento	15
1.4.1 Reacción en estado sólido	15
1.4.2 Polvos precursores	15
1.4.3 Molienda	16
1.4.4 Formación del cuerpo "en verde"	16
1.4.5 Densificación	17
1.4.6 Tratamiento Térmico	17

TRABAJO PRÁCTICO

2. Diseño Experimental	
2.1 Polvos precursores	19
2.2 Molienda	21
2.3 Recocido	21
2.4 Formación del cuerpo "en verde".	22
2.5 Sinterización	22
2.6 Tratamiento Térmico	22
2.7 Análisis de composición	23
2.8 El efecto Meissner	23

3. Resultados	23
3.1 Molienda	23
3.2 El efecto Meissner	25
4. Discusión de resultados	26
5. Conclusiones	27
6. Bibliografía	28
Anexo I	29

TRABAJO TEÓRICO

Introducción

Los cerámicos son materiales ampliamente utilizados en la actualidad, ya que tienen propiedades que permiten aplicarlos en una gran variedad de campos

La superconductividad es un fenómeno que ocurre en ciertos materiales cerámicos a muy baja temperatura, caracterizados por la total ausencia de resistencia eléctrica y la generación de un campo magnético interior.[Pern05] La temperatura es un factor crítico para inducir un material a este estado, ya que los materiales deben ser enfriados hasta casi el cero absoluto; las temperaturas más altas a las que se han fabricado cerámicos superconductores, aplicando grandes presiones, no son mayores a 160 grados absolutos; aunque actualmente se han encontrado temperaturas más altas, incluso cercanas a la temperatura ambiente, pero en condiciones muy inestables, que lo hacen prácticamente imposible de reproducir o de utilizar. [Pern05][Musk90]

El efecto Meissner permite imaginar la gran variedad de aplicaciones y desarrollos tecnológicos que se pueden alcanzar con la superconductividad, además de que se podrían ahorrar grandes cantidades de tiempo y dinero en comparación con los procesos actuales.

En veinte años más, los trenes levitados magnéticamente serán una realidad cotidiana, los "scanners" de resonancia magnética nuclear estarán en todos los hospitales, los dispositivos superconductores (como los sensores magnéticos o "SQUID") serán parte habitual de computadoras, instrumentos médicos, amplificadores y de todo tipo de equipos electrónicos.

El propósito de este trabajo fue fabricar un material cerámico, utilizando el método de reacción en estado sólido, que permitiera observar la transición al estado superconductor a la temperatura del nitrógeno líquido. El material objeto de este estudio es un compuesto óxido llamado YBaCuO.

1. Fundamentos Teóricos

1.1 Superconductividad

La superconductividad está definida como la capacidad de un material para transmitir corriente eléctrica con cero resistencia y cero pérdida de poder.[Musk90] Los materiales no superconductores presentan cierta resistencia a todas las temperaturas, un superconductor no, porque en éstos materiales, al ser enfriados hasta cierta temperatura, la resistencia cae abruptamente desde un valor finito hasta cero. En algunos materiales nuevos, la caída de resistencia no es tan radical.

Existen tres parámetros críticos que definen el estado de superconductividad en los materiales:

- a) *Temperatura crítica (T_c)*, a la cual el material cae en una fase de transición del estado de resistividad eléctrica normal al estado superconductor, en el que no muestra resistencia eléctrica. A continuación se listan las temperaturas críticas de algunos elementos y compuestos.

Cuadro 1: Temperaturas críticas. Tomado de ASM Handbook Vol.2, 1991

Sustancia	T_c (K)	Compuesto	T_c (K)
Ti	0.39	V3Ga	15.00
Al	1.19	Nb3Sn	18.3
In	3.40	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	77.7
Nb	9.46	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125.2

- b) *Campo magnético crítico (H_c)* arriba de este campo magnético la superconductividad desaparece.
- c) *Densidad de corriente crítica (J_c)* arriba de la cual la superconductividad desaparece.

Hay algunas características de los materiales superconductores que no cambian con la transición al estado superconductor, entre ellas se pueden señalar las siguientes:

- a) El patrón de difracción de los rayos X no cambia. Esto indica que no hay cambio en la simetría de la red cristalina. Tampoco hay cambio en la intensidad del patrón de difracción, lo que supone que prácticamente no hay cambio en la estructura electrónica. [Musk90]
- b) No hay cambio apreciable en las propiedades ópticas del material, aunque estas usualmente están relacionadas con la conductividad eléctrica.
- c) En ausencia de un campo magnético aplicado sobre la muestra, no hay calor latente en la transición.
- d) Las propiedades elásticas y de expansión térmica no cambian en la transición.

Por otro lado, hay otras propiedades que cambian en la transición al estado superconductor como:

- a) Las propiedades magnéticas cambian radicalmente. En el estado superconductor puro prácticamente no hay penetración de flujo magnético en el material.
- b) El calor específico, que cambia discontinuamente a la temperatura de transición. En presencia de un campo magnético se produce también un calor latente de la transformación.
- c) Todos los efectos termoeléctricos desaparecen en el estado superconductor.
- d) La conductividad térmica cambia discontinuamente cuando se destruye la superconductividad en presencia de un campo magnético. [ASM91]

1.1.1 Clasificación de los Superconductores

Tomando en cuenta su magnetización contra el campo magnético al que están expuestos, se consideran dos tipos de comportamiento para los materiales superconductores:

- *Superconductores Tipo I*: son materiales simples en los que el campo magnético crítico tiene solamente un valor desde el cual comienza el “estado normal” y son llamados Superconductores de Baja Temperatura.

- *Superconductores Tipo II*: la corriente eléctrica solo puede fluir en la capa superficial exterior del material conductor. Son materiales que pueden estar sujetos a campos magnéticos externos mucho más altos y permanecer en el estado superconductor, por lo que son mejores conductores de corrientes eléctricas que los Superconductores del Tipo I.

La transición sucede en un modo progresivo entre un rango máximo y mínimo de campo magnético (estado mixto), presentado dos campos magnéticos, por lo tanto, la exclusión de un campo magnético es diferente. [Lee94][Pern05]

Bednorz y Mueller descubrieron la superconductividad a altas temperaturas (HTSC, por sus siglas en inglés *High Temperature Superconductivity*) en 1985, con el compuesto YBaCuO, ganando el Premio Nobel en 1987.

Es importante señalar que, aunque parece raro, Alta Temperatura significa hablar de temperaturas arriba del punto de ebullición del nitrógeno líquido, 77.4 K.

El descubrimiento de materiales superconductores cerámicos con una elevada temperatura crítica hace aún más atractiva la idea de la utilización de materiales superconductores, así por lo menos ya no se requerirá enfriar a temperatura de helio líquido, bastará con la refrigeración que proporciona el nitrógeno líquido.

1.1.2 El Efecto Meissner

Es un efecto macroscópico de repulsión que sucede cuando el campo magnético comienza a penetrar el material, pero permanece excluido de las regiones superconductoras. [Pern05]

Meissner y Ochsenfeld observaron que al enfriar un superconductor por debajo de la temperatura crítica en presencia de un campo magnético uniforme (menor al campo magnético crítico) las líneas existentes del flujo magnético dentro del material, son expulsadas repentinamente.

Un superconductor es considerado un diamagnético perfecto, de acuerdo a lo descrito por Faraday referente a que la expulsión de un campo magnético externo define a un material para ser diamagnético.

Bajo este efecto, al enfriar un superconductor, un pequeño magneto será repelido (levitado), considerando que se deben cumplir ciertas condiciones.

- La fuerza de repulsión debe exceder el peso del magneto.
- La resistencia del campo magnético aplicado no debe exceder el valor del campo magnético crítico del superconductor.
- El magneto también generará un campo magnético, por lo que el magneto y el superconductor pueden repelerse mutuamente.
- Debido a que el material se encuentra en estado de superconductividad, la corriente fluirá indefinidamente hasta que el material pierda el estado superconductor.
- En algunos casos, el magneto que está levitando no desliza el material superconductor, recibiendo el nombre de efecto de flujo obstruido.

1.2 Aplicaciones de la Superconductividad

Existen ciertas propiedades que se requieren en los superconductores para poder hacerlos comerciales:

- La mayor temperatura crítica posible para reducir los costos por refrigeración.
- El mayor campo magnético crítico posible para que sea mayor el campo magnético que se va a generar.
- La mayor densidad de corriente crítica posible para reducir la cantidad requerida de material superconductor y también la cantidad de material que debe refrigerarse.
- La mayor estabilidad posible, debido a que los cambios repentinos de corriente, temperatura o incluso la degradación del material con el tiempo, generan inestabilidad.
- Facilidad de fabricación, ya que un material que no se puede fabricar fácilmente en grandes cantidades puede resultar inútil.
- Costo mínimo, ya que siempre es el factor más importante.

1.2.1 La producción de campos magnéticos

Actualmente existen algunos métodos alternativos que emplean campos magnéticos, pero que si aplicaran la superconductividad, se obtendría un ahorro considerable en costos de operación; en otros casos, la superconductividad ha hecho la idea una realidad.

- a) Aplicaciones biológicas: los electroimanes superconductores se han utilizado para generar campos magnéticos intensos y estudiar sus efectos en el crecimiento de plantas y animales.

- b) Aplicaciones químicas: los campos magnéticos pueden cambiar las reacciones químicas y ser utilizados en la catálisis.
- c) Aplicaciones médicas: los campos magnéticos ya han sido aplicados para arreglar arterias, sacar tumores y sanar aneurismas sin cirugía. También se estudia la influencia de los campos magnéticos en las funciones vitales del cuerpo humano.
- d) Levitación: la idea es hacer el transporte masivo, rápido y económico. Se pretende utilizar una fuerza magnética para hacer “flotar” vehículos de transporte. Para conseguir la levitación se pueden seguir dos métodos, uno mediante la utilización de un sistema atractivo y el otro con un sistema repulsivo. [Pern05]

Ya se han construido en Japón, Alemania, Francia, China y Estados Unidos prototipos de trenes que levitan magnéticamente y pueden alcanzar grandes velocidades sin rozar los rieles. En China, el primer tren comercial llamado *Maglev (Magnetic Levitated)* fue puesto en operación cubriendo un recorrido entre centro de la Ciudad de Shanghai y el Aeropuerto Pudong. El proyecto fue suspendido debido al alto costo.

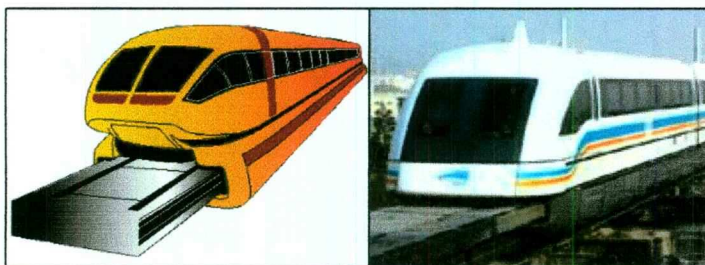


Figura 1: El Maglev estuvo un tiempo en operación en China, pero fue retirado por el alto costo.

Tomado de <http://omega.ilce.edu.mx>

- e) Generación de energía: la idea es lograr, por medio de los imanes superconductores, “botellas magnéticas” que sirvan para la generación de energía nuclear por fusión que no presenta problemas de desechos radiactivos, como sucede con los actuales generadores de energía.

- f) Separación magnética: separar sustancias minerales de sustancias orgánicas.
- g) Limpieza de aguas contaminadas: por medio de campos magnéticos se pueden separar las impurezas que al estar disueltas en agua quedan ionizadas y al fluir a través de un campo magnético pueden ser desviadas por éste y ser apartadas del agua.
- h) Aceleradores de mucha energía: se han podido desarrollar electroimanes superconductores capaces de generar los campos magnéticos más intensos de la historia para su utilización en aceleradores de partículas de energía muy grandes.

1.2.2 Cables Superconductores

Un cable superconductor necesita de una cubierta refrigerante a su alrededor para mantenerlo a una temperatura inferior a la temperatura crítica del material que lo forma. De acuerdo a la construcción mecánica, se tienen tres tipos de cables superconductores:

- a) *Rígidos*: el aislamiento y el conductor se fabrican con tubos rígidos, con la dificultad de que la longitud máxima de manufactura transportable es de 20 metros aproximadamente. Se requieren componentes corrugados para compensar las contracciones térmicas.

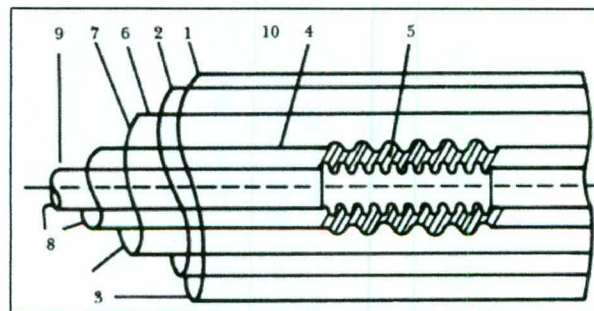


Figura 2: Tipo de cable superconductor rígido.
Componentes: 1) tubo de protección, 2) superaislamiento, 3) vacío, 4) espaciadores, 5) fuelles, 6) nitrógeno líquido, 7) escudo frío, 8) helio líquido, 9) superconductor, 10) aislamiento eléctrico, 11) escudo frío, 12) retorno de helio, 13) tubo de helio y 14) soporte.
Tomado del ASM Handbook Vol.2, 1991

b) *Semiflexibles*: el sistema de aislamiento térmico consta de tubos rígidos como componentes corrugados para compensar las contracciones térmicas; sin embargo, el conductor es flexible y puede consistir de un tubo corrugado o de alambres doblados en forma helicoidal sobre un soporte cilíndrico hueco.

Estos cables superconductores pueden fabricarse en longitudes de 200 a 500 metros y ser transportados en tambores.

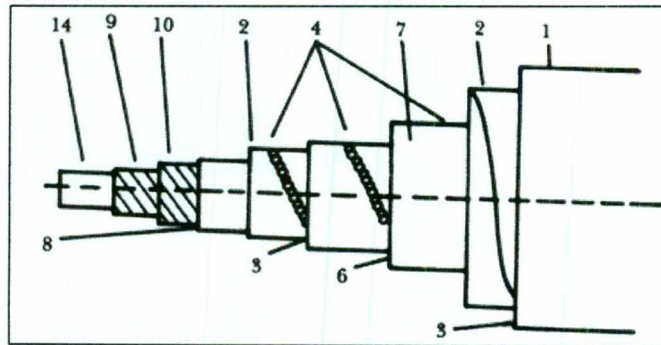


Figura 3: Tipo de cable superconductor semiflexible. Los componentes son los mismos que en la Figura 2. Tomado del ASM Handbook Vol.2, 1991

c) *Completamente Flexibles*: el aislamiento térmico de este tipo de cables es flexible al transporte o a las contracciones térmicas. El conductor puede ser un tubo corrugado o alambre doblado en forma helicoidal. [ASM91]

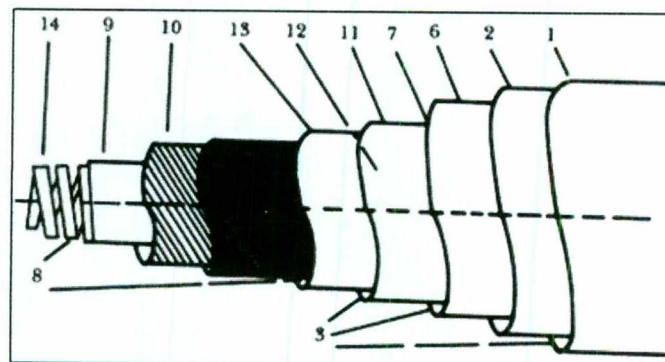


Figura 4: Tipo de cable superconductor flexible. Los componentes son los mismos que en la figura 2. Tomado del ASM Handbook Vol.2, 1991

En los tipos de cable rígido y semiflexible todos los conductores pueden acomodarse en una envoltura térmica rígida común, lo que tiene un efecto para evitar pérdidas térmicas.



Figura 5: Envoltura térmica de un superconductor semiflexible. Tomado del *ASM Handbook Vol.2, 1991*

1.2.3 Sistemas inductivos de almacenamiento de energía

Una aplicación a gran escala de los electroimanes superconductores es el almacenamiento de energía, lo que podría servir para una gran variedad de propósitos importantes. En una bobina hecha de un material superconductor se deja circulando una corriente y como no hay disipación de energía al no existir resistencia eléctrica, la corriente permanecerá circulando por mucho tiempo. Los electroimanes pueden utilizarse en reactores de fusión o en sistemas de distribución comercial de energía eléctrica.

1.2.4 Aplicaciones en la electrónica

En 1956 se hizo la primera propuesta para utilizar la transición del estado normal al estado superconductor en la electrónica, y fue llamado criotrón, [ASM91] el cual consiste en un alambre, normalmente de niobio, enrollado alrededor de un alambre de tantalio, ambos aislados eléctricamente entre sí. Si se hace pasar una corriente a través del alambre de Nb, se genera un campo magnético que cubre al tantalio, que lo mantendrá en estado normal, pero el niobio permanecerá en estado superconductor.

El efecto Josephson consiste en el paso de corrientes superconductoras a través de una unión que no deberá dejar pasar ningún electrón. Para las computadoras, el uso de dispositivos de efecto Josephson lleva a tiempos de transferencia de

corriente extremadamente breves (de 5 a 10 picosegundos). [ASM91] El Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica (SQUID por sus siglas en inglés *Superconductive Quantic Interferente Dispositive*) es uno de los superconductores más utilizados.[Musk90] Son instrumentos más sensibles que están para medir una gran variedad de cantidades físicas: campos magnéticos, cambios espaciales de campos magnéticos, susceptibilidades magnéticas, voltajes muy pequeños y desplazamientos microscópicos, existen dos tipos de dispositivos: el SQUID de corriente directa (cd) y el SQUID de radiofrecuencia (rf).

1.2.5 Uso actual de los Superconductores Tradicionales

Aunque limitado, el uso de los superconductores comenzó en 1957. La temperatura crítica de la aleación de Niobio-titanio (-267°C) permite formar cables para fabricar poderosos electroimanes capaces de generar campos magnéticos de más de 100 Kilogauss, que son utilizados actualmente en la Física de Altas Energías para identificar fragmentos provenientes de violentas colisiones nucleares. Otros campos aún más poderosos se emplean en los reactores de termofusión para contener el plasma calentado a 100 millones de grados.

Los hospitales más modernos del mundo cuentan con los "scanners" de resonancia magnética nuclear, que permiten observar claramente el interior del cuerpo humano, sin provocar daños por irradiación.

Algunas compañías ya han sacado al mercado cables de alta potencia formados por cintas trenzadas de BSCCO, refrigerados con nitrógeno líquido en su interior, que conducen miles de amperes a alto voltaje.

1.3 El material YBaCuO

Los cerámicos superconductores tienen varios lados débiles, uno de ellos es la fragilidad intrínseca, así que la resistencia mecánica es extremadamente baja comparada con los cerámicos estructurales.[Pern05] Sin embargo, es común que

la resistencia de los materiales cerámicos se vea afectada por el grado de porosidad. Otro punto importante, es que las "súper-corrientes" generadas en cerámicos Superconductores de Alta Temperatura son reducidas por los límites de grano.

Para los óxidos de cobre, se cree que la superconductividad tiene su origen en la física de las capas de CuO_2 donde se localizan las cargas móviles.

En el año de 1987 los investigadores Chu and Wu reportaron que la temperatura de transición para los compuestos de Y-Ba-Cu-O arriba de 77 K.

El *Heptaóxido de Ytrio dibario tricobre* ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) tiene una estequiometría bien definida con un contenido variable de oxígeno. La fórmula YBaCu-123 representa un estado inusual de estados de oxidación para el cobre. []

- La valencia formal de YBCuO podría ser: Y^{3+} , Ba^{2+} , el par $\text{O}_2\text{-Cu}$ adquiere una valencia no integral en un rango de 2.00 a 2.33, donde la valencia del cobre depende de la concentración del oxígeno.
- Si todo el cobre está presente como Cu^{2+} , el contenido de oxígeno será menor de 6.5 por fórmula unitaria: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$.
- Si uno de los tres cobre está presente como el ión raro Cu^{3+} , la carga del catión es +14 y la carga del anión es -14 en la fórmula

El YBaCuO es una perovskita defectuosa, desde el punto de vista estructural, que cambia de una estructura tetragonal a ortorrómbica cuando es enfriada lentamente desde una temperatura superior a 750° en presencia de oxígeno.

La estructura cristalina del YBaCuO es como una columna de tres celdas unitarias de perovskita, con átomos removidos en algunos lugares y sustituidos en otros. Y es el átomo central de la estructura del cristal: cuando todas las áreas de oxígeno disponible son ocupadas en esta estructura, la composición corresponde a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

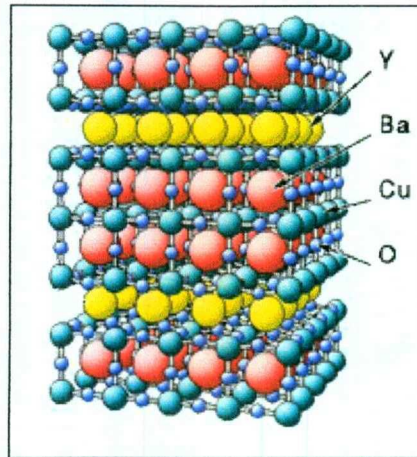


Figura 6: Estructura ortorrómbica del YBaCuO. Tomado de <http://omega.ilce.edu.mx>

1.4 Métodos de Procesamiento

Los métodos más comunes para producir Superconductores de Alta Temperatura son el sinterizado y la fundición. Existen dos procesos separados: a) para procesar las materias primas o polvos precursores para obtener un cuerpo “en verde”, y b) para preparar el HTSC.

1.4.1 Reacción en estado sólido

Esta reacción sucede entre varios componente utilizando calor para promover la reacción, se aplica comúnmente a los óxidos, carbonatos y nitratos. Es un proceso basado en la sinterización de óxidos simples para la formación de un óxido complejo. [Lee94]

1.4.2 Polvos precursores

Los polvos deben tener un bajo contenido de impurezas, usualmente hay limitaciones económicas por el alto costo que implica un alto grado de pureza.

La distribución de las impurezas, el tamaño y la forma de grano son características importantes que se deben tomar en cuenta de acuerdo a las aplicaciones del cerámico.

1.4.3 Molienda

Para minimizar la porosidad de una pieza terminada es necesario obtener un cuerpo verde muy denso, lo cual se alcanza teniendo un rango de tamaños en proporciones adecuadas de tal forma que al compactar el material los poros sean mínimos.

El tamaño de partícula puede ser alcanzado utilizando un molino de bolas o barras, de preferencia del mismo material que los polvos para evitar la contaminación causada por el desgaste de las bolas; existen otros mecanismos como los molinos vibratorios de alta energía y los molinos de energía sónica que permiten optimizar tiempo y la homogeneidad.

Los molinos de alta energía funcionan mediante un movimiento aleatorio que permite generar una gran cantidad de energía cinética, lo cual los hace más eficientes que los molinos de bolas convencionales, en el proceso de reducción y homogeneización de las partículas

1.4.4 Formación del cuerpo "en verde"

Un cuerpo verde está hecho de una mezcla de polvos con la composición deseada.[Lee94]

Se pueden utilizar varios aditivos para controlar el pH, la tensión superficial, evitar la espuma y la resistencia.

1.4.5 Densificación

Después de obtener un buen cuerpo "en verde", sin grietas o poros significativos, el siguiente paso es el proceso de densificación. La sinterización es el método de densificación más utilizado.

La sinterización puede ser definida como la remoción de los poros entre las partículas, acompañado por la compresión de los componentes combinado con el crecimiento y formación de límites fuertes entre las partículas adyacentes.

1.4.6 Tratamiento Térmico

Después de la sinterización, el cerámico superconductor debe pasar por un proceso de tratamiento térmico con atmósfera de oxígeno controlada para que el compuesto YBaCuO tenga la composición estequiométrica deseada.

TRABAJO PRÁCTICO

2. Diseño Experimental

Para la preparación de la pastilla cerámica de YBaCuO se partió de compuestos precursores más sencillos, dos óxidos simples y un carbonato, los cuales se hicieron interactuar entre sí por una reacción en estado sólido para después darle forma mediante un proceso de sinterizado y resistencia mecánica mediante con un tratamiento térmico.

La primera etapa para la fabricación de una pastilla superconductora de YBaCuO consiste en hacer reaccionar los compuestos precursores mediante tratamientos térmicos a altas temperaturas (entre 900 y 1000 °C) con molindas intermedias hasta lograr el material monofásico de color negro.

2.1 Polvos precursores:

Cuadro 2: Características de los compuestos de los compuestos precursores.

Compuesto	Fórmula	Color
Óxido de Itrio	Y ₂ O ₃	Blanco
Carbonato de Bario	BaCO ₃	Gris
Óxido Cúprico	CuO	Marrón oscuro

Utilizando una balanza modelo *Ohaus* modelo *Adventurer* con precisión de 0.001g se pesaron las cantidades correspondientes, por triplicado, de acuerdo a la siguiente relación estequiométrica:



Si se utilizaran óxidos la relación quedaría de la siguiente manera:

Cuadro 3: Masas atómicas de los óxidos precursores.

Elemento	Masa Molecular	Cantidad	Masa Total
Y ₂ O ₃	225.8082 g/mol	½ mol	112.9041 g
BaO	153.3394 g/mol	2 mol	306.6788 g
CuO	79.5394 g/mol	3 mol	238.6182
Masa Total de la Mezcla =			658.2011

Sin embargo, se utilizó el BaCO₃ en lugar del BaO.

La masa molecular del BaO es: 153.3394 g/mol

La masa molecular del BaCO₃ es: 197.34935 g/mol

Por lo tanto, se necesitan 1.2870101 veces más de BaCO₃.

Se contó con el material suficiente para formar una pastilla de 10 gramos, cantidad que fue dividida en tres partes iguales para realizar la molienda en diferentes tiempos y determinar su efecto en la reacción en el estado sólido, por lo que finalmente la relación de masas quedó como se muestra en la Tabla 4.

Cuadro 4: Cantidades pesadas para la molienda.

Compuesto	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Masa Total
Y ₂ O ₃	0.562	0.559	0.560	1.681
BaCO ₃	1.175	1.193	1.178	3.546
CuO	1.964	1.980	1.962	5.906
Total	3.701	3.732	3.700	11.133

2.2 Molienda

Utilizando un Molino de Alta Energía marca SPEX, Modelo 8000 (*Mixer Mill*) de 1725/1425 rpm, con el tiempo controlable, las 3 muestras fueron molidas a diferentes tiempos.

Para la primera molienda, el vial de *nylamine* se cargó con 4 bolas de zirconia de 5 mm de diámetro, 10 bolas de zirconio de 2 mm de diámetro y la Muestra 1, se cerró completamente y se programó el molino para un tiempo de molienda de 10 minutos.

Al transcurrir este tiempo, la mezcla fue retirada del vial y las bolas utilizando una espátula.

La Muestra 2 fue cargada en el vial siguiendo el procedimiento de la Muestra 1, el tiempo programado fue de 30 minutos. Al retirar la mezcla del vial y las bolas de zirconia, se observó la tonalidad que había adquirido y la diferencia con la Muestra 1 era significativa, así que se determinó un tiempo de molienda intermedio de 20 minutos para la Muestra 3.

Al finalizar el proceso de molienda, se realizó un análisis de mallas a cada una de las muestras.

2.3 Recocido

El siguiente paso consistió en someter la mezcla a tratamiento térmico de recocido para terminar con la reacción en estado sólido. Se juntaron las 3 muestras en un crisol de alúmina, para tener suficiente material para formar la pastilla, y se sometió a calentamiento a 925°C en un Horno Programable marca *Norbak*. A continuación se describe el ciclo:

Cuadro 5: Ciclo de calentamiento en el horno programable.

	Temperatura	Tiempo	Entrada/Salida
A	de 0 a 925	3 horas	13 de marzo 9:00 pm
B	de 925 a 925	18 horas	
C	de 925 a 60	8:30 horas	15 de marzo 10:00 am

Al concluir el ciclo de recocido, el polvo de YBaCuO fue transferido a un mortero de ágata para pulverizar los grumos que se formaron.

2.4 Formación del cuerpo "en verde"

No fue necesario el uso de aditivos aglutinantes para la formación de la pastilla de YBaCuO.

2.5 Sinterización

Se contó con una prensa de 1000 Kg/cm² y dados de Acero Inoxidable D2 de 1cm de diámetro; considerando la masa total obtenida de polvo de YBaCuO, se podría haber formado una pastilla cerámica de una altura aproximada de 5 mm. Este proceso no pudo ser concluido y lo que a continuación se describe es la finalización de la fabricación del cerámico en forma teórica.

2.6 Tratamiento Térmico

Una vez obtenida la pastilla, debió ser sometida a un nuevo ciclo de calentamiento con atmósfera controlada para alcanzar el contenido de oxígeno deseado en el compuesto YBa₂Cu₃O_{6.5}.

2.7 Análisis de Composición

La técnica de Difracción de Rayos X habría sido la opción de análisis correcta para conocer la composición de la pastilla y determinar si el compuesto YBaCuO había sido obtenido.

2.8 Efecto Meissner

A pesar de no haber podido concluir el proceso para obtener la pastilla de YBaCuO, se contó con una pastilla previamente fabricada para observar este fenómeno.

Vistiendo el equipo de seguridad necesario, la pastilla de YBaCuO se colocó en una caja petri con la ayuda de unas pinzas, y se adicionó nitrógeno líquido hasta cubrirla casi completamente, como se observa en la Figura. Cuidadosamente y utilizando nuevamente las pinzas, se colocó sobre la pastilla un magneto de cadmio. El proceso fue repetido en varias ocasiones para observar completamente la levitación. (Ver Anexo I)

3. Resultados

3.1 Molienda

Al aumentar el tiempo de molienda de 10 a 30 minutos, el cambio de coloración de la mezcla fue muy visible; con 10 minutos se obtuvo un color gris pálido y con 30 minutos de molienda el color se tornó negro.

Enseguida se muestran los resultados del análisis de mallas realizado en las tres muestras:

Cuadro 6: Análisis de Mallas de las muestras molidas en diferentes tiempos.

Tiempo de Molienda (minutos)	Mallas					
	+100		+120		+180	
	g	%	g	%	g	%
10	0.263	11.9%	0.221	10.0%	0.381	17.2%
20	0.128	7.6%	0.051	3.0%	0.142	8.4%
30	0.160	7.8%	0.162	7.8%	0.335	16.2%

Cuadro 6: Análisis de Mallas de las muestras molidas en diferentes tiempos.
(Continuación)

Tiempo de Molienda (Minutos)	Mallas				Total g
	+200		-200		
	g	%	g	%	
10	0.358	16.2%	0.989	44.7%	2.212
20	0.566	33.7%	0.794	47.2%	1.681
30	0.560	27.1%	0.684	33.2%	2.063

3.2 El Efecto Meissner

En las Figuras 9 y 10 se puede apreciar de forma nítida como el magneto levita, impulsado por el campo magnético la pastilla de YBaCuO al alcanzar la temperatura crítica.

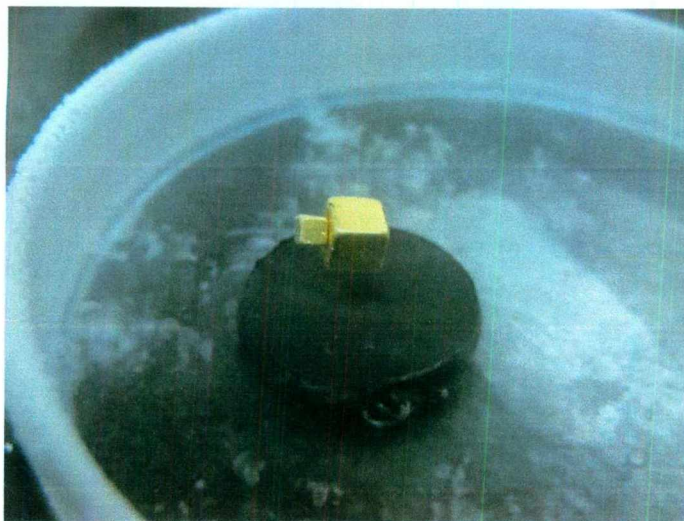


Figura 9: Efecto Meissner.

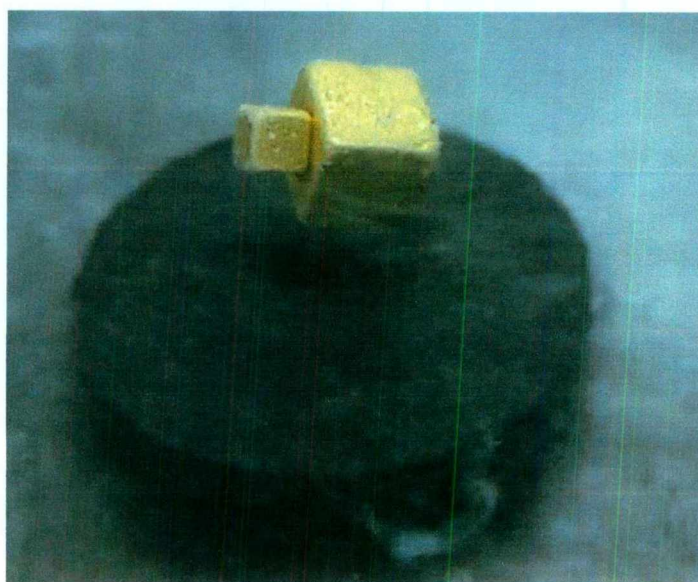


Figura 10: Efecto Meissner (acercamiento).

4. Discusión de Resultados

Se utilizó Carbonato de Bario, BaCO_3 , para la formación del óxido complejo $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ debido a que BaO no es comercialmente accesible y los resultados no cambian significativamente.

El objetivo de variar el tiempo de molienda fue determinar como influye este factor en la reacción en estado sólido. El color de la mezcla fue el indicativo para determinar el efecto que tiene, ya que la mezcla de los polvos precursores es color gris y el YBaCuO es color negro.

Los porcentajes obtenidos en el análisis de mallas no presentan correlación, lo cual fue asociado a la cantidad de material que se perdió durante la molienda, ya que pequeñas cantidades se quedaron adheridas en el vial y las bolas de *nylamine*.

Los procesos de molienda y calentamiento debieron realizarse dos veces, para garantizar la homogeneización de la mezcla y eliminar algunas partículas blancas que se observaron después de la molienda; sin embargo, por cuestión de tiempo, esto no se llevó a cabo, y quedaron algunas pequeñas impurezas en el polvo después del primer calentamiento.

Se utilizó un mortero de ágata para pulverizar después del calentamiento, con el fin de evitar la contaminación que se habría presentado de utilizarse un mortero de material similar al compuesto.

De no haberse roto una parte del dado, se habría concluido con la fabricación del cerámico superconductor, ya que hasta ese momento se habían obtenido los resultados esperados.

5. Conclusiones

La reacción en estado sólido es un método efectivo para la fabricación de un material cerámico, siempre que se utilicen los polvos precursores idóneos y la relación estequiométrica correcta.

El vial de *nyalmine* fue utilizado con la intención de no contaminar la mezcla de polvos, sin embargo, al realizar el análisis de mallas, se detectó la pérdida significativa de material durante el proceso de molienda, por la cantidad de polvo que se quedó adherido al vial y a las bolas de zirconia y al no poder utilizar agua fue muy complicado de separar, tal vez un vial de otro material hubiera generado menor pérdida de polvo.

El éxito en la reproducción del efecto Meissner permitió comprobar que los materiales pueden alcanzar un estado en el que generan un campo magnético muy potente y que no presentan resistencia alguna al paso de la corriente eléctrica, lo cual hace pensar que de acuerdo a todas las investigaciones actuales, las aplicaciones en diferentes áreas de la vida común no son ideas muy lejanas y que en algunos años, las utilizaremos, tal vez sin tomar en cuenta la magnitud del descubrimiento.

6. Bibliografía

[Musk90] **Musikant**, S. "What Every Engineer Should Know about Ceramics." Marcel Dekke Inc. Cincinnati, OH (1990)

[Pern05] **Pernia**, H. "Preparation of Ceramic YBCO High Tc Superconductors by solid-state reaction" TUHH. (2005)

[Lee94] **Lee** W., **Rainforth** R. "Ceramic Microstructures Property Control Processing". Ed. Chapman & Hall. Great Britain. (1994)

[ASM91] ASM Handbook Volumen 2, "Properties and Selection: Nonferrous and Special-Purpose Materials" (1991)

Sepúlveda, J. 2003. <http://omega.ilce.edu.mx:/3000/sites/ciencia/>

ANEXO I

Fotografías tomadas durante la preparación de la pastilla para el efecto Meissner.



Figura 11: Enfriamiento del superconductor con nitrógeno líquido.

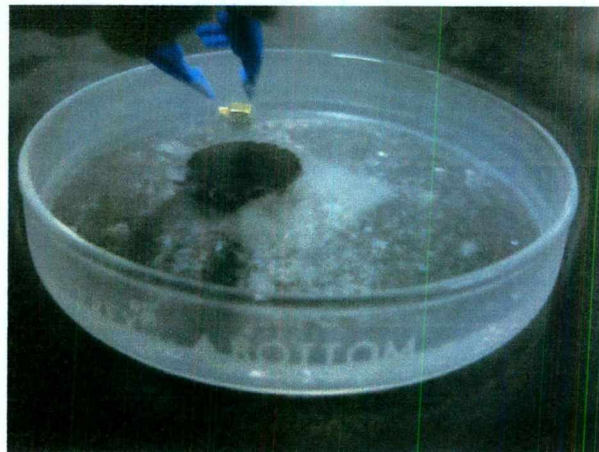


Figura 12: Colocación del magneto de cadmio sobre la pastilla de YBaCuO