

132
2 es.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CHUMACERAS SUPERCONDUCTORAS

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA ELECTRICA - ELECTRONICA)

p r e s e n t a:

EDUARDO JAVIER PULIDO FREGOSO



Director: Dr. José Guadalupe Pérez Ramírez

Codirector: Ing. Juan Manuel Rojas Gómez

México, D. F.

1998

267221



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradezco a la UNAM y a mis maestros por
todo el conocimiento recibido.

A mis padres por todo su apoyo en mi formación integral y profesional, así como a mis hermanos, a mi abuelita y demás familiares.

Con amor a mi esposa Ruth y a Mara por
su cariño incondicional.

A quienes con su apoyo, consejo y confianza hicieron posible que este trabajo lo pudiera realizar: Ing. Juan Manuel Rojas Gómez, Quim. Antonio Morales Espino y el Fis. Javier Fuentes Maya quien fue quien me habló por primera vez de la Superconductividad.

De manera muy especial al Doctor José Guadalupe Pérez Ramírez (Bokhimi) por su apoyo, dirección e infinita paciencia durante la elaboración de esta tesis.

A Dios por haberme dado la vida.

"La superconductividad es quizá la propiedad física más extraordinaria en el universo".

-David Pines

Introducción	i
Capítulo 1	
<i>Chumaceras Clásicas</i>	
1.1 Clasificación general	1
1.2 Clasificación acorde al tipo de fricción	2
1.3 Chumaceras de deslizamiento	3
1.3.1 Materiales para chumaceras de deslizamiento	8
1.3.2 Chumaceras semilubricadas y no lubricadas	10
1.3.3 Chumaceras lubricadas por gas	11
1.4 Chumaceras de rodamientos (de bolas y de rodillos)	12
1.4.1 Materiales para chumaceras de rodamientos	13
1.4.2 Rozamiento en las chumaceras de rodamientos	14
1.4.3 Tipos de chumaceras de rodamientos	16
1.4.4 Duración o vida de las chumaceras de rodamientos	23
1.5 Comparación entre las chumaceras de rodamientos y las de deslizamiento	24
1.6 Chumaceras magnéticas pasivas	26
1.6.1 Rigidez de una chumacera magnética elemental	27
1.6.2 Apilamiento de imanes repelentes en chumaceras magnéticas	29
Capítulo 2	
<i>Chumaceras Superconductoras</i>	
2.1 Propiedades de los superconductores	32
2.1.1 La química de los superconductores	42
2.2 Vórtices magnéticos de los superconductores	44
2.2.1 Anclamiento de los vórtices	45
2.2.2 Influencia de los vórtices en las propiedades de transporte eléctrico	45
2.2.3 Importancia de los vórtices magnéticos en el diseño de dispositivos	49
2.3 Diferentes aplicaciones de los superconductores	50
2.3.1 Aplicaciones de gran escala con los superconductores de alta temperatura	52

INDICE

2.3.1.1	Sistemas de transmisión de potencia	54
2.3.1.2	Almacenadores de Energía Magnética Superconductora (SMES)	55
2.3.1.3	Imanes superconductores	57
2.3.1.4	Maquinaria eléctrica	58
2.3.1.5	Motores superconductores	58
2.3.1.6	Trenes levitados magnéticamente (MagLev)	59
2.3.1.7	Aplicaciones navales	63
2.3.1.7.a	Barcos de propulsión por MHD (Magneto Hidro Dinámica)	63
2.3.2	Aplicaciones de pequeña escala	64
2.3.2.1	SQUID's	65
2.3.2.2	Magnetómetros	66
2.3.3	Aplicaciones usando películas delgadas superconductoras	67
2.3.3.1	Sensores de campos magnéticos	67
2.4	Diferentes tipos de chumaceras superconductoras	71
2.4.1	Principio de funcionamiento	72
2.4.2	Sistemas con ahorros substanciales	75
2.4.3	Pasiva contra activa	75
2.4.4	Mediciones que se llevan a cabo	77
2.4.5	Desarrollo tecnológico	80
2.5	Capacidad de carga de sistemas de levitación pasiva superconductiva	82
Capítulo 3		
<i>Análisis de una chumacera superconductora</i>		
3.1	Preparación del superconductor	85
3.2	Construcción de chumaceras superconductoras simples	86
3.3	Análisis y evaluación de las chumaceras superconductoras	
3.3.1	Chumaceras magnéticas superconductoras pasivas	90
3.3.2	Chumaceras magnéticas superconductoras híbridas	96
Capítulo 4		
<i>Conclusiones</i>		102
Referencias		105

INTRODUCCION

El primer registro que se tiene sobre el uso de elementos rodantes para vencer la fricción que se presenta al tratar de mover o de desplazar algo de su lugar inicial, fue para mover pesadas losas de piedra, por los trabajadores Egipcios de construcción antes del año 2000 a.C. y por los Asirios alrededor del año 650 A.C. Se cree que las ruedas de algunos carruajes primitivos utilizaron chumaceras de rodamiento imperfectas hechas principalmente, de palos redondos. Se considera a Leonardo da Vinci el haber inventado y desarrollado parcialmente las modernas chumaceras de bolas y de rodillos, alrededor del año 1500 D.C. En el siglo XVIII se construyeron en Francia unas cuantas chumaceras de bolas y de rodillos (en 1710, el constructor de un carruaje con chumaceras de rodillos, señaló que sus chumaceras de rodamientos, permitieron a un solo caballo, hacer el trabajo que de otra forma, difícilmente, podrían haberlo hecho dos caballos juntos). Pero no fue sino hasta después de la invención del proceso de acero Bessemer en 1856, que un material adecuado para los elementos de las chumaceras de rodamientos fue económicamente disponible. Durante el resto del siglo XIX, hubo un rápido desarrollo de las chumaceras de bolas en Europa para usarlas en las bicicletas¹.

En lo que respecta a la historia de México los elementos rodantes también se conocieron desde antes del contacto con la civilización europea pero tuvieron otro desarrollo histórico. El elemento más representativo fue la rueda aunque por raro que parezca a esta solo la estuvieron utilizando para realizar juguetes los cuales eran hechos de barro y representaban a algún animal, en especial se estuvo representando al perro y al jaguar^[2, 3]. Algunos de estos juguetes fueron encontrados en Pánuco, Veracruz, por el investigador Roberto Pavón a mediados de 1942^[2]. Ahí reportó que algunas de estas figuras estaban rotas sin embargo las ruedas estaban en su posición tal y como se muestra en la fig. I-1, lo que si no se encontró debido a que no se pudo conservar fue el eje pero los arqueólogos Pavón y Gordon F. Ekholm sostienen que este pudo haber sido construido de madera o de algún otro material parecido. Sin embargo también llamó la atención las marcas de asfalto cerca de los hoyos centrales de las ruedas ya que esto pudo haber sido una de las formas de sujetarlas a los ejes (bien pudo haber sido este uno de los primeros esbozos de lo que posteriormente serían las chumaceras¹).

¹ Nota del autor



Fig. I.1

Sin embargo de todos los ejemplos conocidos de este tipo de juguetes los encontrados en Tres Zapotes y que fueron reportados por Drucker son los más finamente hechos^{2,31}. En la fig. I-2 se aprecia uno de los especímenes que se llegaron a mostrar en los años 50's en el Museo Nacional de México y en el cual las ruedas se encuentran montadas en ejes de madera.



Fig. I.2

Los especímenes mostrados y en general la mayoría de los juguetes con ruedas que se conocen fueron casi todos hechos con el mismo principio:

A la figuras se les hacían unos hoyos ya fuera en las patas o en las piernas, para que se les pudieran introducir probablemente ejes de madera, las ruedas consistían de discos de barro con un hoyo en el centro. Las únicas excepciones para este estilo de construcción fueron algunas figuras de Tres Zapotes y el Cerro de las Mesas. Aquí, las patas se montaron en tubos o cilindros de barro los cuales actuaban como alojamiento para los ejes. Estas figuras eran huecas, y se vaciaban en moldes, además, las figuras de perro también sirvieron como silbatos⁽³⁾.

En 1940, Stearling descubrió algunos de estos animales de barro que descansaban sobre rodillos, tubos de barro unidos probablemente por ejes de madera ajustados a los agujeros practicados en las piernas (ver fig. I-3) ^(3,4).

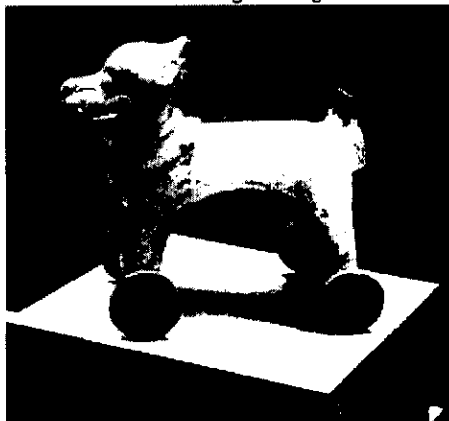


Fig. I.3

El último juguete con ruedas del que quiero hacer mención es de una pieza en el Museo Americano de Historia Natural (número de catálogo 30.0-3274). Esta fue obtenida por Marshall H. Saville en una de sus expediciones a Oaxaca entre los años 1898 y 1902. Esta es más bien una figura animal simplificada de unos 50 cm de longitud. La figura consiste de un tubo hueco el cual presenta cuatro pequeñas bases en el lugar donde están las patas. La cabeza también hueca, contiene algunos objetos en su interior que hacen la función de una sonaja. Aunque lo asombroso realmente de esta pieza es el asiento que contiene para un pequeño jinete (solo que desafortunadamente esta incompleto) en el lomo del animal con sostenes para las piernas en los costados del animal de manera exacta a la de un asiento para cabalgar.

De alguna forma este puede ser el mejor ejemplo que se tiene de un juguete con ruedas y junto con todas sus características es algo que no ha podido notarse en ningún otro espécimen. La presencia de la cabalgadura ciertamente indica la influencia de una tradición extranjera, lo cual tiende a fortalecer la conclusión de que esta juguete fue hecho en tiempos de la conquista o de la colonia en un intento por mostrar un jinete con su caballo. Sin embargo por las características del barro y algunos otros detalles, Gordon F. Ekholm concluye que fue construido por algún trabajador nativo⁽²⁾. Fig. I-4.

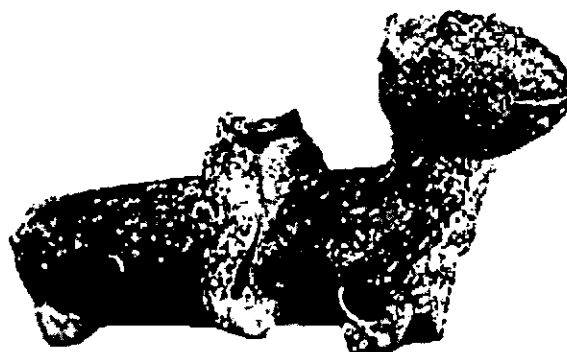


Fig. I.4

Con todo lo aquí mostrado no se quiere indicar que las diferentes culturas antiguas que habitaron en nuestro país hayan estado plenamente conscientes de las ventajas de utilizar elementos rodantes para facilitar sus tareas. Para varios investigadores ^[2] los juguetes con elementos rodantes parecen ser el ejemplo de un invento o una idea de la cual su valor práctico no se llevó a cabo, o si se llevó, no fue útil debido a la naturaleza de la cultura existente. Pudo haber habido varios posibles factores responsables de que el principio del uso de elementos rodantes para usos prácticos haya fallado, aún si su valor fue apreciado. Se pueden mencionar algunos de los factores más obvios. En México por esa época no existían animales domésticos que pudieran ser usados para propósitos de arrastre y tal vez la falta de dichos animales haya sido un freno para la aplicación de la rueda en el transporte.

Un factor más importante que los obvios, puede haber sido una tendencia conservadora en las culturas Indígenas Americanas, especialmente en el campo de la cultura material. Aún si algunas personas en el México Antiguo apreciaron completamente el valor de los elementos rodantes o en este caso el de las ruedas, es posible que se hayan quedado con su idea y no se haya llevado a cabo nada. El método simple y tradicional de cargar pesados bultos en la espalda fue un hábito muy arraigado difícil de que se pudiera cambiar.

Aún teniendo vehículos de juguete las antiguas culturas mexicanas estuvieron muy lejos, obviamente, de contar con un vehículo rodante real. Se pudieron haber necesitado varios inventos y una cierta cantidad de desarrollos evolucionados, sin embargo los juguetes con ruedas prueban que al menos se conocía el principio básico de lo cual algún desarrollo se pudo haber producido.

Regresando al punto principal que quiero analizar en este trabajo, actualmente, las chumaceras más sencillas son chumaceras simples sin lubricación o de deslizamiento (como las ruedas de las carretas montadas directamente en ejes de madera usadas en la antigua historia). Una fricción baja y una vida larga se obtuvieron con la adición de lubricantes de aceite vegetal o animal. Las modernas chumaceras de deslizamiento envuelven comúnmente flechas de acero soportadas por las superficies de las chumaceras (casquillos), hechas de un material como lo puede ser el bronce. Aplicaciones comunes de baja velocidad requieren el uso de aceite o grasa, pero el inconveniente es el de que el lubricante no separa completamente las superficies. Por otro lado, las chumaceras de deslizamiento usadas en los cigüeñales de los motores, experimentan una lubricación hidrodinámica durante la operación normal; esto quiere decir, que una película de aceite, separa completamente las superficies.

Las chumaceras con elementos de rodamiento, bolas (baleros) o rodillos, envuelven la separación de la flecha y los miembros externos y, además, sustituyen a la fricción deslizante por la fricción rodante (la cual, generalmente es menor).

Debido a que las áreas de contacto son pequeñas y los esfuerzos son grandes, las partes que soportan cargas en las chumaceras de elementos rodantes son normalmente hechas de materiales duros y de alta resistencia, superior a aquellos materiales usados en la flecha y en los miembros externos.

Ambas chumaceras, de deslizamiento y de elementos rodantes, tienen un lugar importante en la maquinaria moderna.

Una ventaja principal de las chumaceras de elementos rodantes es su baja fricción inicial. Las chumaceras de deslizamiento pueden lograr fricciones comparables, solamente, con una lubricación de película completa (para lograr una separación completa de las superficies). Pero para lograr esto último, se requiere de una lubricación hidrodinámica, la cual, no se puede lograr durante el arranque. Las chumaceras con rodillos son ideales para aplicaciones que envuelven altas cargas iniciales. Por otro lado, las chumaceras con una película lubricante son necesarias para aplicaciones con altas velocidades de rotación con impacto y sobrecargas momentáneas. Mientras mayor sea la velocidad de rotación, mayor será la efectividad de la acción del bombeo hidrodinámico. Las altas velocidades de rotación, generalmente, son una desventaja para las chumaceras de elementos rodantes debido a la rápida acumulación de ciclos de fatiga y las altas fuerzas centrífugas en los elementos rodantes.

Las chumaceras de elementos rodantes requieren de mayor espacio radial alrededor de la flecha, mientras que las chumaceras de deslizamiento generalmente requieren un mayor espacio axial. Otra característica es que las chumaceras de elementos rodantes generan y transmiten una cierta

cantidad de ruido, mientras que las chumaceras de deslizamiento con película de aceite generalmente no generan ruido y pueden, además, disminuir el ruido de otras fuentes. Las chumaceras de deslizamiento son más baratas que las chumaceras de bolas o de rodillos, pero esto se cumple solamente en aplicaciones simples, es decir, en donde se requiere la mínima provisión de lubricación. Porque donde se requieren chumaceras de deslizamiento con un sistema forzado de lubricación, el costo total de las chumaceras con elementos rodantes puede ser menor.

Hasta este momento solo he mencionado los dos tipos de chumaceras más comunes que actualmente se pueden encontrar en el mercado, pero, cabe señalar, que a estos dispositivos se les puede dar otro giro distinto y olvidarse principalmente, de la lubricación de aceite, la cual es una parte vital en el funcionamiento de las chumaceras anteriores. Esta otra alternativa, se refiere entonces, a hacer uso de la levitación. La forma más sencilla para lograrla, es a través de campos magnéticos, por lo que, también se pueden fabricar chumaceras magnéticas las cuales pueden usar fuerzas magnéticas de repulsión o de atracción para suspender a dispositivos giratorios de alta velocidad sin que se presente una fricción mecánica. Las chumaceras magnéticas más comunes son de dos tipos principalmente:

- 1.- Sistemas de electroimanes con corriente directa
- 2.- Sistemas electrodinámicos o de inducción de corrientes de eddy_(s).

Estos dos tipos de chumaceras ya se han utilizado en forma exitosa, siendo sus principales características, el de que presentan una fricción mecánica casi cero (solo se presenta una cierta fricción debido al aire y por un arrastre magnético), aunque desafortunadamente para este tipo de sistemas, se da una reducción considerable en la capacidad de carga que pueden soportar, esto, aunado con el hecho de que requieren mecanismos de retroalimentación para su sistema de control de los campos magnéticos, los hace ser unos dispositivos de usos muy particulares, principalmente, donde se requieran equipos no muy grandes y que manejen velocidades muy grandes. Este tipo de dispositivos no los menciono más en este trabajo, solo los puse en esta parte como una forma de tomarlos en cuenta y para que la persona que se encuentre interesada en el desarrollo de chumaceras conozca de su existencia.

El desarrollo de imanes más potentes a través de aleaciones tales como, SmCo y más recientemente los imanes cerámicos de NdFeB, han hecho posible la elaboración de chumaceras magnéticas pasivas, las cuales se basan principalmente, en contar con un juego de imanes (el sistema más simple utiliza solo dos imanes) en forma de anillos, magnetizados en forma radial o axial y una flecha o eje magnético colocados de tal forma que se presente una fuerza repulsiva la cual

mantenga en el centro de los dos anillos magnéticos a la flecha y le permita girar a grandes velocidades, pero, cualquiera que haya estado en contacto con imanes sabe lo difícil que es el poder lograr un sistema estable, por lo que se opta por hacer un sistema de apilamiento múltiple de imanes, con magnetizaciones contrarias los cuales permitan, además de una mejor estabilidad, una mayor fuerza de soporte (ver capítulo 1, sección 1.3). Este tipo de sistemas permite tener características semejantes al de las dos chumaceras magnéticas anteriores (principalmente a las que están lubricadas con aire) con la desventaja en este tipo de sistemas, que la capacidad de carga es inferior, pero el costo debido a que estos sistemas no requieren mecanismos de retroalimentación para su sistema de control, los hace ser más baratos, por lo que, dependiendo de la aplicación y de las características que envuelvan a esta, como por ejemplo el acceso, hace que este tipo de chumaceras magnéticas pasivas puedan ser una mejor opción.

Hasta esta parte solo estaría tocando los tipos de chumaceras que actualmente tanto económica como tecnológicamente, son posibles de fabricar, de comprar y/o vender. Pero, a partir de inicios de 1987, estas ya no son los únicos tipos de chumaceras que se pueden generar, esto, gracias al descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas, la cual fue posible obtenerla después de que en 1986 Bednorz y Müller anunciaron una posible superconductividad en el sistema Ba-La-Cu-O a una temperatura de transición de 30 K₆₄; esta información generó un esfuerzo enorme en la investigación de las propiedades de esta clase de materiales cerámicos, lográndose el primer triunfo en enero de 1987, con la obtención del óxido YBa₂Cu₃O₇ (conocido después en todo el mundo como "123") y cuya temperatura al estado superconductor es de 91 K, temperatura que es más alta que la de licuefacción del nitrógeno líquido que es de 77 K (con la ventaja de que es un elemento abundante en la atmósfera terrestre) (5,7).

Un superconductor presenta dos propiedades principales:

- 1.- Una resistencia cero al paso de la corriente.
- 2.- Una expulsión de campos magnéticos (efecto Meissner).

Esta segunda propiedad es la base para la fabricación de otro tipo de chumaceras conocidas como, chumaceras magnéticas superconductoras. Las cuales tienen el mismo principio que las chumaceras magnéticas convencionales, con la ventaja de que son sistemas mas estables, lo cual mejora la eficiencia de estos dispositivos. Actualmente se han desarrollado varios prototipos de este tipo de chumaceras, con ciertas variantes las cuales tienen el objetivo de mejorar principalmente la capacidad de carga.

Considerando que en la Facultad de Ingeniería de la UNAM actualmente no se ha presentado un trabajo extenso sobre la superconductividad a altas temperaturas, mi director de tesis, el Dr. José

Gpe. Pérez Ramírez y un servidor, tomamos la decisión de presentar un trabajo que relacionara a los superconductores con un problema actual de ingeniería, estudiamos varias opciones y en este caso escogimos un proyecto que por las características actuales de nuestro país, en el aspecto tecnológico y económico, sería la aplicación más viable para desarrollarse en un futuro próximo en México. En este caso decidimos trabajar sobre las chumaceras superconductoras, dispositivos que por las características descritas a lo largo de este trabajo, creemos que son una buena opción en la búsqueda de lograr nuevos diseños que puedan solucionar problemas de una mejor manera. Principalmente nos enfocamos a recolectar la información de los estudios que se están llevando a cabo a nivel mundial para implementar dichos dispositivos y presentamos una comparación entre chumaceras superconductoras hechas por diferentes procesos mostrando cuales son las que presentan mejores características y porque se da esto. Posteriormente se decidió construir al menos las chumaceras mas simples de tal forma que se pudiera confirmar los procedimientos descritos para lograr la superconductividad, darse cuenta de la problemática que representa trabajar con materiales cerámicos y por último confirmar a través de checar el efecto Meissner que efectivamente las muestras que se desarrollaron eran superconductoras. El resto de las pruebas no se llevaron a cabo principalmente por falta de equipo el cual actualmente es algo complejo y costoso y de imanes potentes que se mandaron pedir de China y nunca llegaron. Por lo que sólo se mencionan las pruebas que se están llevando a cabo con dichos dispositivos y de los resultados que se están obteniendo para de esta forma poder sacar conclusiones de lo que puede representar trabajar con estos nuevos materiales.

En el capítulo 1, se abordan las diferentes chumaceras actuales, siendo estas: de deslizamiento, de rodamiento y las chumaceras magnéticas pasivas. Se habla de sus diferentes características, se muestran ciertas curvas comparativas así como algunas aplicaciones en las cuales se pueden utilizar.

En el capítulo 2, se aborda el tema de los superconductores, empezando por sus propiedades, después, se abordan otras características en estos materiales como lo es la parte de los vórtices y como es que estos pueden influir en sus propiedades magnéticas y de transporte eléctrico. Después se abordan las diferentes aplicaciones con estos materiales y algunas aplicaciones con los materiales de baja temperatura, terminando este capítulo con los diferentes tipos de chumaceras superconductoras que se utilizan.

En el capítulo 3, se lleva a cabo el análisis de unas chumaceras superconductoras, en donde se habla primero de los pasos que son necesarios para preparar, tanto una muestra superconductora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, como la construcción de una chumacera superconductora, concluyendo con una

reproducción de algunos resultados obtenidos en diferentes chumaceras superconductoras fabricadas en diferentes Institutos a nivel mundial, con el objetivo de lograr una evaluación para poder determinar el futuro de estos dispositivos en el mercado.

Por último en el capítulo 4 se dan las conclusiones de este trabajo y en el capítulo 5 se da la bibliografía utilizada para el desarrollo de esta tesis.

CAPITULO 1

CHUMACERAS CLASICAS

1.1 Clasificación general

Una chumacera es la parte de una máquina, la cual tiene la finalidad principal de soportar una parte móvil y confinar su movimiento. La parte de la flecha que rota en una chumacera, se llama, muñón o gorrón. Las chumaceras en las cuales una superficie de contacto se desliza sobre otra superficie, se les llama, chumaceras planas y pueden ser divididas en dos clases: la primera clase la forman aquellas que presentan un *movimiento continuo de rotación* mientras que la otra clase está formada por chumaceras que tienen un *movimiento intermitente*. A la primera clase pertenecen las chumaceras guía, las cuales soportan cargas que actúan en ángulos rectos al eje de la flecha. En la segunda clase se encuentran las chumaceras que tienen un *movimiento oscilante*, tales como, las muñequillas (de cigüeñal) o muñón de pie de biela y chumaceras con un *movimiento recíprocamente lineal*, como por ejemplo, las crucetas. Una cruceta puede ser considerada como una parte oscilante con un radio infinitamente largo en la superficie de la chumacera.

Las chumaceras con un movimiento continuo de rotación son las que forman la gran mayoría, y son también las únicas en las cuales la misma flecha puede crear una película de aceite con presión suficiente para soportar al eje. Mientras que las chumaceras con un movimiento intermitente, deben depender para su operación de una fuente externa para obtener la presión necesaria de aceite o una reserva abundante de aceite⁽¹⁾.

De acuerdo al movimiento que presentan, las chumaceras también pueden ser clasificadas, de la siguiente forma:

- 1- Chumacera radial
- 2- Chumacera de empuje
- 3- Chumacera guía

• **Chumacera radial:**

- Chumacera de bolas
- Chumacera cilíndrica de aceite-lubricado

• **Chumacera de empuje o presión:**

- Chumacera de pasos
- Chumacera de collar
- Chumacera cónica

• **Chumacera de guía:**

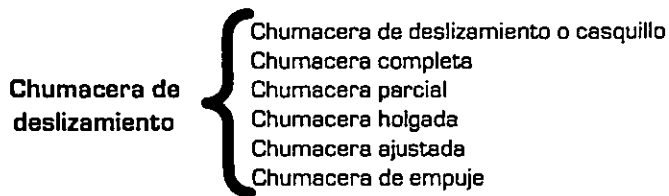
- Chumaceras de bomba de movimiento alternativo
- Chumacera de cruceta o de cabeza de cruz

Existen principalmente, para guiar el movimiento de un elemento de la máquina sin especificar la dirección de aplicación de la carga.

1.2 Clasificación acorde al tipo de fricción

De acuerdo al tipo de fricción que se presente, las chumaceras se pueden clasificar de dos formas:

- 1- Chumacera de deslizamiento
- 2- Chumacera de elementos de rodamiento



Se utilizan cuando se desea un costo mínimo inicial, silencio de operación y un mínimo de fricción.

Chumacera de rodamiento { Chumacera de bolas o balero de bolas
Chumacera de rodillos
Chumacera de agujas

Se utilizan cuando se requiera el mínimo de fricción.

Chumacera de rodillos { Chumacera de rodillos cilíndricos
Chumacera de rodillos cónicos o ahusados
Chumacera de rodillos "esferoangular"
Chumacera de agujas o manguito

Chumacera de bolas { Chumacera rígida o de ranura profunda
Chumacera de autorregulación
Chumacera de contacto angular de fila única
Chumacera de doble hilera

A continuación presento una descripción de cada uno de los tipos de chumaceras mencionadas en esta clasificación:

1.3 Chumaceras de deslizamiento

Una chumacera de deslizamiento puede ser un simple agujero formado por trabajo a máquina en un material, por ejemplo, de hierro fundido. Pero, aun siendo tan sencillo, puede requerir procedimientos de diseño detallados, como en el caso de una chumacera de biela automotriz, o en el caso que sea del tipo de dos piezas, con ranuras y lubricada a presión. O bien, su elaboración puede ser tan complicada como en el caso de las chumaceras de gran tamaño, provistas de anillos de aceite, enfriamiento con agua y depósito de lubricante integrado, las cuales se emplean en diversas clases de maquinaria pesada¹²¹.

Algunos tipos comunes de chumaceras de deslizamiento son los siguientes:

1. Chumacera de deslizamiento o de casquillo
2. Chumacera completa
3. Chumacera parcial
4. Chumacera holgada
5. Chumacera ajustada
6. Chumacera de empuje

Chumaceras de deslizamiento: se utilizan para suministrar soporte lateral a flechas giratorias. En una chumacera de deslizamiento, el muñón es la parte de la flecha que corre en el buje o en el casquillo de la chumacera, el cual es generalmente estacionario y soporta al muñón, como se muestra en la fig. 1-1. En algunas aplicaciones, el muñón esta en descanso y el casquillo es quien gira; en otras, como en las chumaceras de las bielas, ambos, el casquillo y el muñón tienen movimiento₁₁.

En la fig. 1-1 se muestran dos chumaceras de deslizamiento, conocidas como, bujes. Los bujes sencillos se hacen por fundición, por labrado de máquina, o bien, por un proceso de metalurgia de polvos. Generalmente, los bujes revestidos son de tipo partido. Hay un método de manufactura de este último tipo de bujes, en el que el metal fundido de revestimiento se vierte continuamente sobre una tira de acero delgada. Esta tira, recubierta con metal "babbitt", se procesa luego mediante prensas acabadoras y broqueladoras, resultando al final, el buje revestido. En los bujes pueden hacerse ranuras de cualquier tipo. Estos elementos se ensamblan con ajuste a presión y se terminan por mandril, escariado o bruñido.

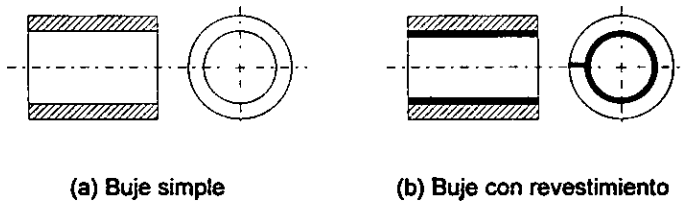


Fig. 1-1 Chumacera de tipo buje

Chumacera completa: el ángulo de contacto del casquillo con el muñón es de 360°es decir, lo rodea completamente. Este es el tipo de chumacera más comúnmente usado en la maquinaria industrial para acomodar la carga en cualquier dirección radial. Fig. 1-2

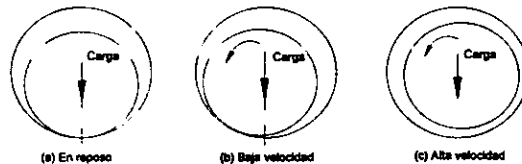


Fig.1-2 Chumacera de deslizamiento y/o chumacera completa.

Chumacera parcial: el ángulo de contacto es de 180° o menos, siendo el valor más usual, 120° . La chumacera de deslizamiento parcial se puede utilizar, cuando la dirección de la carga, materialmente, no cambia; es usada para simplicidad estructural, para conveniencia en la aplicación del lubricante, y para la reducción de pérdidas por fricción. Se puede utilizar un tipo sencillo de chumacera parcial cuando la carga este soportada en la parte superior del muñón y éste se encuentre sumergido en un vaso colector de aceite en el fondo. Cuando la línea de acción de la carga (reacción del apoyo) bisecta al arco de una chumacera parcial, se dice que está cargado centralmente; cuando el vector no pasa por el centro, se dice que la chumacera está cargada excéntricamente (también se le llama de apoyo desviado, ver fig. 1-3).

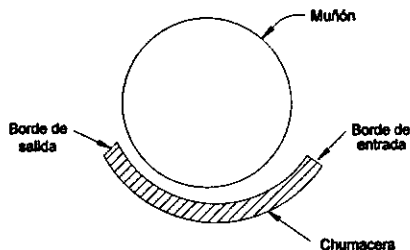
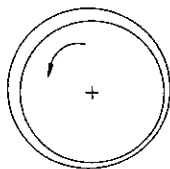


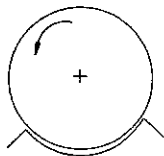
Fig. 1-3 Chumacera parcial

Las chumaceras de los carros de ferrocarril, representan una extensa aplicación de las chumaceras parciales.

Chumacera holgada: la "holgura" en una chumacera, se refiere al grosor del espacio permitido para el lubricante que separa las partes que están teniendo algún movimiento. En este tipo de chumacera el diámetro del muñón es menor que el diámetro de la chumacera. La diferencia entre dichos diámetros se llama huelgo o juego diametral c_d . La mayoría de las chumaceras son de este tipo. La forma de una chumacera holgada se muestra en la fig. 1-4(a).



(a) Chumacera holgada



(b) Chumacera ajustada

Fig. 1-4 Chumaceras de deslizamiento

Chumacera ajustada: es aquella en la cual, los radios del muñón y de la chumacera son iguales. Por consiguiente, una chumacera de esta clase es necesariamente, de apoyo parcial, y el muñón debe correr excéntrico con el casquillo para proveer de espacio para el lubricante, como se muestra en la fig. Fig. 1-4 (b), en tanto que las chumaceras holgadas, pueden ser de apoyo total o parcial.

Las chumaceras ajustadas son más comunes en Inglaterra que en México o en los Estados Unidos.

Chumacera de empuje: muchos ejes giratorios, algunos verticales, están sometidos a fuerzas axiales de magnitud importante, fuerzas que deben ser compensadas en una chumacera llamada de empuje. El tipo más sencillo soporta el empuje sobre superficies paralelas (sin película cuneiforme), sobre el extremo del eje, o bien, sobre collares. A no ser que el aceite se introduzca en las superficies de la chumacera bajo una presión suficiente para soportar la carga, habrá que suponer lubricación límite ($f = 0.1$ a 0.03) y utilizar entonces, las chumaceras de empuje para condiciones de funcionamiento moderadas ($3.5 < p < 14 \text{ Kg/cm}^2$, $15 < v_m < 60 \text{ mpm}$) [3].

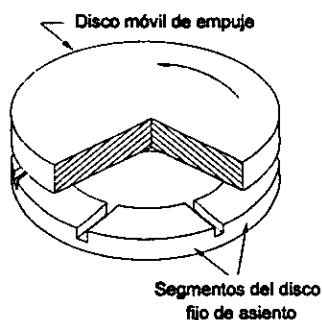


Fig. 1-5 Chumacera o cojinete de empuje o carga axial con discos de segmentos fijo.

En la fig. 1-5 se ilustra un cojinete de empuje que, básicamente, es un disco giratorio que se desliza sobre un anillo segmentado fijo [4]. El movimiento del disco móvil lleva el lubricante hasta las ranuras radiales y lo impulsa hacia los espacios en forma de cuña. Cuando la velocidad de este último elemento (disco móvil), es continua y suficientemente alta, o cuando el lubricante tiene la viscosidad correcta y es suministrado en cantidad suficiente, se obtiene lubricación hidrodinámica. Frecuentemente se fabrican chumaceras con brida (fig. 1-6). Esta brida fija la posición del cojinete en su alojamiento y también absorbe carga axial. No obstante, aun cuando esté ranurado y provisto de lubricación adecuada, este dispositivo,

no es una chumacera de empuje de lubricación hidrodinámica; esto se debe a que el espacio de holgura no es cuneiforme, sino que tiene espesor uniforme.

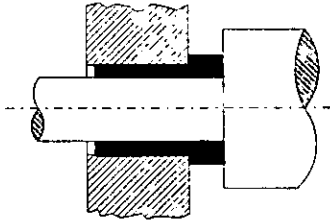


Fig. 1-6 Chumacera de casquillo con brida capaz de soportar cargas radial y axial.

La chumacera de empuje puede ser clasificada de la siguiente forma:

1. *Chumacera "quicionera"*, en la cual, el final de la flecha está en contacto con la superficie de la chumacera, ver fig. 1-7(a).
2. *Chumacera de collar*, en la cual, el collar está sujeto o bien está unido íntegramente con la flecha, ver fig. 1-7(b).
3. *Chumacera cónica*: como se muestra en la fig. 1-7(c) este tipo de chumaceras pueden soportar tanto cargas axiales como transversales.

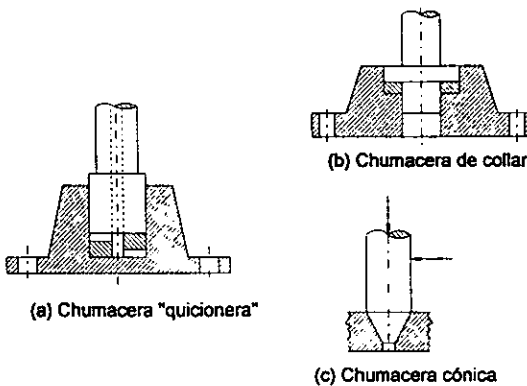


Fig. 1-7 Chumaceras de empuje.

El área de aplicación de las chumaceras de deslizamiento es muy amplia. Los cojinetes del cigüeñal y de las bielas de un motor de automóvil tienen que trabajar durante miles de kilómetros de recorrido, a temperaturas elevadas y en condiciones de cargas variables. Las chumaceras de deslizamiento que se emplean en las turbinas de vapor de las plantas generadoras de energía, deben tener confiabilidades próximas al 100%. Por otro lado, hay miles de aplicaciones en las que las cargas son ligeras y el servicio, relativamente de poca importancia, entonces, se requiere una chumacera simple, fácil de instalar y que utilice poco o nada de lubricante. En tales casos, la chumacera de rodamiento podría ser una solución inadecuada por su alto costo, por sus alojamientos muy elaborados, o por las tolerancias estrechas, por el espacio radial que requiere, por las altas velocidades o por los más intensos efectos de inercia. En vez de ello, puede lograrse una solución satisfactoria con una chumacera de nylon que no requiere de ninguna lubricación, con una chumacera fabricada por metalurgia de polvos y cuya lubricación es "integral" o "interconstruida", o con una chumacera de bronce con anillo de aceite, con lubricación por mecha, con película de lubricante sólido o con lubricación por grasa. Los adelantos metalúrgicos que se han logrado recientemente en materiales para chumaceras, junto con el mejor conocimiento que se tiene hoy del proceso de lubricación, hacen posible fabricar chumaceras de deslizamiento con vida satisfactoria y muy buena confiabilidad.

1.3.1 Materiales para las chumaceras de deslizamiento

Las propiedades que se consideran ventajosas para los materiales de chumaceras incluyen:

- **Deformabilidad:** bajo módulo de elasticidad, lo que implica mayor deformación por unidad de carga.
- **Compatibilidad:** en la que esta incluida la propiedad antisoldante con respecto al acero y la resistencia al rayado.
- **Incrustabilidad o penetrabilidad:** blandura suficiente para permitir que las partículas extrañas, demasiado grandes para atravesar la película mínima, penetren en la superficie y sean eliminadas de la película de aceite sin ralladuras ni desgaste, aptitud para ser fácilmente alisada.
- **Baja resistencia a la cizalladura:** capacidad para soportar la máxima presión hidrodinámica y resistir la fractura frágil con carga repetida, cualquiera que sea la temperatura de funcionamiento.
- **Resistencia a la compresión y a la fatiga:**

-Otras propiedades que también se toman en cuenta para elegir el material de la chumacera, son: *resistencia a la corrosión, buena conductancia térmica* (casi el mismo coeficiente de dilatación térmico que el material de la caja y del muñón) y como siempre, *bajo costo*.

Los materiales que más se usan, son, los de antifricción (Babbitt) y las aleaciones de cobre. Los metales babbitt o antifricción tienen base de estaño o de plomo, dependiendo del metal que predomine en la aleación. Son relativamente débiles en todas las formas, y pierden resistencia rápidamente cuando aumenta la temperatura, por lo que se usan cada vez más en una capa delgada (menos de 0.1 cm, hasta 0.005 cm) sobre base de acero. Por su baja resistencia a la fatiga, no son satisfactorios cuando la carga es grande y variable, si bien, en algunos casos, las capas muy delgadas suelen resistir bastante. La capacidad normal de carga con un espesor de 0.040 cm (lubricación de película gruesa) es aproximadamente 105 Kg/cm² (o bien 1500 psi).

Las aleaciones de cobre que se utilizan para las chumaceras son generalmente bronce, los cuales, son mucho más fuertes y más duros que los metales antifricción. Una aleación cobre-plomo, 25-50% plomo, en una capa de 0.076 cm de espesor aproximadamente, tiene buena resistencia a la fatiga; la capacidad normal de carga es aproximadamente 210 Kg/cm² (o bien 3000 psi). Los bronce de estaño tienen una capacidad normal de carga de 350 Kg/cm² (o bien 5000 psi).

Las chumaceras de plata para servicio pesado, se fabrican depositando una capa de 0.050, a 0.076 cm (o sea, 0.02, 0.03 pulg) de plata sobre acero, y luego una capa de plomo de 0.0025, a 0.0076 cm (es decir, 0.001 a 0.003 pulg); después se deposita electrolíticamente, un 4-5% de indio, el cual se difunde térmicamente en la capa de plomo.

Una chumacera de hierro fundido con un muñón de acero endurecido resulta una combinación excelente en cuanto al desgaste y al rozamiento, si existe lubricación de película delgada. Sin embargo, el hierro fundido no posee incrustabilidad ni las otras propiedades de un material blando que usualmente pesan más que su bajo costo.

Las aleaciones de aluminio han resultado favorables para las chumaceras en los motores de combustión interna y otras aplicaciones a causa de sus favorables propiedades de buena resistencia, conductividad, resistencia a la corrosión y bajo costo; pero la superficie de apoyo del muñón debe estar endurecida. Para mejorar la incrustabilidad se puede emplear una capa delgada de material antifricción.

Los materiales elastómeros, tales como el caucho, sirven excelentemente con agua como lubricante y se emplean mucho para ejes de hélices de buques, turbinas hidráulicas, dragas hidráulicas, bombas, etc. El caucho blando deja pasar la arena y el cascajo sin rayar el material. También se utilizan otros muchos materiales para chumaceras con o sin

lubricación por aceite o agua, incluyendo la madera (de palo santo y roble impregnado en aceite), los plásticos (nylon, teflón, resinas fenólicas), y materiales cerámicos (especialmente en aplicaciones de temperaturas extraordinariamente elevadas).

1.3.2 Chumaceras semilubricadas y no lubricadas

Existen millones de chumaceras en máquinas previstas para poca atención de mantenimiento (especialmente las domésticas) y otras en las que el mantenimiento, puede ser imposible, difícil o costoso. Para responder a estas necesidades se han creado chumaceras que llevan incorporado suficiente lubricante para una duración o vida útil razonable, o que no requieren algún lubricante incorporado. Un ejemplo en este sentido, es la chumacera sinterizada, que se fabrica comprimiendo primero, una mezcla de metales en polvo (ordinariamente, cobre y estaño o hierro y cobre) con la forma de la pieza a obtener, y sinterizándola luego, a una temperatura comprendida entre los puntos de fusión de los dos metales. El resultado, es un material poroso con huecos del 10 al 35% del volumen total, que luego son impregnados con un aceite. El aceite alcanza la superficie cuando la chumacera está sometida a una temperatura o presión más elevada. Mientras exista aceite se puede contar con una lubricación limitada y un coeficiente de rozamiento relativamente alto, por ejemplo $f = 0.12$. Los valores límites de temperatura, de la presión de la chumacera p , de la velocidad periférica v_m y del producto $p v_m$, son: 65 °C, 280 Kg/cm², 300 mpm, y 1070 Kg/cm²-mpm, respectivamente.

Se están adoptando ampliamente los plásticos con y sin lubricación en una gran diversidad de formas. El nylon se ha mejorado para este uso, con la adición de grafito o de disulfuro de molibdeno MoS₂ ($p v_m$ límite ≈ 64 Kg/cm²-mpm).

El teflón relleno con fibra de vidrio (25%) es dimensionalmente más estable que otros plásticos, soporta una temperatura más elevada, es resistente a la corrosión y tiene un coeficiente notablemente más bajo de fricción "seca", $0.05 < f < 0.1$ a baja velocidad, pero más aproximadamente 0.25 para velocidades mayores de 30 mpm y $p v_m = 3.5$ Kg/cm², $p v_m$ límite = 214 (o bien $p v_m = 10,000$) para baja velocidad ($v_m = 3$ mpm) servicio continuo; y 428 (o bien 20,000) para servicio intermitente. Impregnada con bisulfuro de molibdeno, esta mezcla de teflón ha resultado beneficiosa para superficies secas de chumaceras en máquinas especiales. Las chumaceras de "plástico" se pueden proyectar para lubricación hidrodinámica, pero hay que tener presentes las variaciones dimensionales con la temperatura y con el contenido de humedad.

Las inserciones de carbón-grafito son otro tipo de chumaceras secas, actuando la mezcla de carbón y grafito como autolubricante. Pueden tolerar temperaturas de 400 °C, μ_m límite = 321 (o bien 15,000) seca, pero menos para funcionamiento continuo. También se puede depositar una película de grafito de 0.00038 a 0.00127 cm de espesor, llamada Electrofilm, sobre chumaceras, engranajes, cilindros, ejes ranurados, etc., para reducir el rozamiento (ludimiento) y evitar el desgaste. El uso de lubricantes sólidos ligados tales como disulfuro de molibdeno en un aglomerante de jarabe de maíz, sobre las superficies de chumaceras de metales diversos, ha resultado satisfactorio para muchas chumaceras inaccesibles en que la presencia de aceite o grasa es una desventaja, en el vacío, a temperaturas muy bajas (hidrógeno líquido) y a temperaturas elevadas (pero el MoS₂ se descompone en material abrasivo a temperaturas superiores a 370 °C).

1.3.3 Chumaceras lubricadas por gas

Los gases, especialmente el aire, se utilizan como lubricante, y el resultado es bueno, excepto que su capacidad de soportar carga es muy pequeña (por ejemplo, 0.70 kg/cm², o bien 10 psi). La chumacera hidrostática de aceite se utiliza como chumacera de empuje; también se proyectan chumaceras de aire para funcionar hidrodinámicamente. A causa de la baja viscosidad de los gases, las pérdidas por rozamiento son sólo una fracción de las correspondientes a los lubricantes líquidos de cualquier clase, siendo a veces los gases apropiados para velocidades excepcionalmente elevadas y cargas ligeras, como en giroscopios e instrumentos. He aquí algunas aplicaciones: General Electric comunica el desarrollo de un pequeño sistema criogénico, con un peso de 22 Kg, que licúa el helio, cuyo compresor ha girado a 350,000 rpm, y en el cual un pequeño turboalternador girando a 250,000 rpm expande el helio, girando ambos en chumaceras de aire; Boeing presenta informes sobre una chumacera de empuje hidrostático por aire girando a 100,000 rpm y chumaceras de esmeriladora con lubricación hidrostática de aire girando hasta 100,000 rpm; y algunos laboratorios han reportado el haber conseguido velocidades de hasta de 1,300,000 rpm.

Un fenómeno perturbador en este tipo de chumaceras, es probablemente, el remolino, sacudida de rotación o rotación violenta, el cual se refiere al movimiento orbital del centro del muñón con respecto al centro de la chumacera, aunque no necesariamente alrededor del mismo. Esto constituye una inestabilidad que se puede manifestar por una vibración destructora. El remolino o giro del muñón se produce también en chumaceras de alta velocidad, cargadas ligeramente y lubricadas por aceite, y se llama *giro vibratorio de media frecuencia*.

1.4 Chumaceras de Rodamientos (de bolas y de rodillos)

Las expresiones chumacera de rodamiento y chumacera antifricción, se emplean para describir aquellas chumaceras en las que la carga principal se transmite a través de elementos que están en contacto de rodadura y no en contacto de deslizamiento. La carga, la velocidad y la viscosidad de trabajo del lubricante, afectan las características relacionadas con el rozamiento de una chumacera con contacto de rodamiento. Probablemente no sea muy correcto describir una chumacera de rodamiento como chumacera "antifricción", pero el uso de esta expresión está muy generalizada en la industria.

Los especialistas en el diseño de esta clase de chumaceras se enfrentan con el problema de diseñar un conjunto de elementos que integren una chumacera de rodamiento; tales elementos tienen que diseñarse de manera que se acomoden en un espacio de dimensiones especificadas; además, hay que diseñarlas para que reciban una carga de determinadas características y, finalmente, deben tener características tales que les permitan tener una vida satisfactoria, trabajando en condiciones específicas de servicio. Por tanto, los especialistas en chumaceras tienen que considerar factores como, cargas de fatiga, rozamiento, calentamiento, resistencia a la corrosión, problemas cinemáticos, propiedades de los materiales, lubricación, tolerancias de maquinado, ensamble, utilización y costo.

Probablemente la ventaja más importante de las chumaceras de contacto por rodamiento o chumaceras de rodamiento, es que el rozamiento inicial en el arranque no es mucho mayor que en funcionamiento normal (a velocidades usuales y en comparación con la fricción inicial directa entre metales de las chumaceras ordinarias de contacto deslizante); es decir, el "coeficiente de rozamiento" varía poco con la carga y la velocidad, salvo en valores extremos. Esta propiedad hace que las chumaceras de rodamiento sean adecuadas, particularmente, para máquinas que arrancan y paran frecuentemente, especialmente, bajo carga (por ejemplo, las chumaceras de los ejes de coches o vagones ferroviarios). Este tipo de chumaceras presentan otras propiedades características, entre las cuales se encuentran: la de que requieren poco lubricante y poca conservación; ocupan menos espacio axial y más espacio diametral que las chumaceras simples ordinarias; son más silenciosas que éstas y más caras; tienen duración limitada a causa de que los caminos de rodadura están sometidos a elevados esfuerzos repetidamente cuando gira el eje, lo que puede dar lugar a un eventual fallo por fatiga; además, algunos tipos de rodamientos pueden estar sometidos a carga radial y a carga axial.

Tanto las chumaceras de contacto deslizante como las de contacto de rodadura tienen sus propias ventajas, por lo que en una aplicación particular un tipo puede ser más adecuado que el otro, y no se puede decir que uno de ellos sea mejor en absoluto, excepto para una aplicación determinada de ingeniería. El cojinete de rodamiento es un dispositivo normalizado, especializado y de precisión que el proyectista de la máquina no diseña, lo que hace es seleccionar de un catálogo un tipo apropiado de entre una gran variedad de modelos y dimensiones.

1.4.1 Materiales para las chumaceras de rodamientos

El material que más comúnmente se usa para este tipo de chumaceras es, SAE 52100, un acero aleado con contenido nominal de 1% C y 1.5% de cromo, endurecido hasta Rockwell C 58-65. También se utilizan níquel y molibdeno con cromo, como elementos de aleación. La dureza es importante en cuanto al desgaste (fatiga de superficie), por ejemplo, la vida media cuando la dureza es $R_c = 50$ es solo la mitad de la correspondiente a $R_c = 60$. La temperatura de trabajo del material SAE 52100 y aceros similares se mantiene generalmente en unos 150 °C (pero se considera 95 °C como valor máximo para la instalación usual). El acero de herramientas se utiliza algunas veces para rodamientos giratorios en virtud de que se puede permitir que aumente su temperatura hasta alrededor de 540 °C sin que pierda demasiada dureza. Los metales no férricos se utilizan para rodamientos giratorios por alguna determinada razón; también se fabrican rodamientos de bolas en plásticos fenólicos (y de otros plásticos, como nylon, teflón). El vidrio tiene algunas aplicaciones para bolas; y en condiciones de temperatura excepcionalmente elevada el material Pyroceram, es muy prometedor. Si las piezas son de diferentes materiales, los coeficientes de dilatación térmica adquieren importancia con respecto a los juegos u holguras.

Es necesario que los diámetros de los elementos giratorios en un determinado rodamiento sean aproximadamente los mismos, es decir, con una tolerancia de 1.27 a 2.54 micras, e incluso menor para aplicaciones de gran exactitud, como en instrumentos y dispositivos de alta velocidad. Cuando existe una diferencia de dimensiones, la carga no está bien distribuida entre los elementos, y los mayores soportan esfuerzos excesivos.

1.4.2 Rozamiento en las chumaceras de rodamientos

La resistencia al movimiento de estos rodamientos es una combinación de resistencia a la rodadura y al deslizamiento. En las chumaceras de rodadura, el coeficiente de rozamiento es mayor en el arranque que a la velocidad de régimen de funcionamiento, disminuye bruscamente con el aumento de la carga hasta un punto y luego tiende rápidamente a permanecer constante, excepto en los rodamientos rígidos o de ranura profunda, los cuales tienen el mínimo valor en una determinada carga. Stribeck halló que los elementos de rodadura más pequeños y los más grandes tienden a reducir la pérdida por rozamiento con cargas ligeras. Con las excepciones señaladas, los siguientes valores de f son debidos a Palmgren determinados para la carga que proporciona una duración de 1000 Mr¹, y sólo son adecuados para aproximaciones de orden de magnitud.

Rodamientos con contacto angular	$f = 0.0032$
Rodamientos de rodillos cilíndricos cortos, guiados por pestaña	$f = 0.0011$
Rodamientos rígidos de una sola hilera de bolas	$f = 0.0015$
Rodamientos de agujas (0.0014-0-0022)	$f = 0.0045$
Rodamientos de bolas a rótula	$f = 0.0010$
Rodamientos de rodillos cónicos y de rodillos a rótula, guiados por pestaña	$f = 0.0018$
Rodamientos axiales de bolas	$f = 0.0011$

Tabla 1-1 Valores de f para diferentes tipos de rodamientos

Los valores son más elevados en chumaceras nuevas y cuando se emplea demasiado lubricante. Puesto que el cierre o escudo o estanco para el lubricante pueda aumentar en varios centenares por cien, estos efectos no deben ser desestimados cuando se calcula la pérdida de energía. Considerando todos los efectos, se observa que las chumaceras de rodamiento no tienen necesariamente un coeficiente de rozamiento menor que las chumaceras de casquillos de película completa.

La falla de una chumacera con contacto rodante, o la necesidad de reemplazo pueden ser debidas al *desgaste excesivo* en la superficie de la chumacera, *sobrecalentamiento* o *rompimiento* de la chumacera metálica.

Desgaste Excesivo. El desgaste es causado por el contacto del metal con metal y no puede ser eliminado completamente, pero si se puede reducir considerablemente, provyendo al área de la chumacera de una adecuada lubricación.

¹ Mr significa millones de revoluciones

Sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento es causado principalmente por el contacto de metal con metal debido a una carga excesiva o una inadecuada lubricación. A menos de que el sobrecalentamiento se detenga a tiempo, este puede causar un ensanchamiento del muñón o fundición en la superficie de la chumacera. Este ensanchamiento ocurrirá si el muñón corre en una chumacera de metal duro, tal y como, una aleación de cobre. La superficie de la chumacera se fundirá si la chumacera se raya con un metal, como lo puede ser una rebaba, la cual se puede fundir a bajas temperaturas. La lubricación decrece el peligro de un sobrecalentamiento, pero a pesar de esto, el sobrecalentamiento puede ocurrir aun con una adecuada lubricación, si la disipación de calor no es la adecuada.

Rompimiento. La chumacera metálica se puede agrietar si es sujeta a cargas pesadas de choque, tales como aquellas que tienen lugar en el mecanismo de transmisión de un motor de combustión interna cuando el esfuerzo de compresión en la chumacera metálica, excede su límite de resistencia. El remedio puede ser, disminuir la presión específica de la chumacera o usar una chumacera metálica con un límite de resistencia, proporcionalmente más alto. Aun a pesar de esto, es recomendable la presencia de una película de aceite como un amortiguador.

1.4.3 Tipos de chumaceras de rodamientos

A continuación mencionaré sólo los principales tipos de chumaceras de esta clase.

Chumacera de bolas rígida o de ranura profunda (fig. 1-8), en la que las bolas se introducen mediante desplazamiento excéntrico del aro interior. Estando el aro interior en contacto con el exterior se colocan tantas bolas como sea posible en las ranuras. Luego se centran los aros y se mantienen en su posición las bolas mediante un separador, portabolas o jaula. Las chumaceras armadas de esta manera se llaman, chumaceras de tipo Conrad. Es esencial una alineación cuidadosa, es decir, que el máximo desalineamiento sea de 0.5%. Esta chumacera puede soportar una carga de empuje axial relativamente alta.

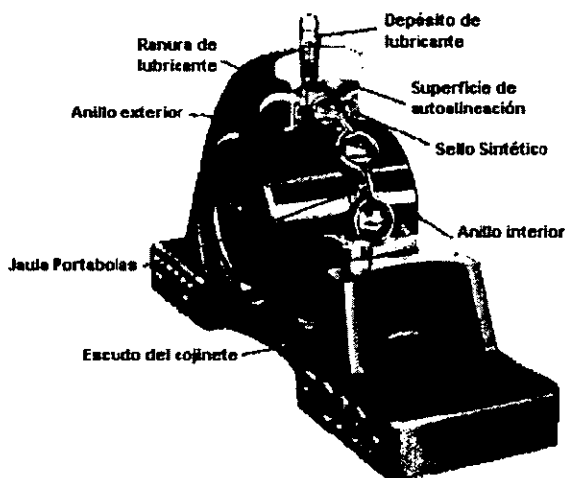


Fig. 1-8 Chumacera o rodamiento rígido de una sola hilera de bolas montado con su escudo de cojinete.

Chumacera del tipo de ranura de llenado o de entrada de rodamiento de bolas (fig. 1-9), tiene orificios o muescas que permiten el montaje de más bolas, proporcionando un rodamiento de mayor capacidad de carga radial. Como su capacidad de empuje axial es pequeña, estas chumaceras se utilizan cuando la carga es principalmente radial.

Cuando se emplea una ranura de llenado (fig. 1-10) en los anillos interior y exterior, se logra introducir un mayor número de bolas y, con ello se aumenta la capacidad de carga del cojinete; sin embargo, cuando hay cargas axiales o de empuje, disminuye su capacidad al empuje por el choque de las bolas contra los bordes de la ranura.

Las chumaceras con una sola hilera de bolas resisten cierto grado de desalineamiento o desviación del eje, pero si tal efecto es muy intenso, deben usarse chumaceras autoalineantes.

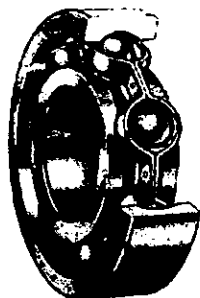


Fig. 1-9 Chumacera de una hilera de bolas con escudo. Este escudo contribuye a preservarla de materias extrañas, lo que es importante en las chumaceras de rodadura.



Fig. 1-10 Con entrada para bolas.

Chumacera de bolas a rótula o de autorregulación (fig. 1-11), este tipo de chumacera compensa los desalineamientos angulares debido a deformaciones del eje, de la cimentación o errores en el montaje; son recomendables para cargas radiales y empuje moderado en cualquier dirección. Como el aro exterior tiene camino de rodadura de forma esférica, el eje puede pasar a través de los rodamientos con cualquier pequeño ángulo de inclinación sin que se produzca acuñamiento o agarrotamiento.

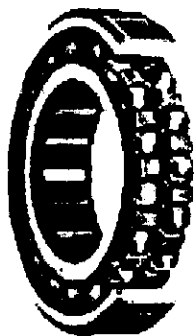


Fig. 1-11 Chumacera de bolas a rótula.
Los rodamientos de rodillos a rótula son similares.

Chumacera con contacto angular, llamada así, porque la línea que atraviesa las superficies que soportan la carga, forma un ángulo con el plano de la cara del rodamiento (fig. 1-12), estas chumaceras están destinadas a resistir pesadas cargas axiales. Se les utiliza frecuentemente en pares opuestos axialmente uno al otro y son adecuadas para la carga previa. La carga previa de un rodamiento consiste en colocarlo bajo el efecto de una carga axial inicial que es independiente de la carga de trabajo, a fin de mantener una alineación casi constante de las piezas reduciendo el movimiento axial y, en cierto grado, la desviación radial bajo las cargas de trabajo.

La chumacera de contacto angular (fig.1-13) tiene mayor capacidad de carga al empuje. Esta chumacera puede obtenerse con cubiertas o sellos de protección en uno o ambos lados. Estas cubiertas no proporcionan un cierre perfecto, pero sí ofrecen una buena protección contra el polvo y la suciedad.

Muchas chumaceras se fabrican con sellos en uno o en ambos lados. Cuando llevan sellos en ambos lados se lubrican en la fábrica. Aunque, supuestamente, una chumacera sellada está lubricada de por vida, a veces se cuenta con un medio de relubricación.



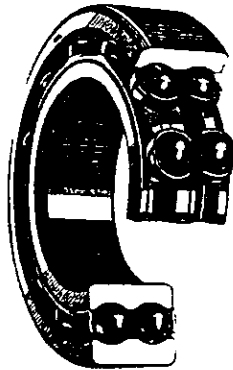
Fig. 1-12 Chumacera con contacto angular. La acción del empuje es tal que separa la superficie de contacto del plano de la línea central de las bolas.



Fig. 1-13 De contacto angular.

Chumacera con dos hileras de bolas (sin rótula, fig.1-14), es análoga a la de una sola hilera de bolas, con la única diferencia de que cada aro, tiene dos ranuras.

Las chumacera de doble hilera de bolas pueden obtenerse en diversos tipos y tamaños. para soportar mayores cargas radiales y de empuje; a veces, con este mismo fin se usan juntos dos cojinetes de una sola fila de bolas, aunque, en general, las chumaceras con doble hilera requieren menos partes y ocupan menos espacio.



Con doble
fila de bolas
Fig. 1-14

Chumacera de rodillos cilíndricos (fig. 1-15), se fabrica en diferentes estilos y pesos. Geométricamente, el contacto, en este tipo de chumacera, es una línea, en lugar de un punto como en las chumaceras de bolas, de lo que resulta mayor área para soportar la carga y, por consiguiente, para un tamaño determinado, mayor capacidad radial.

La principal función del retenedor en los rodamientos de rodillos es conservar paralelos los ejes de éstos. Si los rodillos estuvieran sesgados, la pérdida por rozamiento aumenta considerablemente. También puede producirse el sesgo a causa de que el diámetro del rodillo no sea constante o porque un extremo del mismo soporte una parte mayor de la carga debido a desalineación.

La chumacera de rodillos cilíndricos (fig. 1-16) soporta más carga que la chumacera de bolas del mismo tamaño, por su mayor área de contacto. Sin embargo, tiene la desventaja de que requiere de una configuración geométrica casi perfecta en las pistas y rodillos. Un ligero deslizamiento hace que los rodillos pierdan su posición correcta. Por tal razón, el retén tiene que ser fuerte. Por supuesto, las chumacera de rodillos cilíndricos no aceptan cargas de empuje.

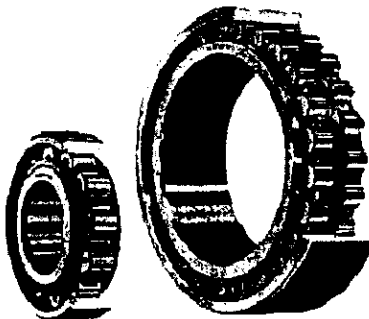


Fig. 1-15 Chumacera de rodillos cilíndricos. Los rodillos giran en una ranura del aro interior.



Fig. 1-16 De rodillos cilíndricos.

Chumacera de rodillos a rótula, con rodillos esféricos (en forma de barril), rodando en un aro interior de doble ranura, tiene aro exterior con camino de rodadura esférico que presenta mucha analogía con el aro exterior de una chumacera de bolas a rótula (fig. 1-11). Puede soportar cargas radiales y axiales relativamente grandes (los elementos rodantes esféricos tienen la ventaja de aumentar su área de contacto cuando aumenta la carga) y tiene la ventaja usual de la propiedad de autoalineación, con esto, se puede decir que este tipo de chumacera sirven para cuando hay cargas grandes y desalineamiento. La fig. 1-17 es una foto de este tipo de chumacera.

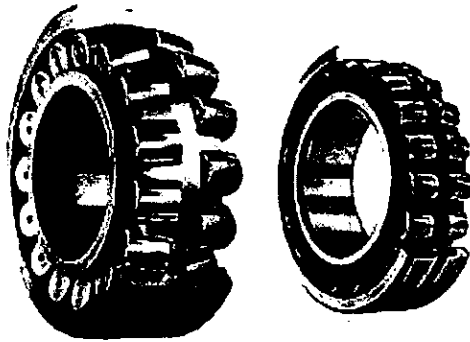


Fig. 1-17 Chumacera de rodillos a rótula, con rodillos esféricos. Puede soportar cargas radiales y axiales relativamente grandes y tiene la ventaja usual de la propiedad de autoalineación

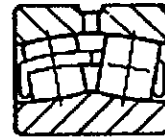


Fig. 1-18 De rodillos esféricos de empuje

Las chumaceras de rodillos cilíndricos se fabrican también con rodillos relativamente largos, siendo un tipo muy generalizado la llamada chumacera de agujas (fig. 1-19); este tipo no tiene retenedor para mantener los rodillos alineados. La fig. 1-20 muestra una aplicación a una junta universal. Si las agujas ruedan sobre la superficie del eje, en vez de sobre un aro interior, esta superficie debe estar endurecida y pulimentada para que sea de esperar una duración o vida útil razonable. Por ejemplo, si la superficie del eje está laminada en frío con dureza Rockwell C15, la capacidad para la misma vida útil es sólo el 3% de la capacidad para una superficie de dureza Rockwell C 60. Las chumaceras de agujas son apropiadas cuando sean dimensiones diametrales más pequeñas, cuando la velocidad no sea excesiva y cuando exista movimiento oscitante, (fig. 1-21).

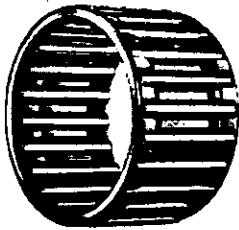


Fig. 1-19 Chumacera de agujas

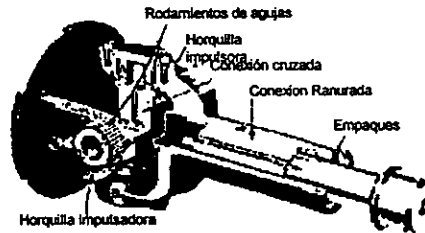


Fig. 1-20 Junta universal con chumacera de agujas.



Fig. 1.21

Chumacera de rodillos cónicos (fig. 1-22), los elementos rodantes son troncocónicos, estando montados en los caminos de rodadura, de modo que, todos sus elementos de superficie y sus ejes se cortan en un mismo punto del eje geométrico del árbol o eje de giro. Puede soportar cargas axiales y de empuje importantes. En la chumacera de rodillos cónicos (fig. 1-23 e,f) se combinan las ventajas de los cojinetes de bolas y de rodillos cilíndricos, ya que puede aceptar cargas radiales, cargas axiales, o bien, una combinación de ambas; además, tiene la gran capacidad de carga de las chumaceras de rodillos cilíndricos. La chumacera se diseña de manera que todas las generatrices de la superficie cónica de los rodillos y de las pistas se corten en un punto común del eje de la chumacera. La chumacera de rodillos cónicos se fabrica en dimensiones normalizadas con unidades inglesas (pulgadas en vez de milímetros) y en bastante variedad de estilos.

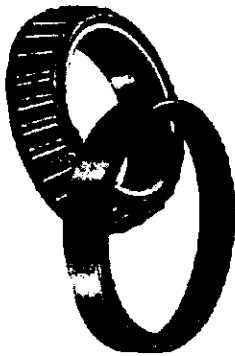
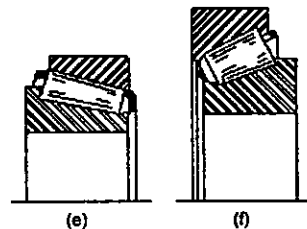


Fig. 1-22 Chumacera de rodillos cónicos

Fig. 1-23 (e) cónicos ordinarios
(f) cónicos, contacto angular,
ángulo fuerte

Chumacera de rodillos "esferoangular" (fig. 1-24), es una chumacera de contacto angular con rodillos en lugar de bolas. Como el aro exterior tiene una superficie esférica en el camino de rodadura, el rodamiento es también de autoalineación. Con un área de contacto grande, su capacidad de carga es elevada.

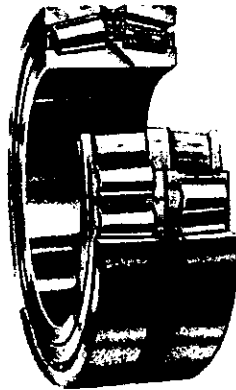


Fig. 1-24 Chumacera esferoangular

Chumacera axial de rodadura: En el tipo de chumacera axial de rodadura los elementos rodantes son bolas (fig. 1-25), rodillos cilíndricos cortos, rodillos cónicos (fig. 1-26) o rodillos esféricos que ruedan en caminos esféricos y por consiguiente son a rótula. Estos rodamientos pueden estar soportados rígidamente, o bien uno de los aros puede estar soportado en un asiento esférico para que sea de autoalineación.

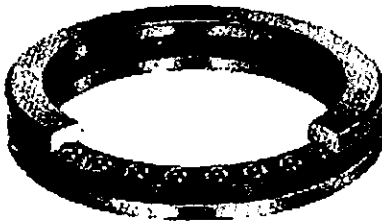


Fig. 1-25 Chumacera axial de bolas

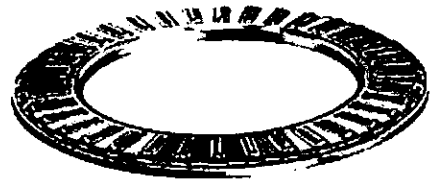


Fig. 1-26 Chumacera axial de rodillos cónicos

Otros dispositivos de chumaceras de bolas

Proveyendo medios para la circulación de las bolas, los ingenieros han adaptado el principio de contacto de rodadura a situaciones especiales. La figura 1-27 muestra un manguito de bolas que se utiliza para movimiento alternativo. También es posible la adaptación de bolas circulantes para conexiones ranuradas.

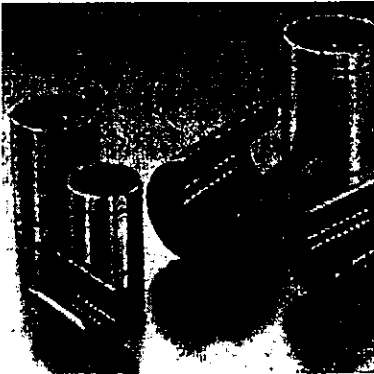


Fig. 1-27 Casquillo de bolas. Para movimiento axial. Las bolas ruedan sobre la superficie de movimiento alternativo B, circulando por los tubos.

1.4.4 Duración o vida de las chumaceras

Si una chumacera de rodamiento se limpia y se lubrica correctamente, se instala y se sella contra la entrada del polvo y la suciedad, se conserva en esta condición y, además, se le hace trabajar en temperaturas razonables, entonces la única causa posible de falla será, la fatiga del metal. Se ha vuelto de uso muy generalizado la expresión "vida de la chumacera", la cual se refiere, al tiempo de funcionamiento de la chumacera, antes de que se presente la falla.

La vida de una chumacera en particular se define como el número total de revoluciones, o bien; el número total de horas de trabajo a una velocidad constante dada, requeridas para que se desarrollen los criterios de falla. En condiciones ideales, la falla por fatiga se manifestará como agrietamiento o descascarado de las superficies que soportan la carga. La norma de la asociación de fabricantes de chumaceras de rodamiento (Anti-Friction Bearing Manufacturers Association, AFBMA), establece que el criterio de falla es la primera

manifestación de la fatiga. Sin embargo, a menudo se emplea el concepto de *vida útil* como definición de la vida correspondiente a la fatiga.

El término *vida nominal* es una expresión autorizada por la AFBMA y usada por la mayor parte de los fabricantes de chumaceras. La vida nominal de un grupo de chumaceras de bolas o de rodillos aparentemente idénticos, se define como el número de revoluciones, o de horas de trabajo a una velocidad constante dada, que puede completar o rebasar el 90% del grupo de chumaceras, antes que se desarrolle el criterio de falla. También se usan las expresiones *vida mínima* y *vida L₁₀* para designar a la vida nominal.

Al analizar la longevidad de las chumaceras, frecuentemente se emplean también las expresiones "vida promedio" y "vida media". Ambas expresiones significan lo mismo. Cuando se someten a ensayo hasta su falla, a grupos formados por grandes cantidades de chumaceras, se promedian las duraciones medidas de los grupos. En consecuencia, estas expresiones significan en realidad la vida media promedio.

1.5 Comparación entre las chumaceras de rodamiento (de bolas y de rodillos) y las chumaceras de deslizamiento

Algunas de las *ventajas* de las chumaceras de rodamiento en relación con las chumaceras de deslizamiento son:

1. Presentan una menor fricción, excepto a altas velocidades (fig. 1-28).
2. Se puede mantener una alineación de la flecha en una forma relativamente exacta.
3. Pueden soportar sobrecargas elevadas momentáneas.
4. Su lubricación es simple.
5. Algunos tipos de estas chumaceras pueden soportar, tanto cargas radiales, como axiales.
6. Se pueden reemplazar fácilmente.
7. La selección de estas chumaceras por medio de la información de los fabricantes, es relativamente fácil.
8. Capacidad de trabajar en una amplia gama de temperaturas: desde temperaturas próximas al cero absoluto hasta 600°C (si se fabrican las chumaceras de aleaciones especiales y se emplean lubricantes especiales).
9. Capacidad de trabajar en alto vacío ₍₅₎.

Algunas *desventajas* son:

1. El gasto es generalmente más grande, debido al costo de la chumacera y a la necesaria provisión para el montaje.
2. Pueden ocurrir fallas en la chumacera sin presentarse avisos y causar daños a la maquinaria.
3. Rigidez de trabajo, carencia de la amortiguación de las oscilaciones de la carga.
4. Ruido en el trabajo, condicionado por los errores de la forma.
5. Complejidad de instalación y montaje de los conjuntos de cojinetes.
6. Elevada sensibilidad a las inexactitudes de la instalación.
7. Contacto metálico entre los cuerpos de rodamiento y los collares.

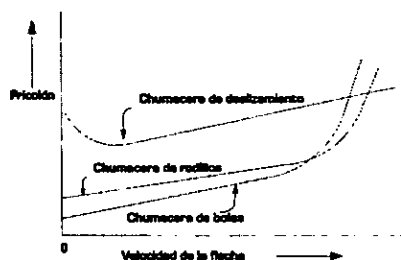


Fig. 1-28 Gráfica comparativa de la fricción presentada en diferentes chumaceras

Para las chumaceras cilíndricas lisas con lubricación de película completa, la velocidad está limitada por el aumento de temperatura (que a su vez es función del lubricante utilizado), el rozamiento en el arranque es grande, la amortiguación es relativamente buena, son necesarias grandes cantidades de lubricante, el ruido no constituye un problema y su vida es prácticamente ilimitada. En las chumaceras de rodadura la velocidad está limitada en buena parte por consideraciones dinámicas (vibración), el rozamiento en el arranque es bajo, el efecto de amortiguamiento es reducido, son necesarias cantidades muy pequeñas de lubricante excepto cuando éste disipe calor, el ruido puede ser más molesto y su vida es limitada. Las chumaceras cilíndricas lisas toleran más desalineación que los de rodadura, ocupan menos espacio radial y más espacio axial que los rodamientos y probablemente serán más baratos en cantidad [5].

1.6 Chumaceras Magnéticas Pasivas

Introducción:

Hasta este momento, he hecho únicamente mención de los dos tipos de chumaceras convencionales, de deslizamiento y de rodamiento. A continuación, presento una descripción de otro tipo de chumaceras, relativamente más recientes que las dos primeras, las cuales presentan características diferentes y semejantes, tales como, que el principio de operación de estas chumaceras se basa en el uso de la levitación magnética, lo cual da por resultado una reducción tanto, de pérdidas de fricción como de una reducción al ruido de trabajo, pero también, se da una reducción en la capacidad de carga, en comparación de lo que presentan las otras chumaceras, caso parecido al que presentan las chumaceras con lubricación por aire.

Las chumaceras magnéticas pasivas con imanes permanentes se utilizan como partes de suspensión magnética para el centrado del eje (chumacera magnética radial) o para el posicionamiento axial (chumacera axial). Estos sistemas se pueden realizar fácilmente con imanes permanentes de forma circular o anular, magnetizados de forma radial o axial. Los sistemas más simples, constan de solo dos imanes. La figura 1-29 muestra una chumacera radial magnética pasiva, en la cual, los imanes se encuentran en repulsión con direcciones de magnetización radial o axial. Ambos tipos de magnetización dan exactamente los mismos resultados [7].

Una chumacera radial magnética pasiva ejerce una fuerza de restauración radial cuando el sistema es excéntrico. Su función está caracterizada por su rigidez K_r :

$$K_r = -\frac{dF_r}{dr}$$

Esta rigidez depende, por supuesto, de la forma geométrica de la chumacera, y del cuadrado del valor de la intensidad de magnetización. Cuando esta rigidez no es suficiente, se tiene que añadir otra chumacera de forma similar. En este artículo se estudian, primero las características, y luego se presenta la estructura original de apilamiento, la cual emplea anillos con ambas magnetizaciones, radial y axial.

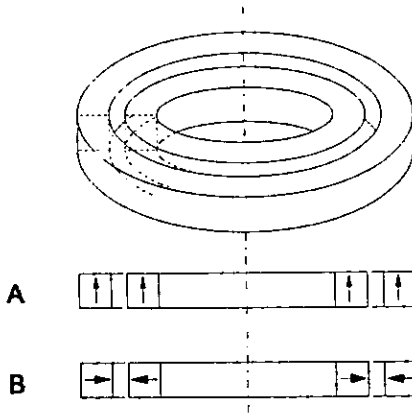


Fig. 1-29 Los dos tipos de chumaceras radiales con imanes permanentes: A = magnetización axial, B = magnetización radial.

1.6.1 Rigidez de una chumacera magnética elemental

La rigidez de una chumacera magnética elemental construida con dos anillos magnetizados (fig. 1-30), se puede calcular analíticamente. Para anillos de sección idéntica¹⁷, la expresión es:

$$K_r = \frac{-J^2}{2\mu_0} R_m \ln \frac{(2l+e)^2 e^2 + [(l+e)^2 + h^2]^2}{(l+e)^4 [(2l+e)^2 + h^2] (e^2 + h^2)}$$

donde R_m (radio promedio) en metros, J (magnetización) en Teslas, y h (logaritmo natural).

Todas las dimensiones (l , e y h) deben tener la misma unidad de longitud.

Cuando las dimensiones de esta chumacera elemental se modifican, la rigidez varía lentamente. La figura 1-31 muestra un ejemplo de esta variación para chumaceras construidas con anillos de sección rectangular ($h = l$): Las dimensiones en este ejemplo son las siguientes:

espacio de aire: $e = 1$ mm,

magnetización: $J = 1$ T,

radio promedio: $R_m = 25.5$ mm (el diámetro externo del imán interno es de 50 mm).

Para $l = h = 3$ mm, la rigidez es de 16 N/mm. Para 6 mm, esta logra los 27 N/mm.

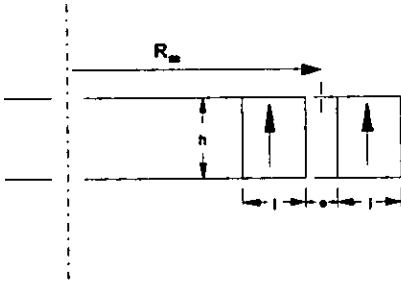


Fig. 1-30 Dimensiones geométricas de una chumacera magnética. Donde, R_m -radio promedio, e -espacio de aire, l -ancho del imán, h -altura del imán.

aunque el volumen del imán se ha cuadruplicado. La rigidez varía en la forma de l^3 , mientras que el volumen del imán aumenta en la forma de l^2 .

Cuando se requiere una mayor rigidez, se debe usar otra solución, es decir, se tienen que utilizar varias chumaceras elementales.

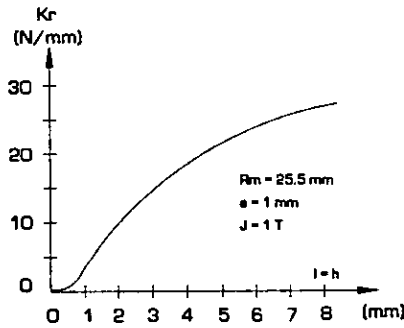


Fig. 1-31 Variación de la rigidez de una chumacera magnética elemental vs sus dimensiones l y h : $R_m=25.5 \text{ mm}$, $e = 1 \text{ mm}$, $J = 1 \text{ T}$.

1.6.2 Apilamiento de imanes repelentes

Las chumaceras se pueden apilar en forma vertical para incrementar la rigidez (fig. 1-32): esta solución ya se ha utilizado en aplicaciones industriales. La rigidez total K_{ym} obtenida, es aproximadamente igual a

$$K_{ym} \approx (2n - 1)K_r$$

Considerando nuevamente la forma de ejemplo con $h = l = 5$ mm para la chumacera elemental, la rigidez obtenida es $K_{ym} = 24.2$ N/mm. La tabla 1-2 muestra la rigidez resultante cuando se apilan n chumaceras elementales. Se verifica su dependencia $(2n-1)$.

n	K_{ym} (N/mm)	$(2n-1)K_r$
1	24.2	24.2
2	73.8	72.6
3	117.3	121.0
4	162.2	169.4

Tabla 1-2 Rigidez K_{ym} para una pila de n chumaceras elementales en comparación con la rigidez de una chumacera elemental sencilla.

Generalmente, cuando se apilan 4 chumaceras elementales, el volumen se multiplica por 4 y la rigidez por 7. Esta solución es muy interesante pero no se ha podido mejorar.

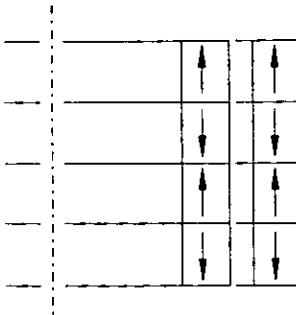


Fig. 1-32 Ejemplo de una sección cuadrada ($l=h$) chumacera apilada ($n=4$).

Apilamiento con magnetización en dirección alternada (RMD)

Algunas fuentes de campos magnéticos son construidas con imanes cuya dirección de magnetización, varía regularmente. Estas configuraciones, ya se han usado para sistemas magnetomecánicos como, acoplamiento magnético y dispositivos de separación magnética.

Para chumaceras magnéticas, tales configuraciones permiten un incremento de la rigidez de centrado.

La figura 1-33 presenta tal sistema. La sección magnética ideal puede ser demostrada para ser de:

$$h \approx \frac{l}{2}$$

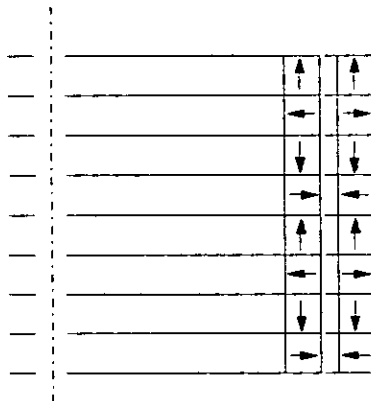


Fig. 1-33 Sistema de magnetización con dirección alternada: apilamiento de anillos magnetizados axial y radialmente ($h \approx l/2$). Con el mismo volumen como en el ejemplo de la fig 1-32, la rigidez es 1.8 veces más grande.

El sistema presentado en las figs. 1-32 y 1-33 contiene el mismo volumen de imanes, esto es, cuatro veces el volumen de una chumacera elemental. La rigidez del sistema de magnetización en dirección rotatoria es de aproximadamente el doble que la rigidez del sistema con apilamiento vertical, un mejoramiento considerable.

n	K_m (N/mm)	$(2n-1)K_r$	K_r (RMD)/ K_m
1	24.2	46.4	1.91
2	73.8	138.2	1.87
3	117.3	216.0	1.84
4	162.2	297.9	1.83

Tabla 1-3 Rigidez calculada K_r (RMD) y comparación con el apilamiento vertical de la misma altura.

La ganancia resultante se muestra en la tabla 1-3 como una función de la altura de la chumacera, por ejemplo, del número equivalente de chumaceras elementales apiladas. Su valor permanece entre 1.8 y 2.

Realización del apilamiento RMD

El sistema RMD brinda una gran mejoría en la rigidez de la chumacera y la relación "rigidez/volumen del imán", pero la realización de esta chumacera, es un poco más difícil. En un apilamiento convencional, cada división de la chumacera se puede construir con anillos de imanes de forma idéntica, magnetizados axialmente. Para el sistema RMD, los anillos magnetizados radialmente y los axiales se utilizan al mismo tiempo.

Conclusión

Se puede lograr una gran rigidez, solamente cuando se apilen chumaceras elementales. Para una chumacera sencilla, la rigidez crece más lentamente que el volumen del imán. El funcionamiento se puede mejorar notablemente por el apilamiento vertical de las chumaceras.

Una configuración original de apilamiento con magnetización en dirección rotacional, ha mostrado una mejoría en la rigidez por un factor de 1.8. La rigidez obtenida es doce veces más grande que la rigidez de dos anillos coaxiales de chumaceras elementales, con un volumen del imán cuatro veces más grande. Esta configuración tiene un interés muy importante.

CAPITULO 2

CHUMACERAS SUPERCONDUCTORAS

2.1 Propiedades de los superconductores

Los superconductores son materiales que tienen la habilidad de conducir la electricidad sin pérdida de energía. Cuando una corriente eléctrica fluye por un conductor normal, por ejemplo, en un alambre de cobre, se tiene pérdida de energía. En un foco o en un calentador eléctrico, la resistencia eléctrica genera luz y calor. En metales tales como el cobre y aluminio, la electricidad es conducida por los electrones de los niveles externos de energía los cuales emigran de un átomo al otro. Estos átomos forman una red vibrante dentro del metal (conductor); mientras más caliente se encuentre el metal mayor serán las vibraciones. Como los electrones se están moviendo a través de la red cristalina, chocan con pequeñas impurezas o imperfecciones en la red. Cuando estos electrones golpean con dichos obstáculos van a salir disparados en todas direcciones, perdiendo parte de su energía, en forma de calor.

Dentro de un superconductor el comportamiento de los electrones va a ser muy diferente. Tanto las impurezas, como la red atómica también se van a encontrar dentro de estos materiales, solo que el movimiento de los electrones superconductores a través de dichos obstáculos va a ser bastante diferente. Los electrones van a viajar a través del superconductor sin sufrir obstrucciones por parte de la compleja red. Debido a que no van a interactuar con ningún elemento, no se va a crear fricción y los electrones van a poder transmitir la electricidad sin pérdidas en la corriente y por ende, sin pérdida de energía.

La habilidad de los electrones de pasar a través del material superconductor sin obstrucciones se convirtió en un gran acertijo para los científicos por muchos años. El calentar más una sustancia o un material es ocasionarle una mayor vibración. Contrariamente, el ir enfriando más un material es irle disminuyendo esta vibración. En los primeros años los investigadores sugirieron que las menores vibraciones atómicas podían permitir que los electrones pasaran más fácilmente. Por lo tanto esto predecía una reducción gradual de la resistencia como función de la temperatura, y es que tales materiales, generalmente metales y aleaciones conducen la electricidad con muy poca resistencia solamente cuando son enfriados a temperaturas de unos cuantos grados por arriba del cero absoluto. En efecto, curiosamente sobre el comportamiento de la materia a bajas temperaturas fue como ésta llevo al fisico holandés Heike Kamerlingh Onnes a descubrir la superconductividad, en 1911. El descubrimiento se dió debido a que Onnes

logró su cometido de licuar helio, el último de los gases inertes en condensarse. El helio líquido le dio a Onnes la posibilidad de enfriar materiales a temperaturas cercanas al cero absoluto (Cero absoluto es igual a -458 grados Fahrenheit o -273 grados centígrados).

La resistencia cero al flujo de corriente, no era la única razón para el asombro. El comportamiento de los superconductores en un campo magnético generó una sorpresa igual cuando en 1933, dos físicos germanos Walther Meissner y Robert Ochsenfeld, encontraron que un superconductor puede expulsar campos magnéticos cuando es enfriado debajo de su temperatura de transición. La expulsión del campo magnético es conocida actualmente como "Efecto Meissner". Junto con la ausencia de resistencia, la habilidad de excluir campos magnéticos propició la enorme búsqueda e interés en la superconductividad.

Durante este época, la observación tuvo una lejana teoría para poder dar su explicación. La mecánica cuántica descubierta en los años 20's, sirvió para explicar la conducción en metales normales pero no se pudo explicar el estado de superconductividad. El problema pareció ser, particularmente intratable; los investigadores no lograron teorías significativas para el entendimiento de los orígenes microscópicos de la superconductividad sino hasta los años 50's. Entonces, 2 rusos, Vitaly L. Ginzburg y Lev P. Landau, propusieron una teoría fenomenológica. Estos científicos fueron capaces de formular una serie de ecuaciones que pudieran describir el fenómeno. Lo que si no pudieron, fue explicar porque ocurría.

El entendimiento de la superconductividad avanzó en 1957 gracias al trabajo de tres físicos americanos, John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer, quienes unieron sus teorías sobre la superconductividad para generar lo que actualmente se conoce como la Teoría BCS ¹⁸¹. Esta teoría explica la superconductividad en temperaturas cercanas al cero absoluto. Cooper estableció que las vibraciones de la red atómica eran las responsables directas de la unificación de la corriente. Estas vibraciones fuerzan a los electrones a viajar en parejas las cuales pueden pasar por todos los obstáculos sin ocasionar resistencia en el material. Estas parejas de electrones son conocidas como *pares de Cooper*. Cooper y sus alumnos sabían que los electrones, quienes normalmente se rechazan uno del otro, deberían de sentir una gran atracción en los superconductores. La respuesta a esta rara atracción si se le pudiera decir de esta manera, tenía que encontrarse en los fonones, presentes en la red cuando esta vibra.

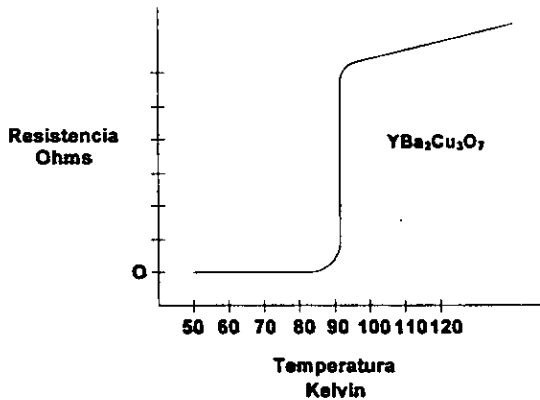


Fig. 2-1 Curva de Resistencia vs. Temperatura para un material superconductor de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

temperatura crítica (T_c). Debajo de esta temperatura de transición superconductor, la resistencia del material es cero (fig. 2-1). Superconductores hechos de diferentes materiales tienen diferentes valores de T_c . Entre los cerámicos superconductores, por ejemplo, el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ tiene una temperatura de transición de 91 K aprox., mientras que para el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ esta temperatura es a los 110 K, o bien, esta temperatura se puede presentar hasta por ejemplo, los 133 K como se da con un material desarrollado a fines de 1993 el $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ [7].

Debido a que no hay pérdida de energía eléctrica cuando los superconductores transportan corriente eléctrica, se pueden utilizar cables estrechos, para llevar grandes cantidades de corriente, aunque si bien, existe una corriente máxima que estos materiales pueden conducir, arriba de la cual dejan de ser superconductores. El valor de la "densidad de corriente crítica (J_c)", es una función de la temperatura; por ejemplo, mientras más frío se mantenga al superconductor mayor será la cantidad de corriente que este podrá transportar.

Para aplicaciones prácticas se requiere de valores más allá de 1000 amperes por milímetro cuadrado (A/mm^2).

Una corriente eléctrica circulando en un alambre, va a crear un campo magnético alrededor del alambre. La fuerza del campo magnético se incrementa cuando la corriente en el alambre aumenta. Debido a que los superconductores son capaces de transportar grandes cantidades de corriente sin pérdidas de energía, estos se pueden utilizar para hacer imanes superpotentes. Cuando un superconductor es enfriado por debajo de su temperatura de transición y se incrementa un campo magnético alrededor de este, el campo magnético se

Conforme el superconductor gana energía calorífica, las vibraciones en la red se empiezan a hacer más violentas y rompen los pares. Al momento en que estos pares comienzan a romperse la superconductividad disminuye. Los metales y aleaciones superconductoras presentan una temperatura de transición, que los va a transformar de conductores normales a superconductores, llamada

conserva a través del superconductor. Se utiliza la letra H como símbolo para representar al campo magnético el cual si se incrementa hasta un cierto punto, hará que el superconductor regrese a su estado normal de resistencia. El máximo valor para el campo magnético a una temperatura determinada es conocido como **campo magnético crítico** y se representa con H_c . Para todos los superconductores existe una región de temperatura y campos magnéticos dentro de la cual, el material es superconductor. Fuera de esta región, el material es normal. La figura 2-2 muestra la relación entre temperatura y campos magnéticos para superconductores del Tipo II, los cuales se caracterizan por tener dos campos magnéticos críticos.

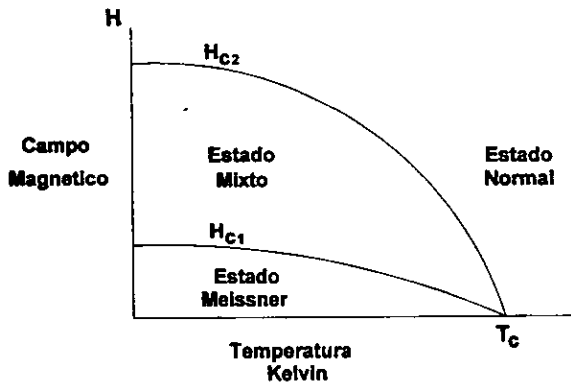


Figura 2-2

Referente al Estado Meissner, en este estado, se presenta la habilidad de un superconductor para expeler o rechazar un campo magnético aplicado. El efecto ocurre cuando un pequeño campo magnético es aplicado a un superconductor, creando corrientes que fluyen cerca de la superficie del material. Estas corrientes inducidas crean un campo magnético, que precisamente cancela el campo aplicado en el resto del material. La magnitud de estas corrientes decrece exponencialmente con el incremento de la distancia de la superficie del conductor. La superficie sobre la cual ocurre este decaimiento es llamada como la **profundidad de penetración magnética**. Esta profundidad es la distancia más corta sobre la cual el campo magnético puede cambiar en un superconductor. En superconductores típicos, esta longitud puede variar de cientos a decenas de miles de angstroms. (1 Å equivale a 10^{-10} m, los átomos en la mayoría de los materiales están espaciados de 1 a 3 Å unos de otros).

La figura 2-3 muestra lo que ocurre con un superconductor cuando es colocado en un campo magnético. Mientras la temperatura se encuentre más baja que la temperatura crítica (T_c), el superconductor expulsará de sí mismo al campo magnético. Esto se lleva a cabo debido a la formación de corrientes en su superficie, las cuales producen un campo magnético exactamente contrario, al campo externo, produciendo una especie de "espejo magnético". El superconductor es perfectamente diamagnético, expulsando a todo campo magnético de su interior. Este diamagnetismo perfecto, es quizás, la propiedad

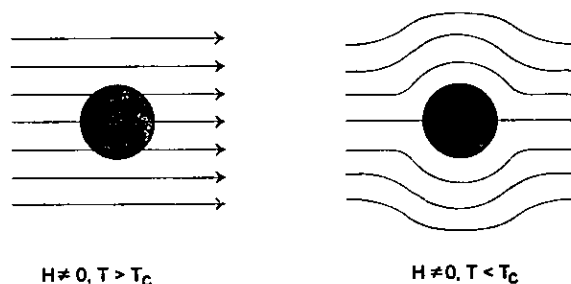


Figura 2-3

macroscópica más importante de un superconductor. Las líneas de campo no pueden penetrar al superconductor y la forma de las líneas se distorsiona, con lo que las líneas de flujo cercanas a la superficie, son paralelas a la superficie [8,10,11]. La configuración de éstas, es en este caso, similar a las que podrían aparecer si un segundo imán semejante (una imagen magnética), fuera puesta bajo la superficie superconductora a una distancia igual a la distancia del imán real de la superficie (fig. 2-4). Cuando se coloca un imán sobre un superconductor va a flotar a una altura a la cual la fuerza repulsiva entre el imán real y la imagen, es igual al peso del imán. No obstante, la fuerza del polo y el peso del imán determinan una única altura de levitación. Cualquiera que haya tratado de levitar un imán sobre otro imán sabe que es imposible mantener estable al imán debido a una carencia de estabilidad lateral. En 1945, Arkadiev superó esta dificultad al usar un superconductor de forma cóncava. Ya que cuando la superficie es cóncava, las fuerzas radiales repulsivas actuando en el imán tienen componentes horizontales dirigidas al centro del imán lo suficientemente fuertes, para darle al imán una estabilidad lateral.

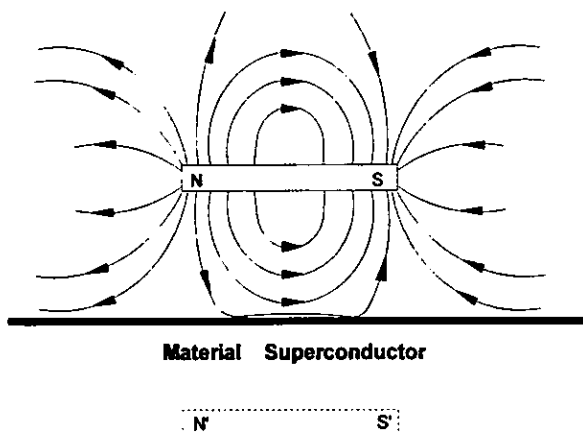


Fig. 2-4 Cuando un imán es puesto sobre un superconductor, la forma de las líneas de campo, se distorsionan, por lo que las líneas de flujo más cercanas a la superficie son paralelas a la superficie. Las líneas de flujo logran una configuración como se podría presentar, si un segundo imán similar (una imagen magnética) estuviera debajo de la muestra superconductora.

En la mayoría de los casos, cuando se coloca encima de un superconductor un imán, el campo magnético del imán, será lo suficientemente fuerte como para que algunas de sus líneas de campo, penetren al material, generando con esto, una región no superconductora. El imán, por lo tanto, no levitará tan fuerte como se dió en el momento de haberlo puesto en contacto con el superconductor. Debido al atrapamiento de este flujo, la fuerza de levitación en un imán sobre un superconductor del Tipo II es diferente cuando el imán se aproxima a la muestra, que cuando se está alejando, como se muestra en la figura 2-5. Cuando se acerca el imán, se alcanza el campo crítico mas bajo, H_{C1} , y más y más flujo penetra al superconductor. Cuando se aleja el imán, la fuerza repulsiva entre el imán y su imagen decrese. En suma, las líneas de flujo atrapadas causan una fuerza de atracción que reduce la fuerza repulsiva neta⁽¹⁴⁾. Esto resulta en un curva de fuerza vs distancia, la cual, presenta histéresis, como se aprecia en la figura 2-5. En dicha figura, la fuerza repulsiva, iguala el peso del imán, mg , en los puntos A y B, o en cualquier punto de la línea que los conecta. El punto B, representa la altura de levitación para un imán que se acerca al superconductor. Si se empuja el imán hacia abajo, sobre el superconductor y luego se libera hasta el punto C, el imán se moverá hasta el punto estable A. Del mismo modo que si el imán descansa en el superconductor cuando éste se está enfriando, el imán alcanzará el punto A.

Fuerza Repulsiva

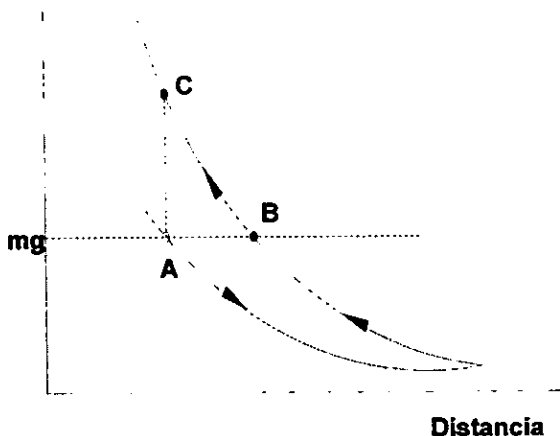


Fig. 2-5 Fuerza en un imán levantado sobre un superconductor del Tipo II. La curva superior representa la fuerza cuando el imán se aproxima, y la curva inferior la fuerza para el imán alejándose. Un imán cuyo peso es mg puede levitar establemente en el punto A, punto B, o cualquier punto en la línea punteada entre ellas.

En estas últimas líneas he mencionado a los superconductores del Tipo II, por lo que cabe señalar aquí, que existen dos tipos de superconductores, el Tipo I y el Tipo II. Muestras muy puras de plomo, mercurio y estaño, son ejemplos de superconductores del Tipo I. Superconductores de alta temperatura tales como, el $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) y el $Bi_2Sr_2CaCu_2O_9$, son ejemplos del Tipo II. La figura 2-6 muestra que cuando se aplica un campo magnético externo (eje de las abscisas-horizontal) a un superconductor del Tipo I, la magnetización inducida (eje de las ordenadas-vertical) se cancela exactamente con el campo aplicado hasta que existe un cambio abrupto del estado superconductor al estado normal. Los superconductores del Tipo I, son metales muy puros que generalmente presentan campos críticos muy bajos como para que puedan ser utilizados como imanes superconductores o super-imanes. La inducción magnética se mide en unidades de Gauss o en Tesla ($10 \text{ KGauss} = 1 \text{ Tesla}$). El campo magnético de la Tierra es de aprox. 0.5 Gauss . La inducción magnética en la superficie de un imán de neodimio-ferro-boro (NdFeB) es de aproximadamente 16 KGauss . El superconductor más fuerte del Tipo-I, el plomo puro, tiene un campo crítico de 800 gauss .

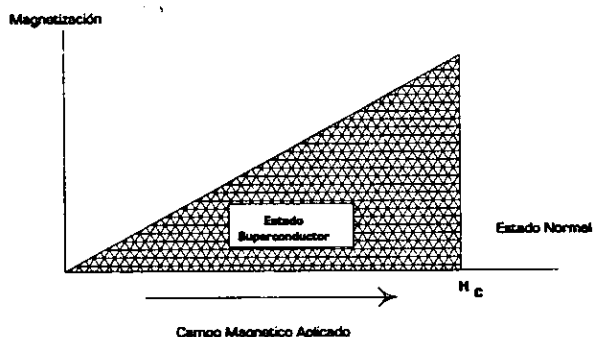


Fig. 2-6 Superconductor del Tipo I

Por lo que respecta a un material superconductor del Tipo II, en este, se pueden presentar tres estados magnéticos:

Primer Estado: es simplemente, el estado Meissner, que es el estado en el cual el material repele o rechaza completamente el campo aplicado. El superconductor existe en este estado, mientras el campo magnético aplicado, permanezca por debajo de un valor. Este campo, conocido como el campo crítico más bajo, depende de la temperatura.

Segundo Estado: este se conoce como "Estado Mixto", es decir, con una parte del material en estado normal, y la otra parte, en estado superconductor. Este estado surge, cuando el campo magnético aplicado, se incrementa a un mayor valor que el del campo crítico mas bajo. En este punto, el campo magnético, penetra al superconductor, aunque ni completa ni uniformemente. Además, formando incursiones tubulares, líneas discretas de flujo, del campo aplicado, llamadas vórtices, agujeran la muestra. Cada una de estas líneas es portadora exactamente de un quantum de flujo, $\phi_0 = hc/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$, donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y e la carga electrónica (13,14). El radio de los tubos de flujo es $\lambda \approx 2 \times 10^{-7} \text{ m}$ (la profundidad de penetración para campos magnéticos débiles) y el radio del vórtice es $\xi = (\phi_0 / 2\pi H_{c2})^{1/2} \approx 1 \times 10^{-9} \text{ m}$, en los óxidos superconductores, donde ambos λ y ξ son altamente anisotrópicos (por factores de 5 o más). La mecánica cuántica del superconductor requiere que cada línea de flujo tenga exactamente la misma magnitud. Esta unidad de flujo se conoce como, **cuanto de flujo**. Debido a que cada línea de flujo debe tener el mismo flujo, cualquier cambio en el campo magnético aplicado, puede cambiar la densidad de las líneas de flujo. En otras palabras,

conforme el campo magnético varíe, cambia la distancia entre las líneas. La configuración mínima de energía para tal arreglo de líneas de flujo, es una red triangular. La estructura de una línea de flujo individual, depende de la longitud de coherencia entre pares de electrones y de la profundidad de penetración.

Tercer Estado: sucede, si el campo magnético aplicado, alcanza un segundo punto crítico mas alto. Arriba de este campo crítico más alto, la superconductividad es destruida completamente, regresando al material, a su estado normal. La destrucción ocurre porque cuando se incrementa la fuerza del campo magnético, las líneas de vórtice se van juntando aún más, entre sí. Cuando los vórtices, se traslapan demasiado, se puede llegar hasta un punto en el que no exista un espacio suficiente entre ellos como para poder mantener la superconductividad.

La figura 2-7 muestra un superconductor del Tipo II en un campo magnético creciente. En esta gráfica se pueden notar H_{C1} y H_{C2} . Debajo de H_{C1} el superconductor expulsa todas las líneas de campo magnético. Para campos más fuertes, entre H_{C1} y H_{C2} , las líneas de campo empiezan a introducirse en el material.

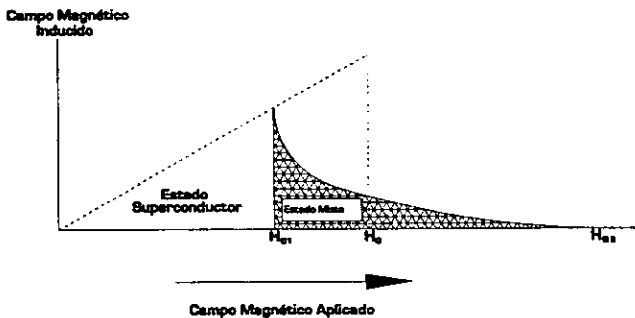


Fig. 2-7 Superconductor Tipo II

Los superconductores del tipo II, pueden resistir grandes campos, hasta lo que se conoce como, el campo crítico más alto. Los superconductores de $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO), por ejemplo, tienen campos críticos

superiores a 100 teslas. Todo esto, aunado con el hecho de que estos materiales pueden transportar mayores cantidades de corriente, ha dado por resultado, que la totalidad del interés tecnológico sobre los superconductores, incluyendo a los nuevos materiales de alta temperatura, sea, en los materiales de este tipo. Una ventaja adicional y reciente con el descubrimiento de los nuevos superconductores cerámicos de alta temperatura y que ha permitido que también el mundo científico se vuelque por estos materiales, es el hecho de

que éstos pueden ser enfriados fácilmente con nitrógeno líquido, el cual en mayoreo cuesta menos de 10 centavos de dólar por litro (comparado a los 5 dólares por un litro de helio líquido₍₁₂₎). Es más, aún, pequeños refrigeradores, de los usados en los laboratorios, pueden enfriar por abajo de la temperatura de transición de estos nuevos superconductores.

2.1.1 La química de los superconductores de alta temperatura

Los superconductores de alta temperatura son materiales cerámicos. El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) es un superconductor común del Tipo-II. Un elemento clave para el comportamiento de estos materiales es la presencia de planos conteniendo átomos de cobre y oxígeno unidos químicamente uno al otro. La naturaleza especial de la unión química de cobre-oxígeno permite conducir muy bien la electricidad en algunas direcciones. (Ver figura 2-9).

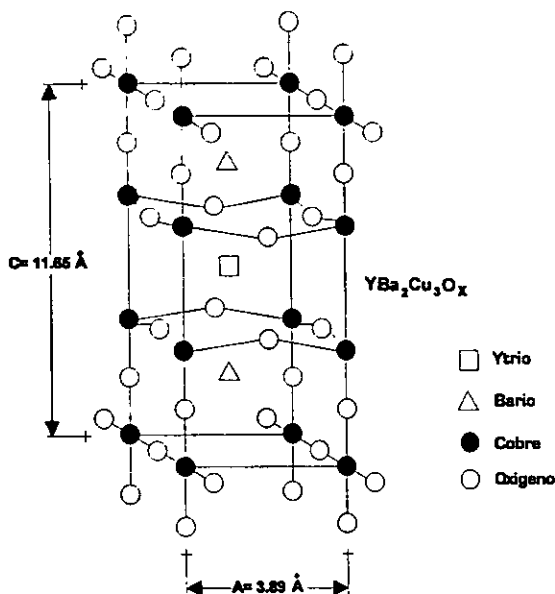


Fig. 2.9

El compuesto YBCO también conocido como 123, es muy sensible al contenido de oxígeno. Este cambia de un semiconductor en $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ a un superconductor con $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ cambiando ligeramente su estructura cristalina. La alta sensibilidad de los superconductores al contenido de oxígeno es debido a la aparente facilidad de que el oxígeno se puede mover adentro y afuera de la red cristalina. Usando el balance estándar de cargas para los elementos metálicos se podría esperar una fórmula

de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$. (no obstante se ha encontrado que estos superconductores usualmente tienen más átomos de oxígeno que lo predicho lo que implica que algunos átomos de cobre tengan una valencia de $3+$).

El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ muestra una muy interesante y compleja relación entre su química, estructura cristalina y sus propiedades físicas. Existe un balance de carga electrónica muy sutil entre las cadenas unidimensionales de cobre-oxígeno, las cuales varían con el contenido de oxígeno y los planos bidimensionales piramidales donde se origina la superconductividad.

En deficiencia de oxígeno en el sistema $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, el oxígeno es removido de las cadenas del CuO . Un superconductor a los 91 K es obtenido para $0 < x < 0.2$, un

superconductor en los 60 K para $0.3 < x < 0.55$, y un semiconductor antiferromagnético para $0.55 < x < 1.0$. Estos cambios en T_c como una función de x se muestran en la fig. 2-10.

El procedimiento para preparar las muestras de YBCO es muy similar al que se lleva a cabo con otras cerámicas. Todo lo que se necesita es un mortero y un pilo, un dado metálico para moldear y un horno bien ventilado además de los elementos químicos necesarios. Óxidos, carbonatos y nitratos son unas buenas fuentes para los metales necesarios para hacer el $YBa_2Cu_3O_x$. Ver procedimiento detallado en el capítulo 3.

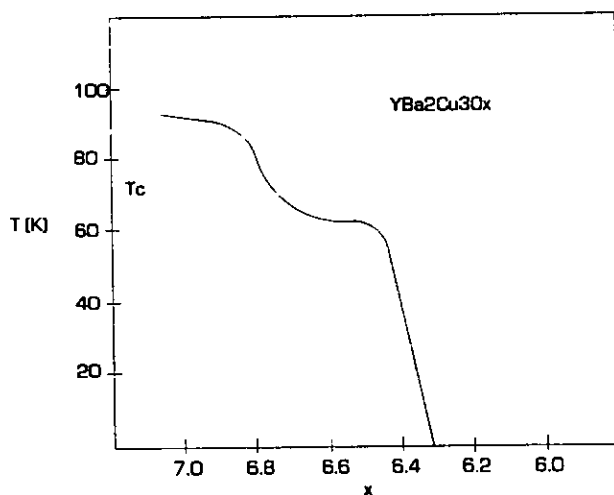


Fig. 2-10 T_c como una función del contenido de oxígeno en el $YBa_2Cu_3O_x$

2.2 Vórtices magnéticos en los superconductores

Un material superconductor está caracterizado por tres parámetros importantes: temperatura crítica (T_c), campo crítico (H_c) y densidad de corriente (J_c). Cada uno de estos parámetros estarán determinando las 2 principales propiedades de estos materiales. Para poder mantener el estado superconductor, es necesario que estos tres valores se encuentren por debajo de los valores críticos. El diagrama de fases en la figura (2-11) muestra la relación entre estos tres factores. Los valores más altos de H_c y J_c ocurren a 0 K, mientras que los valores más altos para T_c ocurren cuando H y J son cero.

Cuando se considera a estos tres parámetros, la curva representa una superficie crítica. De esta superficie y moviéndose hacia el origen, el material es superconductor. En regiones afuera de la superficie crítica, el material estará en estado mixto o en estado normal. T_c y H_c son valores favorables para que las parejas de electrones se empiezen a romper y se separen. Las

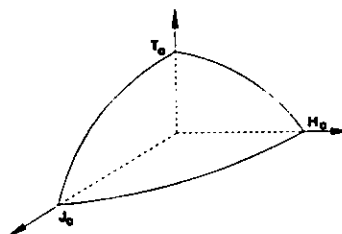


Fig. 2-11 Diagrama de Superficie de Fase Crítica

densidades de corriente más grandes que el valor crítico J_c , son forzadas a fluir a través de la parte del material que se encuentra en estado normal. Para la mayoría de las aplicaciones prácticas, los superconductores deben de ser capaces de transportar grandes cantidades de corriente y resistir altos campos magnéticos sin que el material vuelva a su estado normal.

Para poder tener valores grandes de H_c y J_c se dependerá de dos puntos importantes, los cuales van a influir en la minimización de energía del material; la profundidad de penetración (penetration depth) y la longitud de coherencia (coherence length). La profundidad de penetración es la longitud característica de la caída de un campo magnético debido a las corrientes de la superficie. La longitud de coherencia es una medida de la distancia más corta sobre la cual la superconductividad puede ser establecida. El porcentaje entre profundidad de penetración y la longitud de coherencia, es conocida, como el parámetro Ginzburg-Landau. Si este valor es más grande de 0.7, la expulsión completa del flujo no es lo favorablemente larga y una cierta cantidad de flujo puede penetrar al superconductor en forma de vórtices.

2.2.1 Anclamiento de los vórtices

Esta fase mixta va a ayudar a conservar la superconductividad entre H_{C1} y H_{C2} . Pero es muy importante que los vórtices no se muevan en respuesta a campos magnéticos si es que el superconductor se encuentra transportando grandes cantidades de corriente, ya que su movimiento resultaría en resistividad. Para campos menores que H_{C2} , la fuente primaria de resistencia, es la disipación debido al movimiento de los vórtices impidiéndole el paso a la corriente. Así, para que los superconductores del Tipo II tengan resistencia cero cuando los vórtices están presentes, se debe evitar su movimiento. Este movimiento de los vórtices se evita debido a que son atrapados efectivamente en sitios de defectos o imperfecciones de la red, tales como inclusiones, impurezas y las fronteras de grano. Estos sitios de fijación, además, pueden ser introducidos intencionalmente en el material superconductor por la adición de impurezas o a través de daños por radiación.

2.2.2 Influencia de los vórtices en las propiedades de transporte eléctrico.

¿Que tienen que ver los vórtices con la importante propiedad práctica de un superconductor, es decir, con su resistencia eléctrica?. ¿Porqué un líquido de vórtices afecta la resistencia del superconductor?.

La respuesta sería pensar en lo que pasa cuando se envía una corriente a través de un superconductor del Tipo II en un campo magnético aplicado. Recordando que cada línea de vórtice consiste de flujos de corriente, circulando alrededor de un núcleo normal (no-superconductor). Cuando una corriente aplicada fluye a través de la muestra, esta se agrega a la corriente circulante en un lado del vórtice y se substraee de éste, por el otro lado. Como resultado, una fuerza actúa en la línea del vórtice. La fuerza tiende a hacer que el vórtice se mueva en una dirección de ciertos grados para ambos lados, la línea de vórtice y la corriente aplicada. Específicamente, la disipación induce un voltaje y por lo mismo se genera una resistencia en la muestra.

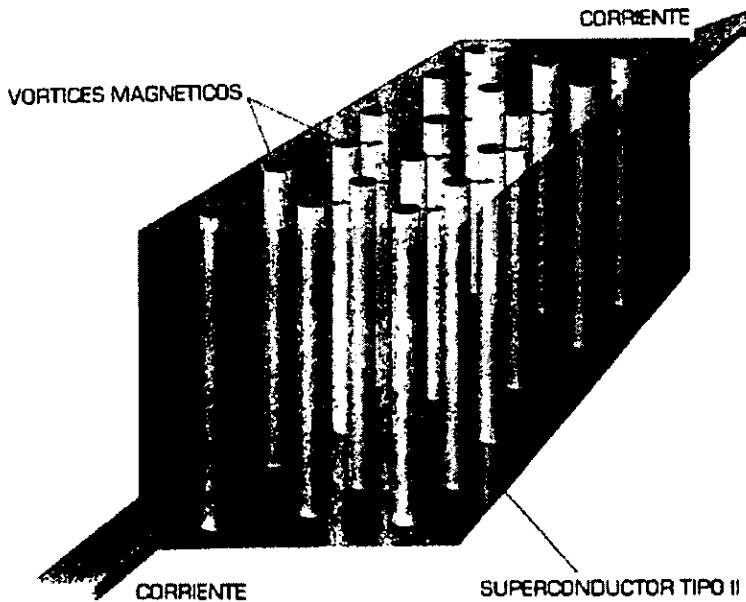


Fig. 2-12 El flujo de corriente a través de un superconductor (caja rectangular), se puede interrumpir por los vórtices (cilindros). Cada vórtice consiste de un anillo de corriente circulante inducida por un campo magnético externo (no mostrado). La corriente aplicada se une a la corriente circulante por un lado del vórtice pero se sale por el otro lado. La red resultante es una fuerza que empuja los vórtices en ángulos rectos al flujo de corriente; el movimiento disipa energía y produce resistencia.

Quizás, el camino más conveniente para entender el efecto, es imaginar líneas de vórtice en un superconductor como bandas de hule o de plástico. Las líneas de vórtice y las bandas de hule tienden a permanecer cercanas, debido a que al hacer a una línea más larga o estrechando una banda de hule, cuesta energía. No obstante, fluctuaciones térmicas se oponen a esa tendencia. Tales fluctuaciones, se llevan a cabo por los átomos en un sólido, y en el caso de las líneas de vórtice, éstas vibran con una gran amplitud con las elevaciones de la temperatura. Esta fuerza de restauración es una función de la longitud de coherencia, y la profundidad de penetración. Grandes longitudes de coherencia o cortas profundidades de penetración, producen una buena fuerza de restitución y limitan las vibraciones térmicas de las líneas de vórtice. la mayoría de los superconductores del Tipo II tienen tales características. La fuerza de restitución dominante mantiene las líneas rectas y cortas, además, las fluctuaciones térmicas de las líneas de vórtices son pequeñas.

Junto con la elevada temperatura de transición, los valores extremos de la longitud de coherencia y profundidad de penetración, ocasionan que largas fluctuaciones térmicas de las líneas de vórtice ocurran en los superconductores de alta temperatura. En efecto, a temperaturas lo suficientemente altas, las líneas vibran lo suficiente como para derretir la red de vórtices. Este fenómeno es similar al camino que siguen las vibraciones térmicas de las moléculas de agua, para que el hielo se derrita.

Mediciones de esta resistencia, muestran que el líquido de vórtices se comporta como agua común cerca del punto de deshielo. Se ha observado la resistencia en una pieza pura de superconductor de alta temperatura $YBa_2Cu_3O_7$, como una función de la temperatura en un campo magnético fijo. A altas temperaturas (que es la fase de líquido de vórtices), la resistencia indicada por los datos obtenidos, es alta. Disminuyendo la temperatura, el líquido de vórtices se congela en el estado de red de vórtices. Por lo tanto, las líneas no están libres de moverse en forma amplia y la resistencia desaparece.

Tales mediciones de la resistencia también muestran que el líquido de vórtices es ligeramente super-refrigerado antes de congelarlo. El fenómeno se asemeja al que se puede encontrar en el agua limpia, donde la fase puede mostrarse algo persistente debajo del punto de congelación. El super-refrigerar puede ser expresado de una manera más técnica visto en cómo el comportamiento de una sustancia en calentamiento presenta un comportamiento distinto al que presenta en el proceso de enfriamiento. Estos procesos se dice, presentan histéresis.

El líquido de vórtices se congela en una red regular, solamente si el material está limpio (es decir, en estado puro). Pero, ¿Qué pasa cuando el superconductor está "sucio", esto es, si impurezas y defectos residen en la red atómica?. La pregunta no es trivial, los superconductores avistados para usos tecnológicos deben inevitablemente estar sucios. En efecto, los investigadores trabajando con superconductores convencionales introdujeron cuidadosamente tales defectos al material. Generalmente, el superconductor sucio es el que mas corriente puede manejar. Tales imperfecciones son deseadas debido a que estas agujeran o atrapan vórtices y previenen luego su movimiento. Las líneas de vórtice prefieren asentarse en sitios de atrapamiento en la red cristalina porque al hacerlo de esta forma disminuyen su energía. La situación es análoga a la de un balón alrededor de la parte superior de una mesa que contiene unos cuantos hoyos pequeños. La experiencia común nos dice que el balón prefiere alojarse en uno de estos hoyos de la mesa, donde su energía potencial gravitacional es menor.

Los atrapamientos tienen un efecto característico en el vórtice sólido en un superconductor: estos interrumpen el patrón regular de la red que de otra manera se forma en un material puro ideal. En otras palabras, los atrapamientos previenen al material de condensarse en un vórtice sólido perfecto, en fuertes campos magnéticos. La fase que se forma, es a lo que los investigadores describen ahora como un vórtice de vidrio (vortex glass). El término es apropiado debido a que la posición de los vórtices forman un patrón irregular y desordenado, similar al que se genera por las moléculas en el vidrio.

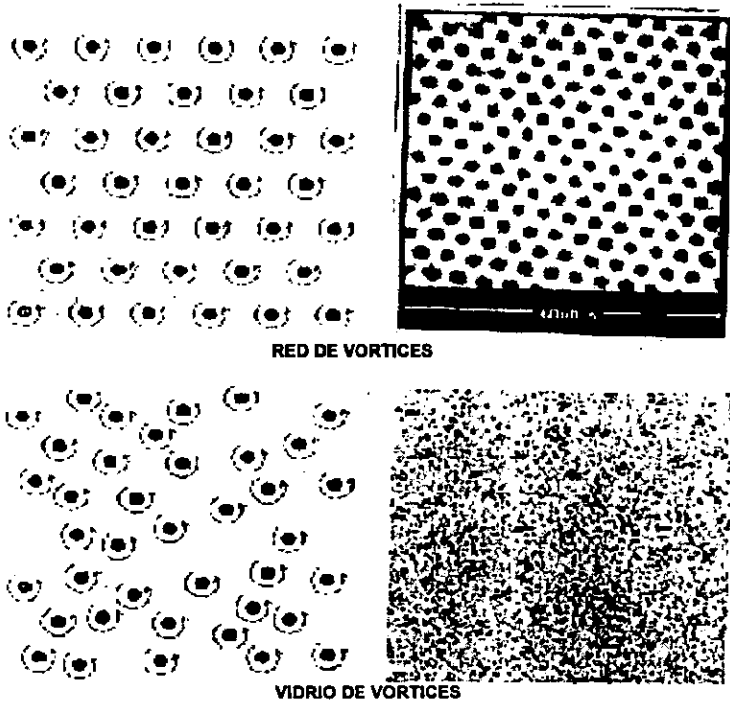


Fig. 2-13 Estados de un vórtice sólido. Un superconductor en un campo magnético se "congela" sólido en dos formas. Si el material es puro, las líneas de vórtice caerán dentro de un arreglo triangular regular, formando una red de vórtices. Si el compuesto tiene muchos defectos o impurezas, las líneas desarrollarán un patrón desordenado, formando un vórtice de vidrio.

2.2.3 Importancia de los vórtices magnéticos en el diseño de dispositivos

Los científicos están buscando activamente el tipo de defectos que puedan atrapar vórtices en forma más efectiva. Se puede decir que para algunas aplicaciones, es de mayor interés, el que se puedan tener buenos atrapamientos, para evitar que los vórtices se muevan y puedan generar resistencia. Sobre todo, en aquellas aplicaciones que tengan que ver con el transporte de corriente, como lo puede ser el caso de los cables superconductores o las enormes bobinas superconductoras, capaces de generar grandes campos magnéticos y almacenar enormes cantidades de corriente. Al lograr un buen atrapamiento, se pueda mejorar su capacidad de manejo de carga en presencia de grandes campos magnéticos, y por ende, hacer más efectivos a este tipo de dispositivos. Para algunas otras aplicaciones, como lo pueden ser las chumaceras, es más importante que el material pueda rechazar grandes campos magnéticos, (sin tenerse que preocupar tanto, por lo que suceda con su resistencia) para que puedan aumentar su capacidad de carga.

El actual entendimiento microscópico de los varios estados de los vórtices puede ayudar a los ingenieros y a los científicos, a mejorar los materiales para que se puedan dar las aplicaciones esperadas tan ansiosamente.

2.3 Diferentes aplicaciones de los superconductores

La superconductividad fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes en Leiden, solo tres años después de que el holandés, había tenido los primeros logros en la licuefacción del helio. Esto abrió la posibilidad de aplicaciones prácticas tales como, la producción de potentes electroimanes. En aquel tiempo, para obtener un campo de 100 kG en una bobina de cobre, se requerían alrededor de 1500 litros de aire líquido por hora. Onnes pensó que él podría solucionar el problema empleando una bobina superconductora enfriada en helio líquido. Sólo que debido a las bajas densidades de corriente que sus superconductores podían transportar, no fue posible que pudiera llevar a cabo con éxito sus planes (Onnes describió un obstáculo mayor solamente en un pie de nota, en el cual mencionaba que los alambres perdían la superconductividad con una intensidad de campo de unos 600 G en vez de los 100 kG que el había esperado. Todos los elementos puros con los cuales Onnes estuvo trabajando, tienen inicialmente, campos críticos H_c , menores de 1000 G). Los imanes superconductores generadores de altos campos, no se pudieron construir, sino hasta los años 60's y es en los últimos 10 a 15 años que la tecnología ha progresado lo suficiente como para llevar a cabo la construcción de imanes potentes. Solamente después del descubrimiento de los superconductores A-15¹ (17), por B. T. Matthias, Ted Geballe, J. K. Hulm y Eugene Kunsler al final de los años cincuenta el sueño de construir imanes superpotentes se pudo lograr. La habilidad de los compuestos A-15 junto con la llegada de la crisis energética resultó en actividades de búsquedas intensas en aplicaciones de gran escala durante los sesentas y setentas, en los Estados Unidos, URSS, Francia, Alemania, Japón, China y otros países (18).

En 1962, Brian Josephson predijo una corriente de pares de electrones superconductores que podía atravesar una unión aislante entre dos superconductores manteniendo la fase de coherencia de los pares y las funciones de onda en los dos lados de la unión; este efecto, fue verificado rápidamente, en forma experimental. Debido a este efecto, fueron investigadas, muchas aplicaciones de pequeña escala.

¹ La llamada estructura A15 es compartida por una serie de compuestos intermetálicos basados en niobio, los cuales van a producir varios superconductores con valores de T_c por arriba de los 15 K hasta la muestra con mayor temperatura en estos compuestos, 23 K, formada por NbGe. En efecto, la mayoría de las aplicaciones de la superconductividad que dependen de la habilidad de transportar gran cantidad de corriente en la presencia de altos campos magnéticos, sigue siendo de uso de 2 compuestos de esta clase, exclusivamente: NbTi con una $T_c = 8$ K y el Nb₃Sn con una $T_c = 18.1$ K.

No obstante, debido a que las T_c 's eran relativamente bajas, todos estos dispositivos requerían refrigeración de helio-líquido, y por lo mismo, tanto las aplicaciones comerciales como militares e industriales fueron desarrollándose muy despacio. El reciente descubrimiento de los superconductores de alta temperatura en 1986, ha despertado un gran interés a nivel mundial en torno a la posible realización de las aplicaciones planteadas con los superconductores convencionales así como otras aplicaciones que se han pensado, aprovechando las propiedades que estos nuevos materiales ofrecen.

La mayor parte de las aplicaciones que actualmente están siendo exploradas, son extensiones de la tecnología usada con los superconductores de baja temperatura. Las aplicaciones de los superconductores de alta temperatura incluyen, aparatos de apantallamiento magnético, sistemas médicos de imágenes, SQUIDS (Superconductor Quantum Interference Devices), sensores infrarrojos, elementos para procesamiento de señales analógicas y equipos de microondas, en la transmisión de potencia, o en elaboración de imanes superconductores [para utilizarlos, principalmente, en generadores, plantas almacenadoras de energía (SMES)^[1,10], aceleradores de partículas, en la fabricación de vehículos levitados, en maquinaria de rotación, como por ejemplo, las chumaceras y en separadores magnéticos]^[20,21].

La habilidad de los superconductores para conducir la electricidad sin resistencia, puede ser explotada en el uso de las líneas de transmisión. Actualmente, una parte considerable de la electricidad generada se pierde en calor, debido a la resistencia asociada con los conductores tradicionales, tales como, el cobre y el aluminio. En gran medida, para poder cambiar a la tecnología de los superconductores, se dependerá del tipo de cables que puedan ser preparados con los quebradizos cerámicos y que mantengan su superconductividad por arriba de los 77 K mientras estén soportando, grandes densidades de corriente.

El uso de los superconductores para el transporte ya ha sido establecido usando helio líquido como refrigerante. En Japón y en Alemania se han construido prototipos de trenes levitados, usando imanes superconductores.

Los imanes superconductores son ya elementos, cruciales de varias tecnologías. Las imágenes por resonancia magnética (MRI), actualmente, están jugando un papel muy importante en los diagnósticos médicos. Los intensos campos magnéticos que se necesitan para estos instrumentos, son una perfecta aplicación de los superconductores. De forma similar, los aceleradores de partículas usados en estudios de física son muy dependientes de altos-campos de los imanes superconductores. La actual controversia alrededor de la construcción del Super Colisionador Superconductor (SCS) muestra las ramificaciones políticas de las aplicaciones de esta nueva tecnología.

En el campo de la electrónica también se tienen grandes promesas para aplicaciones prácticas con los superconductores. La miniaturización e incremento de la velocidad en circuitos, digamos, para computadoras (microprocesadores y demás circuitos integrados), se han visto limitados por la generación de calor y el tiempo de carga de los capacitores, debido a la resistencia que presentan las pistas (de interconexión) que contienen todos estos circuitos y que, generalmente son de cobre. El uso de nuevas películas superconductoras podrá resultar en una mayor densidad de empaquetamiento (mayor factor en la escala de integración), lo cual, permitirá que la información se pueda transmitir más rápidamente en varias órdenes de magnitud. La electrónica superconductora ha logrado resultados impresionantes en el campo de la electrónica digital. Se han demostrado ya experimentalmente, tiempos de retardos lógicos de 13 picosegundos y tiempos de conmutación de 9 picosegundos. A través del uso de uniones básicas de Josephson, los científicos están siendo capaces de hacer detectores de microondas sumamente sensibles, magnetómetros, SQUIDS y fuentes de voltaje muy estables.

2.3.1 Aplicaciones de Gran Escala de los Superconductores de Alta Temperatura

Las aplicaciones de gran escala de mayor interés en la industria eléctrica y de potencia, junto con sus densidades de corriente crítica y requerimientos de campo, son mencionadas en la tabla 2-4. Cada una de estas aplicaciones, ha sido demostrada usando tecnología superconductora convencional, con temperatura de helio líquido, así que, un cambio a una operación con temperaturas de nitrógeno líquido puede que no represente beneficios revolucionarios, pero eso sí, para aquellas aplicaciones donde la refrigeración con helio es el gasto principal, se esperan los siguientes beneficios: menores capitales y costos de operación, disminución en la complejidad e incremento en la seguridad de operación. En un reporte preparado en el Laboratorio Nacional de Argonne, se estimaron ahorros en el capital y en los costos de operación de entre un 7 a un 36 % para aquellos sistemas de alta T_c , en comparación con los sistemas de baja T_c , basados en el uso de superconductores de Nb_3Sn [22].

APLICACION	Jc (A/cm ²)	CAMPO (Tesla)
Generadores de a.c.	10 ⁵	5.5
Transmisión de d.c.	10 ⁴	≈ 0
Transmisión de a.c. (1000 MVA)	10 ⁵	≈ 0
Transformadores	10 ⁵ +	3.0
Limitadores de corriente de falla	10 ⁵ +	> 5.0
Almacenadores de Energía (5000 MWh)	2×10 ⁵	5.0
Separación Magnética	3×10 ⁴	2-5
Fusión	10 ⁵	10-15

Tabla 2-4 Jc y campo aplicado para aplicaciones de gran escala⁽²²⁾.

Nuevas aplicaciones de los superconductores aparecerán, conforme se aumente la temperatura crítica. Los superconductores que requieren del nitrógeno líquido le han dado a la industria, mayor flexibilidad para utilizar la superconductividad, en comparación con los superconductores con temperaturas de helio-líquido. Como se mencionó en la sección anterior, actualmente un litro de helio líquido cuesta 5 dólares mientras que un litro de nitrógeno líquido cuesta 10 centavos de dólar, es decir, el aumento de la temperatura crítica con los nuevos materiales cerámicos ha permitido reducir mínimo en 50 veces los costos de los proyectos que anteriormente se tenían para los superconductores de baja temperatura. El posible descubrimiento de superconductores a temperatura ambiente, tiene el potencial de traer a estos materiales a nuestra vida diaria.

Los superconductores de alta temperatura son innovaciones recientes de los laboratorios de investigación. Nuevos elementos comerciales comenzarán con la existencia del conocimiento tecnológico generado por los investigadores, del trabajo de centros de comercialización en el desarrollo de nuevos productos, así como, de la necesidad de los ingenieros de implementar nueva tecnología. La superconductividad ha tenido ya una larga historia como un campo especializado de la física. A través de esfuerzos de colaboración de centros de investigación fundados por algunos gobiernos, grupos de investigadores independientes e industrias comerciales, las aplicaciones de los nuevos superconductores de alta temperatura están ya en un futuro no lejano. No obstante, tiempos de retraso entre los nuevos descubrimientos y las aplicaciones prácticas, son todavía grandes. El descubrimiento del láser al inicio de los 60's, no pudo ser aprovechado sino hasta hace

poco a través de aplicaciones, tales como, cirugía por láser, comunicaciones con fibras ópticas y actualmente también en los discos compactos utilizados en las computadoras y en los equipos de sonido. El rápido progreso en el campo de la superconductividad me lleva a creer que las aplicaciones con los superconductores, estarán limitadas solamente por el tiempo y la imaginación.

A continuación describo algunas de las aplicaciones que actualmente ya están operando en el mercado utilizando principalmente, superconductores convencionales de baja temperatura, así como también, mencionaré algunas aplicaciones planteadas y en las que actualmente ya se encuentran trabajando varios laboratorios en el mundo, utilizando a los superconductores convencionales o a los nuevos superconductores de alta temperatura.

2.3.1.1 Sistemas de Transmisión de Potencia

Como una forma de responder a la problemática sobre el incremento en la demanda de la energía eléctrica, ya se han propuesto usar líneas de transmisión de potencia de extra alto voltaje (≥ 500 kV). Estas líneas pueden reducir también el costo de los alambres de cobre así como de las pérdidas de I^2R , pero las objeciones a estas líneas son:

1. la pérdida de seguridad por causa de aislantes contaminados, el rompimiento de líneas o torres durante las tormentas.
2. son causantes de interferencias de radiofrecuencia.
3. efectos electromagnéticos en hombres, plantas y animales.
4. contaminación visual por causa de las grandes torres y líneas.
5. la presencia de líneas aéreas en el área urbana donde generalmente el espacio, no está disponible.

La solución a estos problemas, fue el uso de líneas de transmisión superconductoras, debido a que estas presentan las siguientes ventajas:

- I. son subterráneas, es decir, no hay contaminación visual y es mucho menor el espacio ocupado.
- II. casi 100 % de eficiencia de transmisión (las pérdidas de refrigeración son de aprox. 10 W/ft; para una línea de 160 kilómetros a 5 GW, la pérdida es de solamente, ~0.05%). Para sistemas de transmisión muy grandes (10,000 MVA, 230 KV), se estimó un ahorro del 23 %.

Sin embargo, cualquier ahorro en el costo para líneas de transmisión ya sea que se base en materiales de alta o baja T_c , deben contender con el hecho de que las líneas de transmisión aéreas convencionales son de 10 a 30 veces, más baratas de instalar que los cables subterráneos. El mayor estudio para el avance de transmisión subterránea fue llevado a cabo por la Compañía Eléctrica de Filadelfia para el Departamento de Energía de los E.U. Esta compañía concluyó, que sistemas superconductores usando cables flexibles, eran tanto técnica como económicamente, competitivos con el diseño de otros cables avanzados. Solo que la desaparición de la crisis energética al final de los años setenta, originó que los recursos para la búsqueda de estos materiales disminuyeran.

La posibilidad de usar los nuevos superconductores de alta temperatura es un desafío existente. Pero para que estos puedan ser útiles deben poseer una alta densidad de corriente crítica superconductora, así como también, deben de contar con buenas propiedades mecánicas. A la fecha, el problema de las altas densidades de corriente parece solucionada, ahora solo falta mejorar la parte de las propiedades mecánicas.

EPRI (The Electric Power Research Institute) cree que las líneas de transmisión superconductoras pueden ser la primera aplicación comercial de gran escala con los materiales de alta T_{c24} .

2.3.1.2 Almacenadores de Energía Magnética Superconductora (SMES):

Los criterios para sistemas de almacenamiento de energía eléctrica útiles, son:

1. Alta eficiencia.
2. No-contaminantes.
3. De fácil adaptación.
4. Costo efectivo.
5. Alta seguridad de servicio.
6. Bajos requerimientos de mantenimiento.
7. Periodos largos de vida.

Los almacenadores de energía magnética superconductora (SMES) satisfacen estos criterios.

Los almacenadores de energía magnética superconductora o SMES, han surgido como una aplicación que actualmente está recibiendo gran atención, aún a pesar de que ésta, se le ha estado estudiando por muchos años. El almacenamiento de energía en las noches cuando la demanda eléctrica es de menos del 50 % que la demandada en la hora pico y usarla para ayudar a hacer frente a aquellas cargas pico, representan un sistema de operación de

potencia mucho más eficiente. Los imanes superconductores pueden almacenar la energía sin ninguna pérdida y pueden ser descargados periódicamente para alimentarse con el regreso de energía en un sistema con una eficiencia estimada del 95% en contraste al 75% de eficiencia asociada con el almacenamiento de bombeo hidroeléctrico, o el 65% de eficiencia, para el almacenamiento de una batería. Ambos sistemas SMES, grandes y pequeños, están siendo considerados.

El corazón de una SMES, es una bobina superconductora con inductancia L . Esta bobina, almacena la energía en forma de un campo magnético: $E = LI^2/2$, donde I , es la corriente eléctrica. Para las necesidades eléctricas, se requieren bobinas muy grandes. Por ejemplo, para una capacidad de 100 MWh, el diámetro de una bobina SMES es de alrededor de 150 m con una altura de ~8 m y un peso de $\sim 0.08 \times 10^6$ Kg de alambres de Co/Nb-Ti. La fuerza de salida generada por la bobina es de 8×10^9 N. Pero para un sistema SMES de 500 MWh, el diámetro alcanza los 630 m, unos 20 m de altura y un peso de 1.20×10^6 Kg. La fuerza de salida es tremenda, 79×10^9 N, lo que hace que ningún acero pueda soportar el stress generado. Pero una ventaja en el costo de una SMES es que no sigue las reglas que son hechas para otro tipo de almacenadores, debido a que el campo magnético es producido dentro de un volumen que es establecido por los conductores en una superficie (por ejemplo, duplicando la altura y el diámetro de una bobina SMES, lleva a un incremento de la energía por un factor de 8, mientras que la cantidad de superconductor y la superficie de refrigeración, se incrementan por un factor de 4). Esto indica que el costo por unidad de una planta SMES, decrecerá, incrementando el tamaño. Si los materiales superconductores de alta temperatura son desarrollados con buenas propiedades tanto eléctricas como mecánicas, el diseño y el costo de una planta SMES se verá afectada positivamente^[22]. Aunque, los sistemas SMES, aparecen comercialmente atractivos aún sin materiales de alta T_c , los cuales, solamente, podrían reducir los costos del capital, de entre un 5 a un 8 %, en comparación con un sistema de baja T_c . EPRI piensa que esta puede ser la segunda aplicación de gran escala para los materiales de alta T_c .

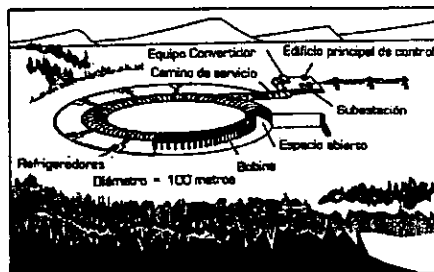


Fig. 2-A1 Una presentación artística de una planta piloto SMES.

2.3.1.3 Imanes Superconductores

Como resultado de la detonación del dispositivo STARFISH de 1.4 megatones a una altitud de 400 kilómetros sobre la isla Johnston en 1962, producto de esta fusión, se generaron electrones con una energía de alrededor de 7 MeV, los cuales, fueron atrapados por el campo magnético de la tierra. Al poco tiempo de la detonación, como resultado de la radiación obtenida, 3 satélites diferentes fallaron. Debido a esta problemática, pareció que la única posibilidad práctica para evitar este tipo de fallas por tal radiación, era la construcción de un vehículo-espacial de tipo escudo, el cual fue diseñado utilizando largas bobinas superconductoras, productoras de altos campos magnéticos, con el objetivo de deflectar el bombardeo de estos electrones, en los sistemas de guía de los satélites. La bobina construida, fue de 1.80m de diámetro, con 6000 vueltas de alambre superconductor de Nb- 25% Zr, la cual se tenía pensado colocarla justo en la superficie del vehículo. Este era el imán mas largo de ese tiempo, sin embargo, este nunca fue instalado en algún satélite o vehículo.

A la fecha, la imagen por resonancia magnética (MRI), con sus necesidades para largos diámetros (1m), alta intensidad de campos magnéticos (1-2T) con rigurosa uniformidad, produjo la primera aplicación comercial práctica de gran escala de la superconductividad, debido a su habilidad para proveer de información sobre la química de la fisiología humana, sin invasión y sin exposición de radiación ionizante.

Como una forma de ahorrar energía, los imanes superconductores han sido amplia y exitosamente usados en aceleradores, tales como, el Tevatrón en Fermilab. Aunque el propuesto Super Colisionador Superconductor (SCS) del cual los físicos y en general el mundo científico tenían muchas esperanzas, actualmente el Congreso de los E.U. negó la aprobación del presupuesto para seguir con la construcción de este mega-proyecto, por lo que habrá que esperar a un futuro para ver si este proyecto se puede concluir.

La fusión nuclear también requiere de imanes superconductores, los más grandes en el programa de fusión, están en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, California. La primera de sus dos bobinas de 340 Ton, con alambres de Nb-Ti, fue probada exitosamente generando un campo de 8 T en 1982.

Transformadores, limitadores de corriente de falla y separadores magnéticos para remover sulfuro y otras impurezas del carbón antes de que se queme, separar materiales paramagnéticos y materiales ferromagnéticos o en la industria del caolín, para separar sustancias magnéticas de la arcilla; representan otras aplicaciones potenciales de interés, de gran escala, para la industria eléctrica.

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 este y ser apartadas del agua.

2.3.1.4 Maquinaria Eléctrica

Usando a los materiales superconductores en maquinarias eléctricas de rotación, es probablemente donde surgirán más rápidamente aplicaciones de gran escala, debido a que solo se requiere de una densidad de corriente crítica de $\sim 10^4$ A/cm², la cual, ya fue ampliamente superada. La alta densidad de corriente, puede resultar en ahorros sustanciales de peso (alrededor de 33 %). Resulta interesante hacer notar que, en relación a un generador convencional de 300 MW; aunque este sea más barato de inicio, en comparación con un generador superconductor sumergido en helio líquido, éste último, va a ser más efectivo en relación al costo, debido a su alta eficiencia. Y si se utilizan superconductores de alta temperatura, el costo del capital podría ser reducido en un 40 % en relación con los materiales superconductores convencionales, esto, debido a la eliminación de los sistemas de refrigeración requeridos para el sistema de enfriamiento en helio, aumentando con esto, la efectividad en relación al costo en los sistemas de alta temperatura.

Para un motor de 1500 caballos, la eficiencia radicaré en la eliminación del 30 % de pérdidas en el rotor de cobre, el cual es usado, en los motores convencionales. Tomando en cuenta los requerimientos de potencia de un refrigerador de nitrógeno líquido, los diseños con superconductores de alta T_c pueden tener en este tipo de motor, unos ahorros esperados del 24 %, comparables a los costos de un motor convencional.

Los generadores se pueden beneficiar por ser más pequeños, ligeros y más eficientes, con ahorros estimados por Argonne de un 27 %, para sistemas de 300 MW.

2.3.1.5 Motores Superconductores

Una variedad de motores puede ser considerada para diseños de materiales superconductores de alta T_c.

Inducción
Inducción/Híbrido Síncrono
Reluctancia
Inductor homopolar
Homopolar de d.c.
Síncrono de d.c.

Mientras todos los tipos de motores mostrados en la lista anterior han sido considerados para diseños con superconductores, los 2 últimos, han sido demostrados actualmente en las aplicaciones con superconductores.

Si entran en el diseño los superconductores cerámicos de alta temperatura, estos deben ser capaces de resistir las fuerzas mecánicas a la cual el alambre es sujeto normalmente. Sin embargo, el estudio de un diseño que asumió una densidad de corriente de 105 A/cm^2 , en presencia de un campo magnético de 5T (una proyección de un futuro trabajo de los cerámicos de alta temperatura, para un motor de 10,000 caballos de fuerza), dirige a la conclusión de que las pérdidas son aproximadamente del 40 % de las obtenidas en un diseño de un motor síncrono convencional. Además, la gráfica de eficiencia versus carga para el motor superconductor, es mucho más plana que la de motores convencionales. Esto, es de considerable importancia en aplicaciones donde la operación bajo condiciones de carga reducida, representa una gran proporción del servicio del motor.

En adición a estas ventajas, el volumen del motor superconductor, es de solamente un 30%, en relación con el volumen utilizado con un motor convencional.

Mientras que los requerimientos de enfriamiento generalmente hacen más favorables a las aplicaciones de motores de gran escala que a los de pequeña escala, existen aplicaciones espaciales, donde los requerimientos particulares de la aplicación o de la disponibilidad de refrigeración lleva a la consideración de motores superconductores de pequeña escala.

2.3.1.6 Trenes levitados magnéticamente (MagLev):

Debido al congestionamiento en las principales arterias terrestres, así como, el tráfico aéreo actual, tanto para hacer negocios entre ciudades, como para viajes, hace necesaria la generación de un transporte que sea eficiente. Por estos importantes factores, la transportación por tierra con vehículos de alta velocidad, ha cobrado importancia.

Las dos tecnologías principales de los vehículos de alta velocidad son: el sistema de alta velocidad con sistemas de rieles y ruedas de acero (tales como el tren bala de Japón o el francés TGV) y el sistema de vehículos levitados magnéticamente (MagLev). Dos problemas llegan a ser importantes a altas velocidades para los clásicos trenes de ferrocarriles: la transmisión de energía y el contacto entre el riel y la rueda (fuerza de soporte, stress mecánico, dirección y uso). Estos problemas limitan las velocidades comerciales superiores a los 400 Km/h, aún a pesar de que el TGV francés haya corrido a 515.3 Km/h, el 18 de mayo de 1990₍₂₃₎. Los vehículos MagLev están suprimiendo estos dos problemas y están ofreciendo una nueva forma avanzada para la transportación, aunque tienen que probar su

capacidad para transportar personas a velocidades iguales o mayores de los 500 Km/h. Por esta razón, los vehículos MagLev, son frecuentemente comparados para realizar la labor de las rutas aéreas cortas, en vez de los trenes. El problema para la potencia de propulsión se mantiene en todos los casos a altas velocidades, debido a que la potencia aerodinámica se incrementa al cubo de la velocidad. El uso de tubos de baja presión puede reducir esta potencia de propulsión.

El interés en el sistema MagLev, además, de su posibilidad para viajar a altas velocidades, es su bajo nivel de ruido, ausencia de uso de la vía y un viaje de calidad. No obstante, los ruidos aerodinámicos empiezan a dominar a altas velocidades en comparación con los ruidos por rodamiento (generalmente abajo de los 300 Km/h).

Existen dos sistemas MagLev: de *repulsión* y de *atracción*.

El sistema atractivo ha sido investigado, principalmente, en Alemania y Estados Unidos. Como es sabido, la fuerza magnética entre un material ferromagnético colocado en el seno de un campo magnético y la fuente que genera al campo magnético es siempre atractiva. El peso del vehículo es sostenido por esta fuerza atractiva. Las características básicas de este sistema son:

- 1) A causa de la presencia de material ferromagnético, el campo magnético necesario puede ser generado por electroimanes convencionales hechos de metales normales.
- 2) El uso de electroimanes de metal normal, requieren de una pequeña brecha de alrededor de 1 cm entre el material ferromagnético y los electroimanes. Aun con un diseño óptimo, utilizando metal normal, el costo es mucho menor cuando se utilizan electroimanes superconductores;
- 3) la fuerza magnética, aumenta cuando la brecha se hace más pequeña y disminuye cuando el espacio aumenta, lo cual significa que el sistema es inherentemente inestable, y es necesario para lograr su estabilización, el contar con un mecanismo de retroalimentación que le permita regular la corriente y por lo tanto, la fuerza atractiva.

Aunque no se puede hacer ninguna conclusión negativa acerca del sistema atractivo, éste presenta, al menos dos desventajas cuando se trata de velocidades superiores a 250 Km/h. La primera es la pequeña brecha en la cual debe operar. Una razón fundamental por la que el tren convencional de ruedas y rieles no puede viajar a velocidades superiores a los 300 Km/h es porque su posición vertical tiene que ser mantenida dentro de una variación no mayor de 2 milímetros sobre una distancia de 10 metros. La segunda razón es que el sistema es intrínsecamente inestable con respecto al movimiento vertical. Estas dos desventajas, si bien no hacen imposible la operación a alta velocidad, si requieren una gran

cantidad de energía eléctrica para lograr mantener una brecha del tamaño adecuado para velocidades mayores de 250 Km/h. Se ha sugerido que los electroimanes de metal normal sean sustituidos por electroimanes superconductores y hacer posible, con ellos, una brecha de mucho mayor tamaño. La contraparte de este posible beneficio, radica en la dificultad de controlar las corrientes necesarias para estabilizar la posición vertical.

En lo que se refiere al sistema de levitación por repulsión se puede decir que presenta mejores perspectivas.

Este sistema funciona como una aplicación de la ley de Lenz de inducción de corrientes eléctricas al tener campos magnéticos que varían con el tiempo, en cuyo seno, existe una espira de material conductor. El campo magnético que genera la corriente inducida da lugar a un campo magnético que tiene una polaridad opuesta al campo magnético original, creándose, una repulsión entre ambos campos magnéticos.

Un aspecto importante del sistema repulsivo, es la disipación de energía que se da en el conductor. Esta es una pérdida, por la resistencia eléctrica del material conductor. Esta disipación depende de la frecuencia de excitación y tiene un máximo, para un cierto valor de la frecuencia. Sin embargo, tiende a cero conforme la frecuencia de excitación crece hacia valores más grandes.

La característica más importante del sistema repulsivo, en lo que se refiere a la transportación masiva, es la utilización de electroimanes superconductores para proporcionar los campos magnéticos requeridos. Los electroimanes superconductores hacen posible generar un campo magnético intenso en un volumen grande y esto tiene profundos efectos en el diseño del sistema. Los puntos sobresalientes del sistema son:

- 1) La brecha entre los electroimanes y el material superconductor puede ser, al menos, unas 10 veces mayor (100, 150 mm), que para el caso atractivo (10 a 15 mm). Esto es de gran importancia en el diseño y operación de vehículos de alta velocidad.
- 2) Un campo magnético intenso, generado sobre un gran volumen por los electroimanes superconductores, puede incorporarse fácilmente a un mecanismo de propulsión y de esta forma, se tiene que, tanto los mecanismos de suspensión (levitación), como los de propulsión, son compatibles.

Los superconductores de alta temperatura deben reducir considerablemente el costo de los sistemas de suspensión primarios, sin mencionar los ahorros debido al uso de nitrógeno líquido de un bajo costo en comparación con el de helio líquido en un rango de 20 a 1.

Programa Japonés: hago mención de este programa, porque es en el país en donde actualmente, se está trabajando con mayor intensidad.

Los japoneses iniciaron su programa en 1970⁽²³⁾ y hasta la fecha, han elaborado 8 vehículos de entre 2 a 20 toneladas (tabla 2), los cuales han sido probados en un riel de 7 Km de longitud. Sus estudios siempre han implicado el sistema electrodinámico, usando una bobina superconductor a bordo. Su vehículo ML500 es famoso debido a su récord mundial de velocidad de 517 Km/h, en 1979. Los vehículos MLU 002 y MLU 002N están cerca de una versión comercial, con una longitud de 22 m y un peso mayor de 17 toneladas. El MLU 002N ha reemplazado al MLU002, el cual fue destruido por un incendio en 1991, debido a la ponchadura de una llanta.

Año	Nombre	Longitud	Peso	Particularidad
1972	LSM 200	4 m	2 tons	Motor asíncrono
	ML 100	7m	3.5 tons	
1975	ML 100A	5m	3.6 tons	Récord Mundial 517 Km/h
1977	ML 500	13.5 m	10 tons	
1979	ML 500R	12.6 m	12.7 tons	
1980	MLU 001	10 m	10 tons	
1987	MLU 002	22 m	17 tons	
1993	MLU 002N	22 m	20 tons	

Tabla 2-5 Vehículos de prueba MagLev desarrollados en Japón

En 1989, fue propuesta la construcción de una nueva vía de prueba para determinar la capacidad real de los sistemas MagLev, en un diseño cercano a parecerse a un siguiente diseño comercial. Esta vía, en estos momentos en construcción, puede formar parte de una futura unión entre Tokio y Osaka. En este tren, se llevan a cabo por un solo imán superconductor, las tres funciones principales de operación, de este tipo de sistemas, la levitación, la guía y la propulsión. En el riel, la levitación y la guía, se logran a través de 8 bobinas. Esta geometría suprime el arrastre magnético a bajas velocidades cuando el vehículo es soportado por las ruedas: el centro de las 8 bobinas está en el eje de enrollamiento superconductor. A grandes velocidades, cuando se consigue la levitación, las ruedas se levantan y las 8 bobinas inducen una gran levitación y a su vez generan fuerzas de guía.

2.3.1.7 Aplicaciones Navales

La mayoría de las aplicaciones de potencia derivan de la aplicación de altos campos magnéticos y los bobinados superconductores proveen la posibilidad de sistemas más pequeños de los que pueden ser logrados usando métodos convencionales. En algunos casos la aplicación de la superconductividad es la única forma de producir campos lo suficientemente fuertes [24].

Las siguientes aplicaciones de potencia naval han sido identificadas actualmente y su posible desarrollo depende del avance que se tenga con los materiales superconductores de alta temperatura o para los propios bobinados, generadores de campos magnéticos.

- (a) Limitadores de corriente de falla de d.c
- (b) Chumaceras electromagnéticas
- (c) Montajes electromagnéticos anti-vibración
- (d) Motores y generadores para propulsión de barcos
- (e) Propulsión de barcos por MHD
- (f) Armamento y embarcaciones

2.3.1.7.a Barcos de propulsión por MHD (Magneto Hidro Dinamica):

Los primeros estudios de MHD fueron realizados en los E.U., durante los sesentas. Pero la necesidad de altas inducciones magnéticas ($> 5T$) en volúmenes grandes (varios m^3) para que la propulsión por MHD pudiera ser interesante, desde un punto de vista de eficiencia retardaron su desarrollo. El actual nivel de desarrollo de las bobinas superconductoras hace prácticamente posible considerar a esta tecnología y actualmente por todo el mundo, numerosos programas están en desarrollo. La propulsión MHD ofrece grandes ventajas, tales como, alta eficiencia, velocidad, una notoria maniobrabilidad y durabilidad y una mejor flexibilidad en la carga útil, entre otras ventajas.

El concepto, es proveer de un gran campo magnético usando un imán superconductor y hacer pasar luego una corriente de d.c. a través del agua de mar entre unos electrodos colocados en ángulos rectos al campo magnético, con lo que el agua experimenta una fuerza de Lorentz. En la práctica, el sistema referido consiste de un ducto cilíndrico con electrodos internos a través de su longitud. Las bobinas superconductoras son arregladas para producir un campo magnético uniforme en el ducto mutuamente en ángulos rectos a la

corriente entre los electrodos y el flujo de agua de mar inducida. Varios de estos ductos son encerrados en un recipiente cilíndrico con un escudo magnético externo para eliminar la fuga de flujo. Un modelo a escala manejado de un MHD, usando helio líquido y bobinas superconductoras, fue construido y probado en Japón.

El problema principal, es que la mayoría de la energía se transforma en calentamiento del agua de mar y, a menos de que la conductividad eléctrica de esta se pueda incrementar significativamente, tales pérdidas, siempre serán muy altas. En suma, una reacción electroquímica produce hidrógeno y gases de cloro. Los Japoneses han sugerido mezclar el agua con ácido, pero aún se mantienen los problemas, por lo que es poco probable que un sistema MHD pueda ser la propulsión principal para un barco, pero de todas formas ellos han construido un prototipo de este sistema, en un barco de 150 toneladas.

Programa Japonés: En 1985, la fundación Barco y Océano emprendió la búsqueda de barcos civiles impulsados por MHD^[24]. Este proyecto reunió tanto a oficiales como a personas de universidades y de industrias. Esto incluyó la elaboración experimental de un barco completo, llamado Yamato I. Este barco de tamaño significativo, fue completado en 1991, y en estos momentos, está bajo prueba en el mar. Esta es el primer gran barco con propulsión MHD. El Yamato I es impulsado por 2 propulsores electromagnéticos localizados en 2 salientes en el casco, debajo del barco. Cada propulsor está compuesto de 6 dipolos superconductores de un calibre de 360 mm en un crióstato sencillo con un refrigerador de helio. Los dipolos están arreglados para minimizar el escape del campo magnético afuera del impulsor.

En cuanto a las aplicaciones navales es posible que el concepto pueda ser usado como un propulsor de baja potencia, por ejemplo para suministrar el empuje de un submarino a baja velocidad. A pesar de que esto puede proveer un sistema de propulsión ultra-silencioso, y asumiendo que los problemas mencionados puedan ser resueltos, la presencia del ruido en la generación de una planta de potencia, parece ser más significativo.

2.3.2 Aplicaciones de Pequeña-Escala

Aplicaciones electrónicas superconductoras

La mayoría de los dispositivos electrónicos superconductores dependen de enlaces débiles, es decir, si existe una unión débil conectando dos superconductores (tal y como lo puede

ser, una barrera de una capa delgada de óxido), es posible tener un flujo de corriente debido a un "par de tunelaje" a través de la barrera, sin ningún voltaje. El fenómeno es conocido como el efecto Josephson de d.c. y los dispositivos basados en esta propiedad son llamados, Uniones Josephson. Si se excede de la corriente crítica añadiendo una pequeña señal de corriente a la corriente de operación, o poniendo la unión en un campo magnético, el dispositivo es conmutado desde cero a un voltaje finito. Manteniendo un voltaje externo a través de una unión Josephson, lleva a oscilaciones en la supercorriente. Contrariamente, si la unión es expuesta a una señal de a.c., la corriente-voltaje característica, desarrolla una estructura de escalón. Estos efectos son llamados efectos Josephson de a.c. y son la base para osciladores y detectores.

Probablemente la aplicación de pequeña-escala más simple y más directa de los superconductores de alta T_c , es como un elemento bolométrico, en un detector infrarrojo. La labor del superconductor como un dispositivo, dependerá de la capacidad calorífica del detector, además, la temperatura del nitrógeno líquido no puede competir con la operación a la temperatura del helio líquido cuando existe un interés en la sensibilidad (ya que mientras mas baja sea la temperatura a la cual se encuentra el superconductor, mayor será su sensibilidad).

Los efectos Josephson de dc y ac han sido utilizados para fabricar, voltímetros y magnetómetros muy precisos, elementos de computación y la generación, mezcla y detección de ondas electromagnéticas en el rango de microondas hasta IR.

2.3.2.1 SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices)

La mayoría de los dispositivos Josephson maduros, son los SQUIDs^[25,26].

Un SQUID es simplemente tener dos uniones Josephson conectadas con un anillo. La corriente que fluye alrededor del anillo es sensible al campo magnético. Conectándolo en un circuito apropiado, se pueden hacer mediciones sensibles en un amplio rango de parámetros físicos, incluyendo, voltaje, resistencia, gradiente de campo magnético, susceptibilidad magnética y desplazamiento. En efecto, con la sensibilidad del SQUID en medir dichas cantidades, hace posible muchos experimentos que de otra forma no se podrían ni contemplar. El flujo asociado con un flujo de corriente, puede ser detectado y hace de los Magnetómetros SQUID, un detector sensitivo de corriente y voltaje así como de campos magnéticos. Los SQUIDs más sensibles a 4.2 K, pueden detectar 10^{-6} de un flujo cuántico, es decir, $\sim 10^{-13}$ Gcm². Estos son en varios órdenes de magnitud, más sensibles que los actuales instrumentos competentes para detección de campos magnéticos y gradientes de campo.

Los científicos han puesto a los dos tipos de SQUID, rf y dc, en una gran cantidad de usos, para muchas áreas. Mediciones logradas en laboratorios permiten determinar las susceptibilidades magnéticas de muestras diminutas, sobre un amplio rango de temperatura, detección de resonancia magnética nuclear y ruido termométrico, el cual, se refiere al uso de mediciones de ruido para determinar la temperatura.

Sin embargo, ya hace algún tiempo que los SQUIDS salieron de los laboratorios criogénicos para servir en aplicaciones en las cuales, la fuente de señal no está refrigerada.

Actualmente ya han sido manejados a 77 K, SQUIDS hechos de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, demostrando que estos pueden ser realizados aún a pesar de que su trabajo, todavía, sea inadecuado. También, se han instalado dispositivos Josephson, en circuitos de prueba de alta velocidad. Actualmente se encuentra disponible un instrumento comercial con una respuesta del orden de una magnitud más rápida que el mejor osciloscopio convencional disponible. Si los problemas asociados con la fabricación de las uniones puede ser resuelta para los nuevos superconductores, el incremento en el ruido que viene de los 77 K en comparación con la operación a 4 K será compensada por un incremento en el valor de la brecha de energía. Esto debe generar ahorros substanciales en costo y pueden resultar unos instrumentos mucho mas convenientes.

Una área de crecimiento importante es en biomagnetismo, en donde los investigadores han usado a los SQUIDS para estudiar los campos magnéticos generados por el corazón y el cerebro, para detectar movimientos del ojo y para detectar impulsos magnéticos generados por nervios aislados del corazón, por dar sólo unos ejemplos.

Otra área importante es en Geofísica; magnetotélúricos, magnetismo en rocas y paleomagnetismo, por ejemplo. También los SQUIDS pueden ser usados en experimentos de gran-escala, como por ejemplo, en antenas de ondas gravitatorias (detectan radiación gravitacional que puede emitir una estrella colapsante) o detectores de monopolos magnéticos^[27,28,29].

2.3.2.2 Magnetómetros

Entre muchas aplicaciones de los SQUID, sus aplicaciones al biomagnetismo han sido de lo más interesante. las señales biomagnéticas son pequeñas, aprox. de $10 \mu\text{G}$ obtenidas del corazón, a señales tan pequeñas como $10^{-2} \mu\text{G}$, provenientes del cerebro. Con los superconductores de alta temperatura (HTSC), las señales que se estén censando podrán ser captadas con una mayor definición.

2.3.2.3 Circuitos Digitales

El tiempo de conmutación más corto por compuerta para una unión Josephson de Nb operada a 4.2 K, es de 2.5 μ s. El voltaje de operación V_o es proporcional a la T_c del material usado. Para un superconductor de Nb con $T_c = 9K$, $V_o \sim 3$ mV. Por lo tanto es de esperar un voltaje de operación de 30 mV, para un superconductor de alta T_c a 90 K. Para compensar el ruido térmico a altas temperaturas, se requiere de una gran cantidad de corriente. Para un dispositivo de conmutación Josephson de baja temperatura, la corriente de operación I_o es de 0.1 - 0.5 mA. Acorde a esto, a 77 K se pueden tener $I_o \sim 2 - 10$ mA. Esto resulta en un incremento en el consumo de potencia por un factor de 200 operando a 77 K con los superconductores de alta T_c . Este consumo, eleva la temperatura, lo que hace que dispositivos Josephson de densidades mayores, a 77 K, sean difíciles de lograr^[30].

El tiempo de conmutación para una compuerta Josephson es determinado por la constante de tiempo RC, donde C es la capacitancia de la unión y R es la impedancia de la línea plana. Cuando se usen los superconductores de alta T_c , se espera que las dimensiones de la unión, sean aproximadamente iguales que con las uniones superconductoras de baja temperatura. Por lo que, si las barreras de la unión son las mismas, C debe ser la misma para una unión usando superconductores de alta T_c . Aproximadamente, $R \approx V_o/I_o$ y se espera sea lo mismo para ambos conmutadores a 4.2 y 77 K. Como resultado de esto, el tiempo de conmutación para una unión Josephson de un superconductor de alta temperatura a 77 K, será el mismo que para una unión de baja temperatura, operada a 4.2 K. Teóricamente, el tiempo límite de conmutación τ es $\tau \approx h/E_g$. Para un superconductor de Nb con $E_g \sim 3$ mV, τ es de 0.2 ps, lo cual es 10 veces más corto de lo obtenido hoy en día. Para registrar tiempos de conmutación más cortos, se tiene que reducir C. La dimensión de la unión se ha reducido a 0.1 μ m.

El grupo de Fujitsu construyó un microprocesador Josephson de 4 bits a 4.2 K. Este microprocesador es una orden en magnitud más rápido que el usado con GaAs y además presenta un consumo de potencia mucho menor.

2.3.3 Aplicaciones usando Películas Delgadas Superconductoras

2.3.3.1 Sensores de Campos Magnéticos

Para una película cerámica de HTSC, la resistencia a 77 K, es sensible a campos magnéticos. Tsuchimoto y sus colaboradores en Sharp Corp., hicieron un sensor con

película superconductor operado a 77 K, para medir campos magnéticos. Este sensor magnético tiene una sensibilidad de $\pm 1 \text{ mG}_{100}$.

Únicamente Películas Delgadas:

Actualmente, hay un interés considerable en componentes pasivos de microondas, usando los materiales superconductores de alta temperatura. Las pérdidas en microondas son mucho más pequeñas en comparación con los metales normales como el cobre, por lo que, este es un incentivo para hacer dispositivos pasivos tales como, antenas, filtros, resonadores y registros de corrimiento. Se pueden obtener buenos resultados ya sea con el YBaCuO o el TlBaCaCuO , debido a que ambos han mostrado tener una resistencia superficial baja. Otra aplicación para películas delgadas de los superconductores de alta temperatura, es para la fabricación de bolómetros. Trabajos recientes han mostrado un funcionamiento comparable con los mejores detectores piroeléctricos [31].

Películas y uniones sin histéresis:

Los magnetómetros SQUID de d.c. requieren uniones sin histéresis. El detector de efecto Josephson o mezclador, opera con un arreglo similar, pero con una I_c que varía con la corriente RF aplicada, antes que con un campo magnético estático. Este dispositivo, también requiere una unión sin histéresis. Se han encontrado más éxitos en la tecnología de baja temperatura con mezcladores de unión-túnel de cuasipartículas, que con dispositivos de efecto Josephson, pero si las uniones-túnel no están disponibles con superconductores de alta temperatura, se pueden considerar los detectores de efecto Josephson o mezcladores, teniendo una actuación que puede ser comparada con dispositivos semiconductores competitivos tales como el diodo Schottky. También existen una gran cantidad de circuitos que transfieren corrientes entre varias derivaciones los cuales pueden funcionar con uniones sin histéresis, incluyendo convertidores A/D, registros de corrimiento y varias familias lógicas.

A continuación, presento una tabla de aplicaciones actuales, así como posibles aplicaciones utilizando a los superconductores dentro del ramo de la electrónica [32].

**MERCADOS ANTICIPADOS PARA COMPONENTES Y SISTEMAS SUPERCONDUCTORES
APLICACIONES PARA INGENIERÍA ELECTRICA-ELECTRÓNICA**

Mercado	Componentes Superconductores	Beneficios potenciales
Sensores Magnéticos: Diagnósticos Médicos Magnetoencefalograma (MEG) Magnetocardiograma (MKG) Estudio Geofísico Excavadoras de explotación forestal Magnetotelúricos Evaluación no-destruictiva Detección de anomalías magnéticas	LTS/HTS SQUID magnetómetro HTS SQUID magnetómetro HTS SQUID magnetómetro HTS SQUID magnetómetro HTS SQUID magnetómetro HTS/LTS SQUID magnetómetro	Monitoreo sin contacto de la actividad eléctrica del cerebro Monitoreo sin contacto de la actividad eléctrica del corazón Acrecentará la resolución en sensores magnéticos para la exploración de aceite y petróleo Sistema de campo por sensamiento magnético de minerales Evaluación sensitiva de defectos inaccesibles u ocultos Detección magnética de submarinos y minas
Sensores Infrarrojos: Espectrómetros IR arreglo	HTS Bolómetros HTS microbolómetro o detector JJ	Un amplio ancho de banda Mayor sensibilidad y rapidez
Bobinas magnéticas sensibles: Sistemas MRI (Imágenes por resonancia magnética)	HTS bobinas magnéticas sensibles	Detección de señales de bajo nivel en sistemas de campo débil
Comunicaciones por Microondas: Satélites de comunicaciones Satélites de comunicación e inteligencia electrónica Radares y procesamiento de señales de comunicación Radares, comunicaciones e instrumentación	Antenas alimentadoras y elementos de control Bancos de filtros Líneas de retraso Resonadores con un amplio ancho de banda	Reducirá pérdidas de señal y distorsión, tamaño, peso y potencia Reducida pérdida de señal, gran selectividad de canales, reducción de tamaño, peso y potencia Incrementa el ancho de banda y capacidad de almacenamiento en un tamaño reducido Estables y con una generación de señal de bajo ruido

<p>Telecomunicaciones:</p> <p>Centrales de telefonía</p> <p>Interfaces electrónicas de fibra óptica</p>	<p>Interruptores Josephson</p> <p>Moduladores y demoduladores Josephson</p>	<p>Resolución de contención de alta velocidad</p> <p>Gran cantidad de manejo de datos en circuitos de baja potencia</p>
<p>Electrónica Digital:</p> <p>Imagen y procesamiento de señales</p> <p>Estaciones de trabajo de gran poder</p> <p>Procesamiento de señales vía satélite</p> <p>Módulos multicircuitos fríos</p> <p>Supercomputadoras</p>	<p>Procesadores digitales Josephson</p> <p>Registros de corrimiento Josephson</p> <p>Procesadores Josephson</p> <p>HTS Interconectores</p> <p>Circuitos A / D Josephson</p> <p>Multiplexores</p> <p>HTS Conectores</p> <p>Procesadores Josephson</p>	<p>La proporción más alta en computación</p> <p>La proporción más alta de datos</p> <p>La proporción más alta en computación</p> <p>Incrementa la densidad</p> <p>Operaciones en alta velocidad</p> <p>Baja potencia de disipación</p> <p>Incremento de densidad</p> <p>Manufacturabilidad mejorada</p> <p>La mas alta velocidad; incremento en la densidad; baja potencia de disipación</p>
<p>Instrumentación:</p> <p>Adquisición y despliegue de ondas de forma</p> <p>Reflectómetros en el dominio del tiempo (TDR)</p> <p>Mediciones en el tiempo y frecuencia</p> <p>Medidores de voltaje</p> <p>Medidores de corriente</p>	<p>Muestreadores Josephson</p> <p>Convertidores A / D Josephson</p> <p>Circuitos Josephson TDR</p> <p>Arbitro de carrera Josephson ?</p> <p>Contadores Josephson y circuitos de reloj</p> <p>Voltaje normal Josephson</p> <p>Instrumentos SQUID</p>	<p>Alta sensibilidad y velocidad</p> <p>Alta velocidad y precisión</p> <p>Alta resolución espacial</p> <p>Resolución en tiempos de sub-pico segundos</p> <p>Actuación normal-primaria</p> <p>Alta sensibilidad</p>

2.4 Diferentes tipos de chumaceras superconductoras

Mientras que la mayoría de los investigadores centran sus esfuerzos por utilizar a los nuevos materiales cerámicos superconductores, por el lado de la fabricación de cables, alambres, películas delgadas, o en circuitos electrónicos que puedan ser empleados principalmente en supercomputadoras, un pequeño grupo de ingenieros y físicos, cree que las primeras aplicaciones de estos materiales, pueden ser por el lado de las chumaceras tanto pasivas como activas, las cuales pueden venir a revolucionar el mundo de los motores.

Aunque todas las aplicaciones parecen enfocarse a los temas ya mencionados, no hay que olvidar que se está hablando de materiales cerámicos (elementos quebradizos), por lo que para poder tener materiales que sean lo suficientemente buenos para presentar las propiedades de cables competitivos con relación a los actuales conductores normales o desarrollar una tecnología aparentemente compleja con las uniones Josephson, lo cual puede distar de poder ser controlado completamente, existe, para otro grupo de investigadores, tanto ingenieros como físicos, otra aplicación que, parece ser que, con la actual tecnología en los materiales de itrio-bario-óxido de cobre, desarrollados a través de un proceso como el "templado de líquido" o "texturizado por fusión", se presentan propiedades que los hacen ser, lo suficientemente buenos como para ser usados en las chumaceras magnéticas superconductoras pasivas, por lo que en estos momentos, además de tomar en cuenta las condiciones actuales de tecnología en nuestro país, siento que la hace ser, la aplicación más viable para tomar la delantera de entre todas las demás aplicaciones, tanto en México como a nivel mundial, es por esta razón, por la cual tomamos la decisión, tanto mi asesor como un servidor, de enfocarnos a hablar del desarrollo de chumaceras magnéticas superconductoras pasivas, un desarrollo que a nivel mundial, ha empezado a cobrar importancia desde hace unos cuatro años.

Aunque se necesita de mucho trabajo de ingeniería para incorporar estas chumaceras en dispositivos que puedan dar mucho de que hablar, el material por sí mismo, parece ser lo suficientemente bueno para hacer chumaceras sin mucho más refinamiento. Se cree que estos materiales tienen hoy en día, por lo menos en términos de su interacción con los imanes permanentes, más o menos logrado todo el atrapamiento de flujo y la posibilidad de generar la fuerza de levitación que estos necesitan, esto lo han señalado varios investigadores, entre ellos, John Hull, Director de la Sección de Aplicaciones de Superconductividad en la División de Materiales y Componentes Tecnológicos en el Departamento de Energía de Estados Unidos en el Laboratorio Nacional de Argonne, y Wei-Kan Chu, Director del Centro de Texas para la Superconductividad en la Universidad de Houston (TcSUH), quien tiene a su cargo a 150 personas trabajando en todos los aspectos

de los superconductores de alta temperatura. Todos ellos han sacado por conclusión de que en términos de aplicaciones de masa, las chumaceras pasivas son una de las aplicaciones más factibles en un corto tiempo⁽³³⁾.

Pero aún a pesar de que las chumaceras superconductoras pueden ser una de las aplicaciones más prometedoras en un corto plazo, todavía no han logrado conseguir el mismo apoyo, que se ha destinado (tanto en número de investigadores, como de dólares), para los cables y las películas delgadas. Un pequeño grupo de investigadores repartidos a través de, aproximadamente, 20 laboratorios de instituciones, gobiernos e industrias, están haciendo pruebas con chumaceras superconductoras en ciudades tales como, E.U., Japón, Francia, Italia, Alemania, Suiza, Noruega, Comunidad de Estados Independientes (ex Unión Soviética), Israel y Australia. Algunas de las compañías conocidas por tener investigadores en chumaceras superconductoras son, Allied-Signal, Lockheed, Ford, AT&T, Eastman Kodak, Creare, Canon, Sat-Con Technology, Koyo Seiko, Emerson Electric, HiTc Superconco, United Technologies Corp., Mechanical Technologies Inc. y Vacuumschmelze.

Aun a pesar de que los superconductores son en estos momentos lo suficientemente buenos para ser usados en chumaceras, algunos investigadores aun quieren mejorar estos materiales, ya que, mejorando sus propiedades, tanto para poder conseguir una mejor capacidad de carga, como lograr una mayor temperatura de operación, o bien ambos, podrá ser posible un mayor número de aplicaciones⁽³³⁾.

Tanto el desarrollo de los materiales, como el desarrollo de las chumaceras, se está llevando a cabo al mismo tiempo en varios laboratorios, y si los diseñadores quieren estar seguros de no tener sorpresas después, es ahora que se deben tomar en cuenta varios factores importantes para que estos nuevos materiales puedan ser de utilidad, como, fuerza mecánica, expectativa de vida, y la habilidad de las chumaceras de resistir las vibraciones.

2.4.1 Principio de Funcionamiento

Las chumaceras superconductoras de alta temperatura son, en su mayoría, unos dispositivos simples, los cuales aprovechan el efecto Meissner, el cual se puede presentar al utilizar a un superconductor de alta temperatura como un estator y a un imán permanente para el rotor. La fuerza magnética de repulsión entre el estator y el rotor, ocasiona que este último, se mantenga suspendido en el aire, haciendo que pueda girar libremente, teniendo únicamente fricción en el sistema, causada por aerodinámica (fricción del aire) y una fricción por arrastre magnético. Si el rotor trata de moverse fuera del centro de la chumacera en cualquier dirección, una fuerza restauradora que se piensa es desarrollada por los centros de atrapamiento de flujo magnético, lo regresan a su lugar. Esto es conocido

como la "rigidez" de la chumacera. Esta rigidez es probablemente, la segunda propiedad más importante de las chumaceras magnéticas después de la presión de levitación. El diseño de una chumacera puede variar de una chumacera cilíndrica radial (donde el rotor está suspendido por un cilindro o anillo superconductor de alta temperatura, el cual, actúa como una chumacera radial) a diseños abiertos, donde el rotor (imán), flota sobre el estator (superconductor), el cual es mantenido lateralmente en su lugar, solamente por el flujo atrapado (fig. 2-15). El ejemplo más simple para este segundo tipo, es el famoso imán flotante sobre un superconductor^[14,34].

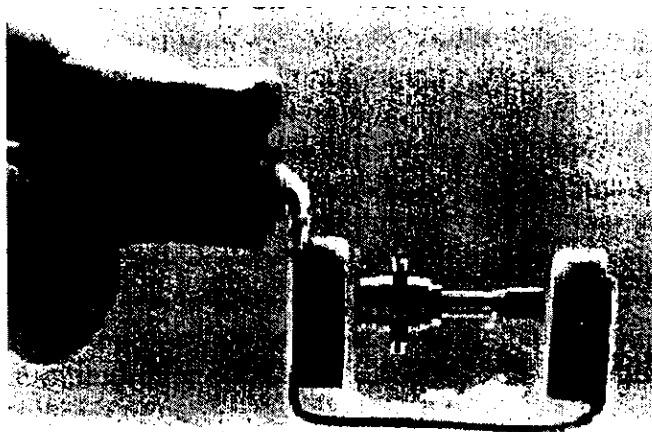


Fig. 2-15 Chumacera Básica: Un rotor magnético suspendido entre dos superconductores

El diseño de estos dispositivos está convertido en uno de los problemas más desafiantes para los investigadores. Aun a pesar de que el principio detrás de las chumaceras superconductoras es relativamente simple, los mismos dispositivos no lo son, en ocasiones, se puede requerir de sistemas de control bastante sofisticados para poder tener las chumaceras magnéticas superconductoras. Ya que aun a pesar de que son superconductoras, todas estas chumaceras, necesitan ser controladas en cinco direcciones, arriba, abajo, de lado a lado, inclinaciones y desviaciones. Con las chumaceras superconductoras hay que cuidar más los movimientos referentes al de lado a lado, inclinaciones y desviaciones, debido a que el movimiento de arriba y abajo tiene mucho más cuidado por si mismo debido a las fuerzas de levitación^[133].

En estos momentos las presiones de levitación han alcanzado un punto donde son aceptables para el uso de chumaceras, el siguiente problema para ser superado es el de rigidez en estas 5 direcciones de control, el más importante tal vez sea el de la rigidez lateral de la chumacera. Principalmente, se requiere mejorar, la rigidez de una a dos veces más a la actual, para las aplicaciones^[33].

Resolviendo el problema de la rigidez, será una ganancia para la aceptación de estos dispositivos por parte de la comunidad ajena al superconductor. Generalmente las fuerzas magnéticas más altas reditúan en mejores chumaceras, por lo que, parte de la respuesta, en este sentido, pueda consistir en tener mejores materiales. Se han probado diferentes materiales basados en talio y bismuto, pero por mucho, el proceso de texturizado por fusión (melt textured) del YBCO, sigue siendo el mejor material.

En 1991, el equipo de C. W. Chu (TCSUH) realizó un diseño que ayudó a resolver en parte el problema de la rigidez, además, este diseño permitió tener una mayor capacidad de carga. En vez de usar el superconductor como estator, ellos usaron un imán, así que la interacción de imán e imán entre el estator y el rotor es la que permite la fuerza de levitación.

El problema que se tuvo con este arreglo fue por supuesto, la inherente inestabilidad, si no, de otra forma, las chumaceras magnéticas pasivas usando imanes de tierras raras, podrían ya haberse hecho realidad desde hace un par de años. Los investigadores de TCSUH usaron al superconductor solamente como un elemento estabilizador, y debido a que el superconductor provee un propio sistema de control retroalimentado, no es necesario un sistema de control activo usándo sensores (como sucede con una chumacera magnética activa).

Una colocación adecuada del superconductor puede producir actualmente una chumacera que sea más estable que las chumaceras que usan superconductores para proveer las fuerzas de levitación.

Este diseño fue nombrado como, Chumacera Magnética Superconductora Híbrida (HSMB), este arreglo ha producido cargas mayores de 70 psi a 77 K y esta puede soportar cargas mayores de 200 psi usando una chumacera activa para el estator. TCSUH ha aplicado una patente a su diseño y esta buscando un patrocinador industrial que tenga experiencia en el uso y diseño de chumaceras para que los pueda ayudar a optimizar la chumacera para diferentes aplicaciones.

2.4.2 Sistemas con ahorros substanciales

Se necesita también una gran rigidez magnética para competir con los sistemas existentes debido a que los ingenieros diseñadores, no quieren rediseñar, una turbina entera para acomodar a la nueva chumacera. Pero, puede haber aplicaciones donde las ventajas de las chumaceras superconductoras, harán que se rediseñe un nuevo sistema reorientado a estas nuevas necesidades. En aplicaciones para el espacio, por ejemplo, para bombas de oxígeno líquido, las chumaceras se tienen que cambiar después de cada misión debido al severo gasto ocasionado por el movimiento de las partes que intervienen en el motor a muy bajas temperaturas. Al menos en teoría, las chumaceras magnéticas superconductoras podrían eliminar este problema debido a que las partes en movimiento no se estarían tocando.

Otra aplicación que también podría salir beneficiada grandemente con las nuevas chumaceras superconductoras, es un "enfriador espacial (space cryocooler)" que lo ha estado desarrollando Allied-Signal. Si se pueden reducir las pérdidas de las chumaceras en el refrigerador (cryocooler), el cual genera temperaturas tan bajas como 10 K, no tendrá que hacerse uso de su capacidad térmica ni se preocupará por las pérdidas de la chumacera. Además, el refrigerador tiene una capacidad térmica adicional para proveer de enfriamiento a la carga exterior, haciéndola mucho más eficiente.

Si esto resulta una realidad puede haber ganancias sustanciales en el sistema. Por cada watt ahorrado sin las pérdidas de las chumaceras, se tiene una ventaja de 32 watts de potencia de entrada para el trabajo del refrigerador. Pero aun a pesar de que el número absoluto de watts parece pequeño, a este factor se le puede añadir el de tener una ganancia extra al darse una considerable reducción en tamaño y peso del refrigerador y un aumento en la eficiencia.

2.4.3 Pasiva contra activa

La mayoría de las chumaceras superconductoras, son por ahora, chumaceras pasivas que aprovechan las propiedades intrínsecas de los materiales de alta T_c . Las chumaceras magnéticas convencionales son chumaceras activas, las cuales básicamente, son electroimanes que usan bobinas a través de las cuales pasa la corriente para generar un campo magnético. No existe una chumacera no-superconductora que sea una chumacera pasiva; esta es una habilidad de los materiales de alta T_c que los

hace un producto único y que a su vez ocasiona que las chumaceras magnéticas superconductoras sean tan prometedoras.

Los superconductores de alta T_c también pueden ser usados en chumaceras magnéticas activas; si es que las propiedades del alambre con estos materiales puedan permitir ser enrollados en bobinas y transportar una densidad de corriente (J_c) suficientemente alta, con un campo magnético presente, para poder generar grandes fuerzas repulsivas (algo que actualmente parece ya solucionado). Aunque si bien para tener la certeza de que estos alambres puedan ser 100% confiables parece que puede tardar todavía algunos años, es por lo que la mayoría de los investigadores está centrando sus esfuerzos, en las chumaceras pasivas.

A pesar de todo esto, las chumaceras superconductoras activas, probablemente en un futuro cercano serán de gran importancia. Una medición del funcionamiento de una chumacera, es la capacidad de carga psi (pounds square inch), o cuantas libras por pulgada cuadrada de fuerza que pueden soportar. Las chumaceras superconductoras pasivas pueden soportar actualmente entre 5 y 15 psi, dependiendo del material y de la temperatura de operación.

Esta cantidad es lo suficientemente buena para pequeñas aplicaciones, tales como motores de enfriamiento (cryocoolers) y otras pequeñas máquinas de rotación. Pero mucha gente cree que las chumaceras pasivas pueden alcanzar un punto en el cual su fuerza no se pueda incrementar más; por lo que para poder alcanzar fuerzas más grandes serán necesarias las chumaceras activas, estas, actualmente tienen rangos de capacidades de carga de 1 a 150 psi, dependiendo de la aplicación final. Las grandes turbinas, los generadores y las maquinarias de refrigeración trabajan con una elevada psi.

Debido a que las chumaceras magnéticas no-superconductoras ya se están utilizando en varias maquinarias, las chumaceras superconductoras activas, podrán reemplazarlas fácilmente en muchos sistemas con un mínimo de modificaciones para los actuales equipos. Una de las modificaciones que podrán hacerse, es la de reemplazar a los embobinados de cobre de las chumaceras magnéticas activas con embobinados de alambres superconductores de alta temperatura aquí el único rediseño significativo, podría estar en la parte de refrigeración que requerirían estos materiales₁₃₃.

Pero esto, hoy, todavía no es posible. Así que los investigadores están obligados a realizar nuevos diseños que incorporen chumaceras pasivas. Por lo que, si no se tiene algún

impedimento que frene la comercialización de las chumaceras pasivas, será necesario rediseñar sistemas enteros para poderlas utilizar.

Aunque también, cabe señalar que un grupo de investigadores está viendo la posibilidad de hacer chumaceras superconductoras de baja temperatura. Científicos del Centro de Superconductividad Aplicada en la Universidad de Wisconsin-Madison, reportaron en 1990, que remplazando embobinados de cobre convencionales con embobinados superconductores en ambas partes, rotor y estator, se podrían obtener presiones de 1,000 a 3,000 N/cm². En donde, con el mismo diseño que fue realizado con elementos pasivos, la presión magnética era de 376 N/cm².

Presiones tan altas pueden indicar que los superconductores de baja temperatura pueden tener también espacio en aplicaciones de chumaceras magnéticas, aunque debido a los altos costos que se requieren por sus necesidades de enfriamiento se pueden ver frenados en la mayoría de las veces (como había sucedido con la mayoría de las aplicaciones propuestas hasta antes del descubrimiento de los superconductores de alta temperatura).

Los materiales de alta temperatura ofrecen una oportunidad de poder trabajar a temperaturas más altas, aunque estos en ocasiones no funcionen a temperaturas del nitrógeno líquido. Actualmente mientras más baja sea la temperatura de operación de una chumacera de YBCO, son mejores sus propiedades. Muchos laboratorios están experimentando con chumaceras a temperaturas alrededor de los 20 K, una temperatura que puede ser obtenida a través de refrigeración y siendo también viable para aplicaciones espaciales.

2.4.4 Mediciones que se llevan a cabo

Las chumaceras magnéticas son analizadas por varios factores, dos de los más importantes están siendo el de la presión de levitación (medida en psi o N/cm²) y el número de revoluciones por minuto que pueden soportar.

La mayoría de los investigadores han registrado lecturas similares de presión magnética (psi). John Hull en Argonne señaló que "las presiones que generalmente se están obteniendo están entre 5 y 15 psi". Las pequeñas cámaras de enfriamiento especiales de Allied Signal están operando en forma correcta en el rango de 5 a 10 psi. En HiTc

Superconco, materiales más recientes han tenido una presión de levitación de alrededor de 12 psi_{así}.

Estos números son lo suficientemente buenos para aplicaciones, en comparación con las propiedades de otras chumaceras obtenidas con otros procedimientos. Con los nuevos materiales (melt-quen) se pueden obtener por lo menos de entre 3 a 5 psi a 78 K. Entonces a bajas temperaturas, tales como a la de hidrógeno líquido, la cual puede ser requerida para una aplicación espacial como la de un crióstat o refrigerador, se pueden obtener de 10-15 psi, el cual está en el rango de las chumaceras con lubricación de aire.

A los 20 K, es decir, a temperaturas del hidrógeno líquido, las fuerzas que se pueden generar entre un imán permanente y un superconductor de alta temperatura existente, se están aproximando a la marca de 60 psi con una geometría convencional (un imán permanente sobre una muestra superconductora simple).

Los 60 psi pueden sonar como un salto muy largo en relación con los 10 a 15 psi que se están obteniendo actualmente, algunos investigadores señalan el de que hay algunas geometrías libres que prometen presiones de levitación mucho más grandes. Así que si se quieren exceder los 60 psi se necesitan mejores materiales. TCSUH también ya ha registrado 60 psi a los 77 K, aunque ese número es el resultado de usar imanes de tierra rara (NdFeB), para el alzamiento. Los superconductores son usados solamente para estabilizar las chumaceras.

Cabe señalar que algunas personas confunden la fuerza total de levitación con la presión de levitación y si no se tiene el cuidado de usar la misma configuración y los mismos imanes se pueden obtener diferentes valores cuando se estén probando dichas chumaceras. La medición de fuerza no es necesariamente un indicativo de tener un buen superconductor, esto más bien significa, que se cuenta con un gran imán o un gran superconductor. La presión de levitación es una comparación más significativa, pero aún en este, se ha encontrado que cambiando el tamaño, la fuerza y la forma del imán se pueden obtener resultados completamente diferentes para el mismo material superconductor, por lo que, es muy difícil el poder comparar mediciones de un laboratorio con otro.

Otra medición del funcionamiento de la chumacera, es la velocidad de rotación. Esta propiedad es quizás, a primera impresión, una propiedad no tan importante como la de la presión de levitación, debido a que la velocidad de rotación puede ser afectada por muchas

variables y últimamente está limitada por la habilidad del imán para mantenerse sujeto a grandes velocidades.

Allied Signal quitó la flecha de un turbo-alternador que opera normalmente a 250,000 rpm y pudo hacerlo flotar y rotar, exitosamente, a más de 300,000 rpm usando chumaceras superconductoras, (fig. 2-16)_[33]. Estas grandes velocidades se pudieron registrar a través de un sistema de manejo (inyectando helio gaseoso sobre la flecha) y debido a que la flecha tiene una masa relativamente pequeña.

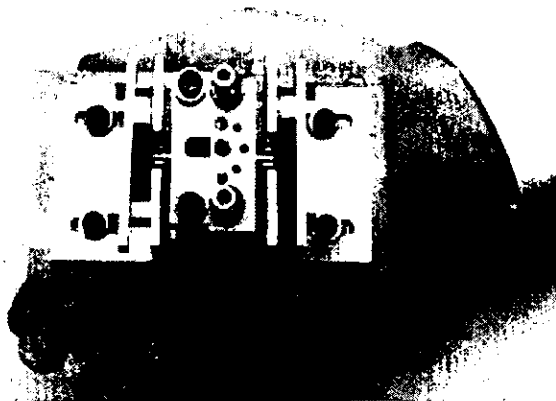


Fig. 2 -16

TCSUH removió un turbocargador de un motor Chrysler, le quito la chumacera de bolas (balero) y la reemplazó con su Chumacera Superconductoras Híbrida y rotó la flecha, del tamaño de un cigarro, aprox. a 135,000 rpm.

Cornell hizo girar a un rotor de entre 5 y 10 gramos a velocidades de 120,000 rpm, pero el valor más bajo es más una función de la unidad de manejo que del superconductor (Cornell usó un conductor electromagnético). Moon también ha hecho girar a un rotor de 5 kilogramos mas allá de 15,000 rpm, usando una pequeña turbina. Con estas pruebas, tal vez no halla un límite magnético para las RPM y puede ser que el único límite en el aire sea el arrastre magnético.

Realmente, velocidades extremadamente altas parecen ser posibles. Creare Inc. en Hanover, N.H. dice haber alcanzado velocidades de 450,000 rpm usando una turbina con un rotor de 6.25 mm.

2.4.5 Desarrollo Tecnológico

La figura 2-17 es el esquema de un motor simple construido por Christopher Gabrys en la Universidad de Vermont, utilizando chumaceras magnéticas superconductoras. Los extremos del rotor tienen imanes cilíndricos de NdFeB, los cuales pueden ser soportados tanto por levitación repulsiva sobre dos superconductores de alta temperatura o por levitación atractiva, bajo los mismos superconductores. (Para lograr la levitación atractiva, se permite que el flujo de las chumaceras magnéticas penetre a los superconductores antes de enfriarlos. El rotor puede ser manejado a velocidades de 10,000 rpm por tres bobinas magnéticas controladas por un conmutador óptico^[8, 35]).

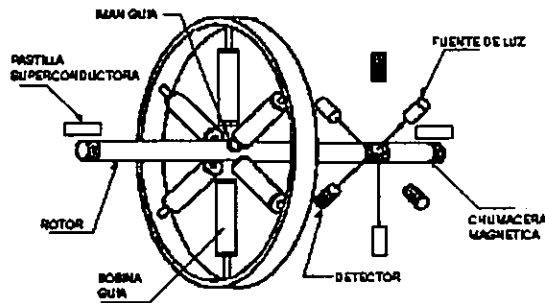


Fig. 2-17 Localización relativa de importantes componentes del motor, chumaceras y transductores de retroalimentación.

Allied Signal está terminando la primera fase de Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) una concesión por arriba de los 2 millones de dólares y ya ha sido aceptada para una siguiente concesión (aunque por una cantidad considerablemente menor; desafortunadamente con los recientes registros enfocados a DARPA se ha visto que actualmente no hay mucho dinero disponible para las aplicaciones con superconductores masivos). Allied-Signal ha gastado aproximadamente la misma cantidad de su propio dinero en investigación de chumaceras, con un grupo de 10 a 15 personas, algunas de medio tiempo y otras de tiempo completo, las cuales han estado trabajando con chumaceras superconductoras desde octubre de 1988.

La segunda parte del programa de esta compañía está relacionada con la fabricación de polvos útiles para chumaceras tales como chumaceras cilíndricas y elementos del muñón. El grupo de Trivedi tomó una flecha de un turbo-alternador de un congelador espacial y la hizo

suspender y girar exitosamente usando una chumacera pasiva superconductora. La ventaja de este, fue el de que el dispositivo ya estaba operando por debajo de la temperatura del nitrógeno líquido, así que ya no hubo un cargo adicional de energía en el sistema para poderlo proveer de un sistema de enfriamiento.

A pesar de lo anterior, el dispositivo aún esta lejos de poder estar listo para trabajar en misiones venideras. Allied quitó la flecha del dispositivo y la puso en un aparato de prueba. Solamente se usaron chumaceras axiales; la flecha aún necesita de ser sujeta con chumaceras radiales, las cuales serán el siguiente paso en el programa.

En torno a los programas de investigación la última aplicación reportada usando chumaceras superconductoras de alta T_c , es un sistema de transmisión para el telescopio lunar, mostrado en la exposición astronómica en E.U. a inicios de 1994, en donde las chumaceras de alta temperatura juegan un papel importante en la ligereza del sistema giratorio del telescopio mostrado el 10 de Enero de 1994 en el 183^{avo} Encuentro Nacional de la Sociedad Americana Astronómica. Los científicos que desarrollaron este dispositivo, esperan que el telescopio pueda ser usado en la Luna, para conseguir aun mejores imagenes que las que el Telescopio Espacial Hubble, está obteniendo, debido a que este telescopio puede proveer observaciones por tiempos más largos.

Este aparato, fue desarrollado en el Centro de Texas para la Superconductividad de la Universidad de Houston, utilizando superconductores proporcionados por la Universidad Católica de Texas. Imanes superconductores de YBCO se combinan con imanes permanentes para formar una chumacera magnética superconductora híbrida (HSMB), la cual tiene las propiedades de ser estable, pequeña de masa y esencialmente sin fricción. Los imanes superconductores atrapan el flujo circulante con lo que, conducen a una estabilidad creciente. Debido a que no hay contacto mecánico entre el rotor y el estator en una HSMB, la chumacera, de acuerdo al TCSUH, no se gasta.

El diseño del telescopio, que estuvo en exhibición, es enfriado por un flujo continuo de nitrógeno líquido sobre las chumaceras. Aunque los científicos de TCSUH señalan que no creen que sea necesaria tal refrigeración sobre la superficie de la luna si se protege al telescopio, de la luz del sol.

El sistema del telescopio descubierto aquí es extremadamente ligero y no presenta un consumo de potencia o un soporte mecánico₍₃₅₎.

2.5 Capacidad de carga de sistemas de levitación pasiva superconductoriva

La capacidad de carga de estos sistemas es definido como la máxima fuerza magnética por el eje vertical dividida por el área de carga de la chumacera y es usualmente expresada como libras (pounds) por pulgada cuadrada (inch²) o "psi"_[37].

La fuerza magnética es producida por la interacción de un imán con un superconductor. Definiendo la presión de levitación (p), como la fuerza magnética dividida por el área "a" de un imán suspendido:

$$p = \frac{F}{a} = \alpha\beta\phi'B' \frac{B_0}{\mu_0}$$

donde $\alpha=AH/ag$ representa la relación del volumen "AH" del superconductor disponible a inducir flujo y el volumen del espacio "ag" provisto para almacenar la energía de flujos aplicados. β denota el factor de corrección de filtración que es considerado para el potencial de escape de flujo_[37].

La presión de levitación varía con el campo aplicado y la densidad de flujo inducido del superconductor.

Capacidad de carga: también definida como la presión máxima de levitación que puede ser obtenida por los actuales materiales disponibles. Esta es la presión de levitación obtenida por usar los campos aplicados más grandes con los gradientes más altos para inducir la magnetización más grande en el superconductor.

$$P_{m\acute{a}x} = \beta\phi'_{m\acute{a}x} B'_{m\acute{a}x} \frac{B_{0m\acute{a}x}}{\mu_0}$$

Existen 3 fuentes básicas para generar campos magnéticos fuertes: solenoides, electroimanes e imanes permanentes_[37].

Imanes permanentes: los imanes están limitados por la densidad de flujo remanente. En la actualidad los imanes de NdFeB tienen un valor máximo de 1.3T. Pero se puede estimar que los imanes permanentes o electroimanes pueden producir una densidad de flujo máximo de 1.8 T.

$$\underline{B_{0m\acute{a}x}} = 1.8T$$

Máximo campo inducido $B'_{m\acute{a}x}$: refleja principalmente la habilidad del superconductor para llenarse directamente de vórtices de corriente microscópicos en un volumen dado. La

fuerza de la magnetización inducida en el superconductor es extremadamente sensitivo a los materiales usados, procesos empleados, la microestructura resultante y la temperatura.

Alineación del grano: para una magnetización máxima, la configuración de levitación debe tomar ventaja de la propiedad que la resistencia de superconductores cerámicos es cero en el plano a-b solamente. Esto significa que el grano debe ser alineado de tal forma que el eje c sea paralelo al campo aplicado₍₃₇₎.

Tamaño del grano: actualmente se cree que granos grandes pueden incrementar la magnetización, así como, la eliminación de fronteras de grano, reducen la posibilidad de penetración de flujo.

Usando el modelo de Bean, se expresa el campo inducido B' para el tamaño del grano y la densidad de corriente por:

$$B' = \mu_0 \gamma D J_c$$

Malozenoff₍₃₇₎ sugirió recientemente que para cerámicas, D debería de ser tomado como el tamaño del grano, no el tamaño de la muestra. Aquí γ refleja el factor de forma para todos los granos. Por ejemplo, si los granos son modelados como partículas cilíndricas, $\gamma = 0.33$ y $D =$ radio. Para granos planos, $\gamma = 0.25$ y $D =$ grosor del plano.

Actualmente, una de las densidades de corriente crítica más grande que se ha demostrado, es 370 A/mm^2 a 1T , esto se llevó a cabo por Sawano₍₃₇₎.

Asumiendo conservadoramente que una densidad de corriente crítica de 185 A/mm^2 puede ser desarrollada en el alto campo de 1.8T , granos de 15mm de tamaño crecido por Sawano, deben ocasionar la mas alta magnetización inducida de:

$$B' = 4\pi \times 10^{-7} \times 0.33 \times 0.015 \times 185 \times 10^6 = 1.2\text{T}$$

No obstante, a un reporte reciente de DARPA, un límite de 6T para flujo atrapado fué citado. En estas estimaciones, se usará un valor más conservativo de 1 T .

$$B'_{\text{máx}} = 1\text{T}$$

Factor máximo de gradiente $\phi'_{\text{máx}}$ es controlado muy de cerca por el circuito de flujo magnético de los campos aplicados. Existen 2 tipos básicos de circuitos magnéticos, abiertos y cerrados.

Para un imán permanente de longitud L y radio R , la densidad de flujo a una distancia Z de su superficie está dada por:

$$B_z = \frac{B_r}{2} \left[\frac{L+Z}{\sqrt{R^2 + (L+Z)^2}} - \frac{Z}{\sqrt{R^2 + Z^2}} \right]$$

Asumiendo que el espacio es mas pequeño que las dimensiones del imán ($z \ll R, z \ll L$) el flujo y el gradiente estan dados por :

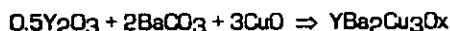
$$B_o = \frac{B_r}{2} \left[\frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} \right]$$
$$\phi' = \left(\frac{\sqrt{R^2 + L^2}}{R} \right) \cdot \left(\frac{g}{L} \right)$$

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE UNA CHUMACERA SUPERCONDUCTORA

3.1 Preparación del superconductor

Se realiza una reacción de estado sólido mezclando polvos de: óxido de itrio (Y_2O_3), carbonato de bario ($BaCO_3$), y óxido de cobre, CuO . Las proporciones de la mezcla son de 1:2:3, de acuerdo con la reacción:



Se muele la muestra en un mortero (es recomendable que sea de ágata, ya que este material reduce en forma considerable la contaminación de la muestra que pudiera existir, debido al desprendimiento de partículas del mortero), hasta obtener un grano muy fino, de un color gris claro. Luego, se procede a hornear este polvo para lograr una buena oxidación. Se pueden utilizar crisoles de cuarzo, alúmina o platino. La alúmina parece permanecer inerte, siempre que la temperatura no sobrepase los 1000 grados centígrados durante demasiado tiempo (figura 3-1). La reacción de estado sólido tiene lugar, en un lapso de 10 a 12 horas, manteniendo la temperatura constante en 800 grados centígrados.

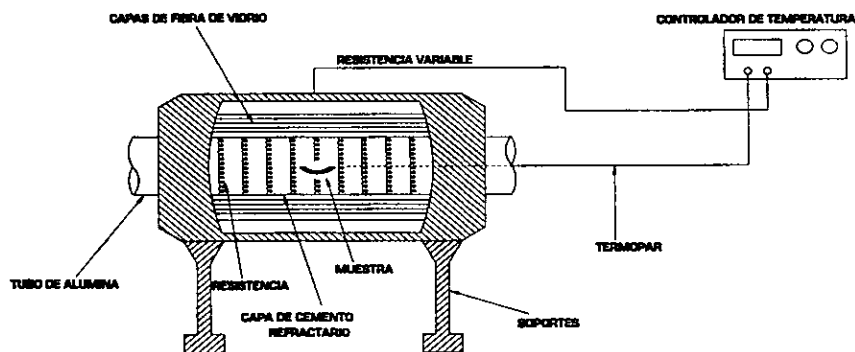


Fig. 3-1 Proceso de hornado con controlador de temperatura

Posteriormente, el polvo se vuelve a moler y se preparan por compresión unas pastillas que luego son hornadas, volviéndolas a calentar a $950^{\circ}C$ por varias horas. El proceso es simple, sin embargo, si la presión parcial de oxígeno durante el calentamiento del polvo es

demasiado baja, o se sacan las muestras del horno demasiado pronto, no se encontrará la superconductividad por arriba de la temperatura de nitrógeno líquido.

Las temperaturas de transición más altas y mejor definidas se obtienen cuando la muestra se calienta en una atmósfera de oxígeno y se deja enfriar lentamente hacia la temperatura ambiente en un proceso de varias horas, a partir del punto en que su temperatura de calentamiento es de 950°C.

La preparación de la muestra en una atmósfera inerte, evita totalmente la obtención de una muestra superconductora.

3.2 Construcción de chumaceras superconductoras simples

Aprovechando las propiedades que presentan los materiales superconductores, se puede lograr construir una chumacera superconductora simple, con un anillo de material superconductor y un imán cilíndrico el cual, va a realizar la función de la flecha.

En esta sección hablaré de los pasos que hay que seguir para realizar una chumacera simple, que en este caso va a ser un anillo. Menciono esto ya que en la siguiente sección hablaré de las pruebas que se tienen que llevar a cabo para realizar una evaluación tanto, de este tipo de chumaceras, como de las chumaceras híbridas.

Cabe señalar que el proceso de elaboración que aquí menciono, lo lleve a cabo en el Instituto de Física dentro del Laboratorio de Superconductores y Magnetismo, bajo la supervisión de mi director de tesis, el Dr. José Gpe. Pérez Ramírez y del Sr. Antonio Morales Espino.

Primer paso, realicé una investigación de las medidas más comunes de las chumaceras utilizadas en las pruebas de caracterización para estos dispositivos en los diferentes laboratorios a nivel mundial.

Segundo paso, una vez tomada la decisión sobre el tamaño que deberían de tener los anillos, procedí a diseñar y a realizar los dibujos de las diferentes partes que conformarían el dado completo el cual tendría por objetivo confinar y darle la forma deseada de anillo a la muestra en polvo. Estos dibujos los lleve a cabo con el paquete Autocad, y una vez terminados se los di al personal del taller del mismo Instituto, para que fueran ellos, a través de sus diferentes máquinas, los que realizaran con acero inox, estas piezas, (figura 3-2).

Tercer paso, lo siguiente, fue hacer un cálculo del material que se necesitaría para fabricar dos anillos con las siguientes medidas, diámetro interior: 15.5 mm aprox., diámetro exterior 24.5 mm aprox. y 10 mm de ancho aproximadamente. A continuación, muestro los cálculos realizados:

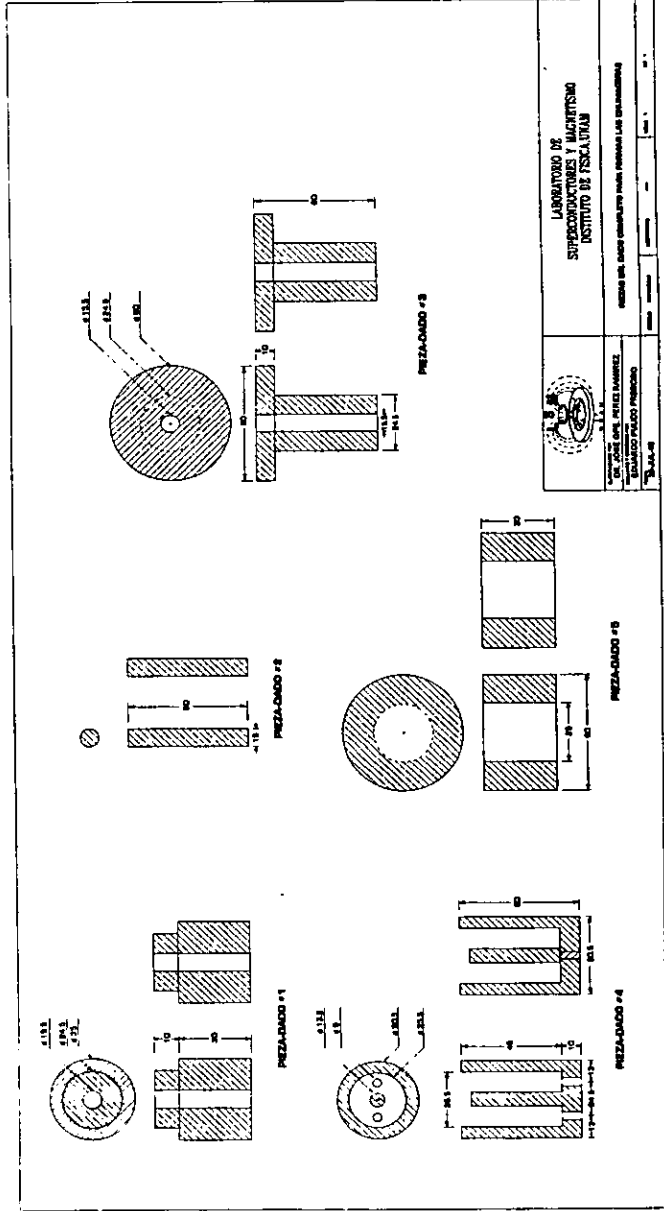
$$\text{Volumen del anillo para las medidas dadas} = 2.8274 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad teórica del 123} = 6.33 \text{ g/cm}^3 \text{ (38)}$$

Masa requerida para las medidas dadas;

$$m = d \times V = 6.33 \times 2.8274 = 17.89 \text{ g} \approx 18 \text{ g}$$

Fig. 3-2 Piezas que conforman el dedo completo, para realizar los anillos superconductores



El cálculo estequiométrico para obtener los gramos de cada compuesto son los siguientes:



Los compuestos necesarios para obtener esta reacción son: óxido de itrio (Y_2O_3), carbonato de bario (BaCO_3), y el óxido de cobre (CuO).

Debido a que se requieren de:

$$3 \text{ cobres: } \text{CuO} \times 3 = (63.55 + 16) \times 3 = 238.650 \text{ moles}$$

$$2 \text{ barios: } \text{BaCO}_3 \times 2 = (137.33 + 12.011 + 48) \times 2 = 394.682 \text{ moles}$$

$$1 \text{ itrio: } \text{Y}_2\text{O}_3 \times 1 = (177.82 + 48) \div 2 = 112.910 \text{ moles}$$

$$\text{Total} = 746.242$$

Para obtener 18 g en total, los cálculos fueron los siguientes:

$$\text{CuO} \Rightarrow (238.65/746.242) \times 18 = 5.756 \text{ g}$$

$$\text{BaCO}_3 \Rightarrow (394.682/746.242) \times 18 = 9.520 \text{ g}$$

$$\text{Y}_2\text{O}_3 \Rightarrow (112.91/746.242) \times 18 = 2.723 \text{ g}$$

$$\text{Total} = 17.999 \text{ g}$$

Cuarto paso, se prepara la muestra tal y como se indica en la sección anterior.

Quinto paso, lo siguiente, fue hacer diferentes muestras con distintas presiones, esto lo lleve a cabo, debido a que las primeras muestras se rompían muy fácilmente, aunque esto no lo pude superar, sino, hasta que les dí un poco más de holgura a las piezas y utilicé un aceite para lograr una mejor lubricación lo cual facilitó la salida del anillo, del dado.

Sexto paso, una vez obtenidos los anillos, se procedió a oxigenarlos, con el objetivo de que estos presentaran una correcta fase superconductora. Después de estos pasos, calculé la densidad obtenida, con el fin de determinar la calidad de estos dispositivos.

La densidad medida en estos anillos, fue la siguiente:

$$\text{Anillo 1: } \quad d = 80.679\%$$

$$\text{Anillo 2: } \quad d = 76.918\%$$

La variación que se dió en la densidad en estos dos anillos, se debió, principalmente, al diferente lugar que ocuparon estos en el horno, durante el proceso de sinterización.

Una vez, finalizados todos estos pasos, se puede proceder a experimentar con diferentes dispositivos, los cuales tienen como base, las chumaceras que aquí he descrito como

fabricarlas. Los diferentes experimentos que se pueden llevar a cabo, solamente los describo en la siguiente sección, éstos, no los realicé, debido principalmente, a la falta de cierto equipo el cual era necesario para la realización de estas pruebas y porque no se pudieron contar a tiempo con los imanes de tierra-rara que se mandaron pedir de China.

3.3 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS CHUMACERAS SUPERCONDUCTORAS

3.3.1 Chumaceras magnéticas superconductoras pasivas

Con el objetivo de poder definir los parámetros de las chumaceras magnéticas superconductoras para posibles aplicaciones en dispositivos de altas velocidades rotacionales que puedan sostener cargas moderadas, o en dispositivos de medición, tales como, telescopios espaciales; se han realizado varias pruebas. A continuación, menciono algunas de éstas, para que la persona que se encuentre interesada en el desarrollo de estos dispositivos, tenga una idea de por donde debe enfocar su trabajo.

Una de las pruebas que se han llevado a cabo, es para poder definir el proceso más conveniente para elaborar las chumaceras superconductoras. Esta prueba consistió en realizar mediciones de fuerza en superconductores de alta temperatura de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, hechos con el proceso de orientación de grano y con el proceso de orientación aleatoria continua del "texturizado por fusión".

Mediciones de Fuerza:

Para medir la fuerza entre un imán permanente y materiales de YBCO de la misma forma y del mismo tamaño, se compararon materiales hechos con "templado del líquido", sinterización-libre y también con materiales "texturizados por fusión" en el que el plano a-b estaba orientado en forma diferente con respecto al campo magnético aplicado.

El aparato experimental consistió de un recipiente almacenador de nitrógeno líquido, colocado en un micrómetro con una plataforma movable, capaz de descender hacia un imán permanente, montado en una balanza electrónica. Se depositó una muestra de prueba, con material de YBCO en el recipiente que contenía al nitrógeno líquido y después este recipiente se desplazó en un movimiento descendente y luego en un movimiento ascendente con respecto del imán permanente. En esta etapa se grabó la fuerza ejercida por el superconductor y el imán a diferentes distancias. En algunas posiciones, inmediatamente después de que la distancia entre el imán y el superconductor había cambiado, la fuerza estuvo oscilando por un tiempo y después parecía mantenerse en una cierta medición, para

después volver a oscilar, en tales situaciones, se grabó el primer extremo de la fuerza después de cada cambio en la distancia entre el imán y el superconductor. En general, la fuerza presenta histéresis. Los resultados para tales comparaciones de fuerzas entre varios materiales YBCO e imanes permanentes se muestran en las figs. 3-3 y 3-4.

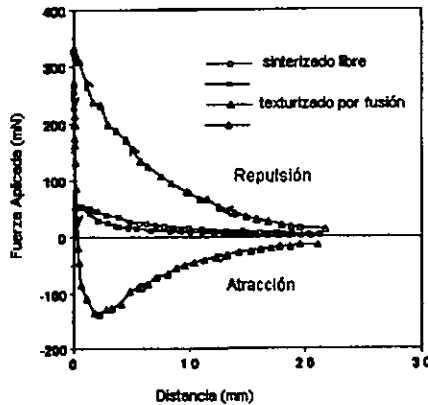


Fig. 3-3 Comparación de la fuerza de histéresis entre el proceso de "texturizado por fusión" y la sinterización-libre. Nótese el efecto de suspensión en la fase ascendente del "texturizado por fusión".

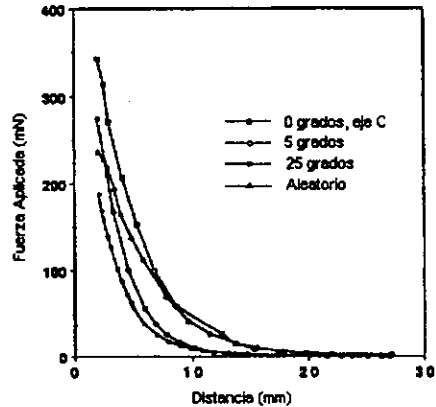


Fig. 3-4 Gráfica de la fuerza vs distancia variando el ángulo del eje c con respecto al campo aplicado.

En la fig. 3-3, se compara la curva de fuerza vs. se obtuvo producto de la interacción de un imán permanente y una muestra superconductora YBCO hecha por el método de sinterización-libre, con la curva de una muestra con orientación aleatoria de "texturizado por fusión". Los resultados de medición de la fuerza, difieren entre materiales con sinterización-libre y los de "texturizado por fusión" debido a una diferente fuerza de atrapamiento, debido a las densidades de tamaño de grano. La levitación y la suspensión en superconductores del Tipo II, se estabilizan por el atrapamiento de flujo magnético en el material. Las muestras superconductoras de YBCO fueron, ambas, de forma rectangular y se colocaron en una dirección horizontal al imán permanente. El imán permanente también fue de forma rectangular y magnetizado en forma horizontal, por lo que, el campo magnético era paralelo a la base de la superficie de los superconductores. En la posición más baja posible a la muestra de prueba del superconductor, la intensidad de campo magnético fue del orden de 1.7 KG.

En la fig. 3-4, se muestran juntas para propósitos de comparación, las curvas de fuerza-histéresis vs distancia, producto de la interacción de un imán permanente y cada una de las tres muestras de "texturizado por fusión" ordenadas de forma diferente, respectivamente. Para esta prueba, se utilizó un imán permanente de forma cilíndrica, de 7.5 mm de diámetro con una magnetización a través del eje del cilindro, con uno de sus polos en forma paralela a la base de la superficie de la muestra superconductora. En la posición mas baja posible hacia la muestra, se midió un campo magnético de 2.0KG. Las muestras se hicieron con una forma de disco, teniendo un diámetro entre 1.2 y 1.5 cm y un grosor de 6 a 7 mm. Se dió una dirección de orientación preferencial del plano a-b; cuando se descendieron las muestras hacia el imán, el eje c hizo ángulos de 25°, 5°, 2° y 0°, respectivamente, con relación al campo aplicado. De esta forma, los ángulos que el campo magnético hizo con el plano a-b en estas muestras fueron de 65°, 85°, 88° y 90°, respectivamente. La orientación de cada muestra se determinó a través de mediciones con difracción de rayos X.

Una segunda prueba que se ha realizado, es la de llevar a cabo, un estudio de disipación rotacional en un modelo de prueba de una chumacera superconductora. En esta prueba se han podido registrar velocidades de 135,000 rpm con un sistema pasivo de levitación compuesto de imanes de tierra-rara (NdFeB) y de materiales superconductores de YBCO hechos con el proceso de texturizado por fusión. El objetivo de esta prueba, es evaluar y comparar varios materiales tanto de "texturizado por fusión", como de sinterización libre, con el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, con respecto a la presión magnética que pueden soportar. Una vez hechas estas dos pruebas, se procedió a fabricar una chumacera superconductora simple, hecha, con el que fue después de estas pruebas, el mejor proceso de elaboración del superconductor. A esta chumacera, se le midió la cantidad de disipación que genera mientras esta girando bajo condiciones de refrigeración. El modelo de prueba, permite obtener una información en el camino de lograr un mejor entendimiento de la interacción que existe entre imanes y superconductores en tales diseños de chumaceras, así como para poder definir soluciones para lograr una minimización en la disipación de energía y una maximización en las fuerzas de levitación.

Mediciones de disipación

Para investigar las fuerzas de disipación de las chumaceras superconductoras en operación, se construyó un prototipo de una chumacera magnética superconductora [fig. 3-5]. La flecha del rotor se mantuvo en una posición centrada en proximidad a los estatores superconductores. Estos estatores superconductores fueron enfriados con nitrógeno líquido (77 K). En este

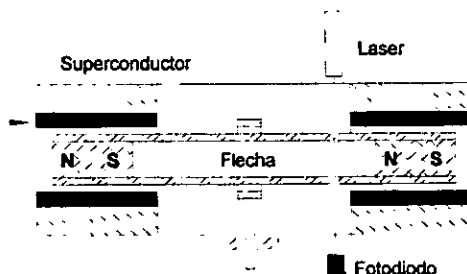


Figura 3-5 Prototipo de una chumacera superconductora con estatores de YBCO hechos con el proceso de melt-textured.

estado de ambiente frío, estuvo suspendida la flecha. La fig. 3-6, ilustra las superficies potenciales experimentadas por el imán debido al campo magnético atrapado por el superconductor. Con la chumacera-prototipo se midió una rigidez magnética de 5.2 N/mm en la dirección axial y de 2 N/mm en la dirección transversal.

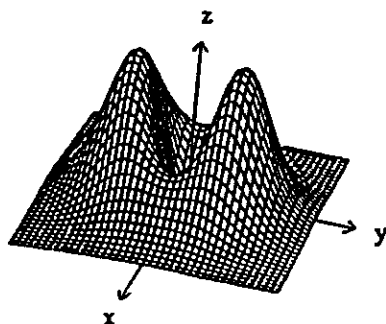


Fig. 3-6 Fuerza potencial, creada por el efecto de atrapamiento. La fuerza en la dirección y, es la fuerza axial; la fuerza en la dirección x, es la fuerza transversal.

El engranaje impulsor o transmisor se sujetó a la flecha suspendida y se accionó con una bomba de aire, a una velocidad moderada de 135,000 rpm en un estado pasivo de suspensión. Las mediciones de la velocidad rotacional se obtuvieron por la supresión de un rayo láser sentido por un fotodiodo. La señal del fotodiodo, de la cual se generaron 2 pulsos por revolución se grabaron en un osciloscopio LeCroy 9400. Los datos se estuvieron tomando en un intervalo de tiempo de 50 ms cada segundo, durante 100 segundos; y la velocidad de rotación del rotor se pudo deducir como una función del tiempo durante este periodo. En el lapso de estos 100 segundos, se le dió al rotor una velocidad de 30,000 rpm en los primeros 7 s, después se le permitió que fuera disminuyendo la velocidad por si mismo. En la figura 3-7, se muestra la gráfica de la velocidad del rotor en aire contra tiempo. Se estimó que al final del periodo de los 100 s, el coeficiente de disipación de la energía cinética rotacional del rotor fue de solamente 0.9 mW.

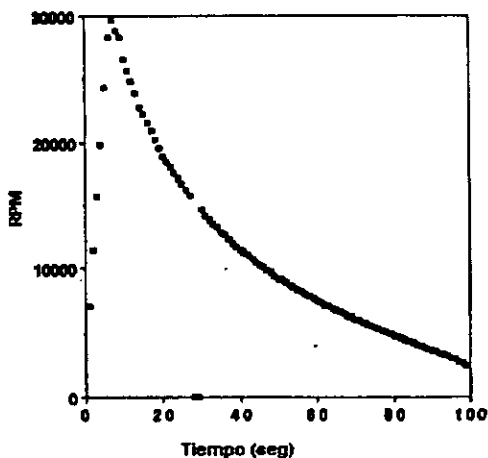


Fig. 3-7 Gráfica de rpm vs tiempo de la disipación rotacional en aire de la chumacera prototipo

Discusión y Conclusión:

La figura 3-3, muestra la comparación de muestras de YBCO con sinterización libre y "texturizado por fusión". El YBCO producido con "texturizado por fusión" generó una fuerza mas grande que el YBCO con sinterización libre, debido a que puede soportar una mayor densidad de corriente dando un incremento para supercorrientes más grandes y además una magnetización efectiva, más intensa. Esto, es debido, por los atrapamientos de energía mucho más altos, los cuales permiten que el flujo sea atrapado en el material. Este efecto de atrapamiento de flujo es evidente cuando un imán es suspendido sobre el superconductor, tal como en la figura 3-4. Las fuerzas que atrapan al superconductor en su lugar, también son responsables de la fuerza de histéresis entre el imán y el superconductor.

Debido a que el material es intrínsecamente anisotrópico, por la poca simetría de su estructura cristalina, se debe esperar que una pieza de superconductor de una forma dada, podrá ejercer diferentes fuerzas en un imán que se pose por encima de el, dependiendo de la orientación del plano a-b por dentro del material. Los estudios de las fuerzas entre un imán cilíndrico y discos superconductores con diferentes orientaciones del plano a-b, como se muestra en la fig. 3-4, revelan que la fuerza es máxima, cuando el plano a-b esta orientado perpendicularmente a la dirección general del campo magnético externo. Esto puede ser interpretado como un efecto de fuerte atrapamiento en las bandas conductoras del plano a-b.

La fuerza se incrementa conforme el ángulo del plano a-b se fue aproximando a los 90° , en relación con el campo aplicado. El efecto de atrapamiento mayor, produce una mayor fuerza de empuje, cuando el campo es perpendicular al plano a-b. Esta mayor fuerza de empuje se lleva a cabo, porque la densidad de corriente crítica es mas grande a lo largo del plano a-b, por lo que, las supercorrientes mas grandes son inducidas en el plano a-b. Cuando se considera un material orientado aleatoriamente, es muy difícil asegurar un modelo de la distribución de fuerzas entre el imán y el superconductor. La distribución de fuerzas no solamente se va a ver afectada por la orientación diferencial, también va a ser afectada por diferentes tamaños de granos y por microgrietas en sus estructuras individuales. Las características superconductoras o no superconductoras de las uniones débiles de grano a grano, son también contribuyentes del modelo de la distribución de fuerzas, además de estos efectos de la orientación de los cristales, que ejercen en la fuerza, son también factores de consideración para la disipación rotacional, con lo que, debido a las inhomogeneidades del material, pueden resultar diferencias de disipación magnética, de chumacera a chumacera. Además, cualquier asimetría en un imán permanente en rotación,

causa fluctuación magnética, lo cual crea pérdidas de energía debido al comportamiento con histéresis del material superconductor.

No obstante a todo lo anterior, la energía disipada que se midió en la chumacera-prototipo, no fue proporcional a la velocidad de rotación como se esperaba, si es que fuera debido a las pérdidas por una magnetización con histéresis, pero eso si, resultó ser proporcional con la energía propia de rotación, lo cual es mas indicativo de que hay pérdidas por corrientes de eddy, o por la resistencia del aire bajo estas circunstancias. Esto muestra que la disipación que se obtuvo no fue intrínseca al sistema de imán-superconductor. En otras palabras, esto significa que la disipación intrínseca medida es menor que un mínimo de 0.9 mW que se había medido [39,40].

3.3.2 Chumaceras Magnéticas Superconductoras Híbridas

Introducción:

El origen de la ineficiencia en sistemas previos utilizando una suspensión magnética activa, tales como, un control de retroalimentación eléctrico, o un sistema de chumacera neumática con aire, radica en su continuo consumo de energía. Con el inicio de materiales de mayor calidad producidos por los procesos de "texturizado por fusión" y otros procesos de elaboración con los superconductores duros de $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO), el correspondiente incremento de flujo atrapado puede permitir muestras orientadas de YBCO para atrapar flujo magnético de la misma magnitud o mayor, que la de un imán permanente de tierra-rara. Usando tales altos flujos atrapados en las muestras, se puede incrementar la levitación y la rigidez magnética efectiva.

Los superconductores en su actual forma, son buenos candidatos para la elaboración de dispositivos de chumaceras magnéticas superconductoras (SMB) simples, tal y como lo puede ser, un imán levitado sobre un superconductor enfriado en ausencia de un campo magnético. Solo que este tipo de arreglo de chumacera simple, proporciona una levitación limitada y una rigidez magnética relativamente baja, como se mostró en la sección anterior. Esto, es debido, al campo magnético finito de los rotores y a la densidad de corriente crítica (J_c) del estator superconductor. Otro punto adicional con las chumaceras magnéticas superconductoras (SMB's), radica en la problemática de la estabilización del eje sobre largos periodos de tiempo, debido a la ocurrencia de una fuerza de arrastre (gap creep) bajo condiciones de enfriamiento en campo cero (ZFC). En contraste, bajo condiciones de

enfriamiento con campo (FC), una fuerza estática de levitación inherente, ocurre cuando una carga no externa se aplica en cualquier dirección. Además, las condiciones de FC no ofrecen prácticamente, ninguna capacidad de sustentación de carga, lo cual, obviamente, es una desventaja; pero debido a esta importante razón, en condiciones de FC, mientras que la chumacera no se mueva de su posición original, no se presenta una fuerza de arrastre. Además, se ha encontrado una rigidez magnética mucho más alta para desplazamientos radiales bajo FC, en comparación con la obtenida en condiciones de ZFC. En adición a todo esto, en una aplicación real, es impráctico enfriar los elementos de las chumaceras superconductoras antes de ensamblarlas en el dispositivo final (rotor magnético).

En esta sección, presento una investigación llevada a cabo, principalmente, en la Universidad de Houston, para comprobar las limitaciones de las chumaceras magnéticas superconductoras SMB. Esta aproximación se realizó, utilizando material de alta calidad de YBCO, el cual se elaboró con el proceso de "texturizado por fusión". El superconductor se puso entre el rotor y el imán estator para vencer la inherente inestabilidad entre el sistema

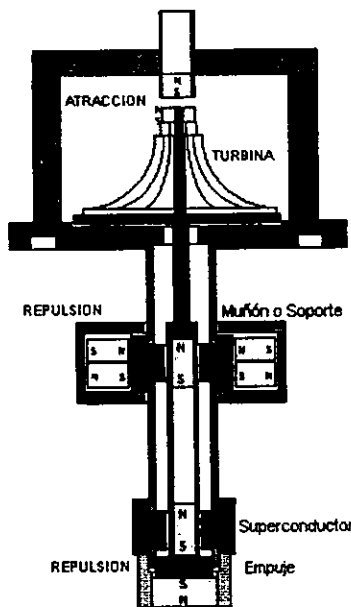


Fig. 3-8 Chumacera Magnética Superconductora Híbrida

Esta chumacera magnética superconductora híbrida (HSMB) se fabricó con material YBCO, elaborada con el proceso de "texturizado por fusión", sirviendo este material para la elaboración de estatores, y como los rotores, se utilizaron imanes permanentes de NdFeB con un campo superficial en el centro de uno de sus polos de 0.429 T. En el modelo de prueba, se

imán/imán. Esta chumacera magnética superconductora híbrida (HSMB), permite una mayor rigidez y mantiene una capacidad de sustentación de carga estática mucho más alta, en comparación a la obtenida, con las chumaceras superconductoras simples (de imán y superconductor de alta Tc). Para demostrar, esto, se construyó un prototipo de una HSMB, (fig. 3-8) impulsada por una turbina. Este dispositivo presenta una estabilidad multiaxial en un estado pasivo de levitación.

Esta chumacera magnética superconductora híbrida (HSMB) se fabricó con material YBCO, elaborada

depositaron 2 tubos de "texturizado por fusión" (1.8 cm de longitud, 1.2 cm de diámetro interno, 2.5 cm de diámetro externo) en el interior de un tubo de vidrio de 5.7 cm de longitud, para formar una **chumacera de muñón o soporte**. El miembro de soporte de la chumacera superconductora, fue un disco de YBCO de "texturizado por fusión" (2 cm de diámetro, 4.75 mm de grosor) el cual, se metió también, en el tubo de vidrio en la parte final. Los miembros de la chumacera con los imanes permanentes, es decir, la chumacera de soporte y de empuje, se alinearon para maximizar la fuerza de repulsión del campo magnético, maximizando con esto, la capacidad de sustentación de carga y la rigidez. La flecha del rotor (1 cm diam, 10 cm long) contuvo 3 dipolos simples, uno al inicio, para una elevación de atracción, uno para la chumacera y otro para la presión debido a la repulsión, al final.

En este dispositivo, se llevaron a cabo, mediciones de fuerza, simulando cada uno, un elemento individual de una HSMB. Se uso un dipolo de imán permanente (1.27 cm long., 0.95 cm diam., 0.426 T de campo superficial) en la flecha del rotor el cual se unió a un sistema de medición de fuerza estática, incorporando una viga o tirante elástico con un medidor de deformación. Esta viga o tirante voladizo fue sujeto a una etapa motorizada, controlada por una computadora. Un estado estacionario frío mantuvo fija una tabla óptica que fue llenada con nitrógeno líquido para enfriar al superconductor. Los datos recolectados se convirtieron a fuerzas estáticas, de las cuales, se pudieron deducir, las fuerzas de histéresis como una función del desplazamiento.

Se llevaron a cabo una serie de experimentos para comprobar la rigidez de las configuraciones de imán/imán, imán/superconductor y la configuración híbrida de imán/superconductor/imán. Se puso un imán permanente (1.89 cm diam., 0.73 cm long., 0.316 T en la superficie) en la parte inferior del aparato como un estator, con una polaridad, repelente al rotor magnético. A los 77 K, se tomaron mediciones del corte negativo de la rigidez y se correlacionó directamente a la fuerza de repulsión. Este mismo procedimiento se realizó para la atracción magnética, pero en este caso, la rigidez fue positiva. El rotor magnético en el montaje elástico, se mantuvo sujeto sobre un miembro superconductor de empuje o presión en la parte inicial del imán estator. Después se llevaron a cabo mediciones de fuerza radial de histéresis con esta chumacera magnética superconductora híbrida de empuje, con un espacio de 6 mm entre ambos imanes y se compararon con los resultados correspondientes para la chumacera magnética superconductora enfriada con campo, y la rigidez negativa del componente imán/imán. De igual modo, se le hizo lo mismo a la chumacera HSMB en la dirección axial.

Se sabe que la fuerza axial entre un imán y un disco superconductor es mucho más pequeña bajo condiciones de enfriamiento con campo que bajo condiciones de campo cero. Esta no es

una desventaja grande para condiciones de FC, debido a que la idea central es usar a los imanes para proveer de la fuerza de empuje, con el superconductor suministrando la estabilización requerida. Por ejemplo, el elemento de una chumacera magnética superconductora simple enfriada en campo, proporciona prácticamente una fuerza de sustentación igual a cero, mientras que la HSMB proporciona una fuerza de empuje axial de 9.32 N/cm^2 , con una distancia de imán a imán, de 6 mm. Debido a que las fuerzas requeridas para los propósitos de estabilización pueden ser esperados a ser más pequeños que los del empuje principal, esto conlleva a una ventaja para el caso de FC. Esto además, es respaldado por las mediciones de la fuerza de retención contra desplazamiento en la dirección radial. La rigidez que viene de condiciones de FC, es más grande y esta, es la máxima fuerza que se puede sostener antes de que esta ceda.

Debido a que se puede necesitar el suplir el empuje requerido, usando imanes adicionales, la presencia de este imán extra, puede anular la ventaja de una gran estabilidad. Para investigar esto, se midió primero la interacción imán/imán para fuerzas negativas y positivas, contra desplazamientos radiales. Después se midió la fuerza contra desplazamiento con componentes superconductores entre los imanes y también con los componentes superconductores pero sin el imán estator. Los experimentos hechos sin el estator magnético se llevaron a cabo para comparar la estabilidad que la combinación de

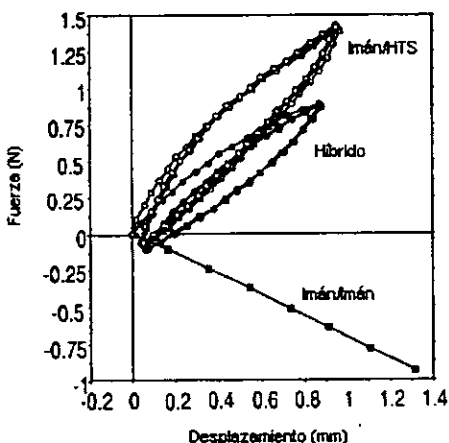


Fig.3-9 Curvas de histéresis - axial. Cambio de la fuerza de valor inicial del sistema (diferente valor para los tres casos mostrados) conforme el imán se translada a través de la chumacera superconductora de soporte, como una función del desplazamiento del punto inicial.

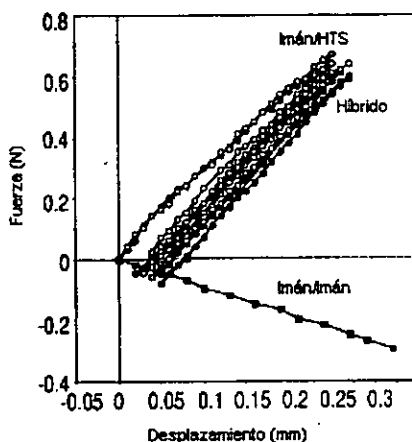


Fig.3-10 Curvas de histéresis - radial. Cambio de la fuerza de valor inicial del sistema (diferente valor para los tres casos mostrados) conforme el imán se translada a través de la chumacera superconductora de empuje, como una función del desplazamiento del punto inicial.

superconductor (rotor magnético) puede proveer, ambos, en la presencia y en la ausencia de una campo magnético adicional debido al estator, anticipando, que esto pueda ser más ventajoso, para proporcionar estabilidad entre imán y superconductor y fuerza de empuje imán/imán en lugares separados. Las curvas resultantes de fuerza con histéresis son mostradas en las figs. 3-9 y 3-10. De la curva de fuerza de histéresis para la configuración de HSMB, se observa que definitivamente un material superconductor puesto entre el imán es suficiente para dar la estabilidad a lo que de otra forma sería un sistema inestable imán/imán.

Los efectos del imán estator no son notorios sino hasta que, desplazamientos tan grandes como significativas fracciones de milímetro de la posición original, son alcanzados en la región inicial de FC. También en este caso, no hay inestabilidad sobre la dirección axial en la configuración de empuje, y de la misma manera para la dirección radial en la configuración de soporte. La rigidez medida en la dirección de estabilidad se muestran en la tabla 3-1.

	Soporte (radial-N/mm)	Empuje (axial-N/mm)	Fuerza de Empuje (axial-N)
Imán/Superconductor	0.68	3.97	0.0
Imán/Superconductor/Imán	2.00	4.76	8.8
Imán/imán	0.218	0.79	8.8

Tabla 3-1. Comparación de las fuerzas de empuje axial y la rigidez en la dirección de estabilidad entre la configuración de una chumacera de soporte y una chumacera de empuje.

En contraste, una comparación de los datos en las figs. 3-9 y 3-10 muestran que el efecto del estator magnético son mucho más conspicuos en las configuraciones de soporte y empuje. Los imanes estatores, no pretenden crear un empuje extra, en la chumacera de soporte. Estos son añadidos, para intercambiar algo de estabilidad axial por estabilidad radial. Con las polaridades como se implementaron, mostradas en la fig.1, se suprime la rigidez axial, en el caso de una chumacera magnética superconductora enfriada en campo (FCHTS), mientras que se aumenta la rigidez radial en paralelo con el comportamiento de la rigidez correspondiente con la misma configuración de estator magnético en la ausencia del superconductor (por ejemplo, inestabilidad axial, estabilidad radial). En el caso de la configuración de empuje o giro, la histéresis es invariable en cada configuración y además se concluye que la inestabilidad radial del imán estator no está afectando la capacidad del superconductor para atrapar el campo magnético y proveer de estabilidad.

Este prototipo de HSMB pudo soportar una presión de 41 N/cm^2 o 60 psi, normalizado a la sección transversal de la flecha. De esta presión, alrededor de una tercera parte, proviene de la repulsión entre los dos imanes en la chumacera de presión en la parte inferior, mientras que las dos terceras partes restantes se dan por la atracción entre los dos imanes, en la parte superior. La chumacera de presión inferior tiene una inestabilidad radial neta, mientras que las chumaceras de presión superiores presentan una inestabilidad axial. Debido a estas dos inestabilidades de fuerza actuando en diferentes extremos de la flecha, estas se pueden combinar para producir una inclinada inestabilidad, aun si esta apareciera para cancelar la una de la otra. Con la instalación del superconductor, la chumacera de soporte en sus funciones medias, estabiliza contra la inestabilidad axial de la chumacera superior, mientras que el componente superconductor de la chumacera de presión en la parte inferior, funciona como estabilizador contra la inestabilidad radial de los imanes repelentes localizados en su vecindad. Además, se puede lograr un refinamiento del balance entre la inestabilidad axial y radial ajustando los imanes estatores en la chumacera de soporte. Cuando se ensamble, la rigidez total de la chumacera puede ser de varios N/mm, distribuida de diversas formas, a través de las 3 chumaceras.

En conclusión, se ha mostrado que las chumaceras magnéticas superconductoras híbridas (HSMB) permiten incrementar la presión que se estimaba para la chumacera magnética superconductora enfriada en campo cero. En general, la rigidez de la configuración imán/superconductor/imán, no es exactamente una simple superposición de la rigidez de la configuración imán/superconductor y la configuración imán/imán, pero no está muy lejos de serlo, en algunos casos. La presión que se puede registrar, es similar a sistemas de imán/imán con el mismo espacio entre imán e imán. Además, se pueden lograr presiones más grandes si se disminuye el espacio, después el espesor del superconductor que interviene como estabilizador, podrá ser disminuido de acuerdo a que el superconductor pueda ser puesto en otra posición con imanes adicionales. Como resultado de esto, se podrá arreglar la estabilidad radial. Además se podrán determinar un lugar y espesor óptimo del superconductor de acuerdo a su J_c .

La acción de estabilización del superconductor toma lugar dentro de una cierta profundidad de penetración, la cual es del orden de varios milímetros. Se cree que si el tamaño de la chumacera es escalada a tamaños más grandes que la profundidad de penetración, la acción estabilizante podrá aumentar conforme el área efectiva de interface imán/superconductor, mientras que si la chumacera es reducida a tamaños más pequeños que la profundidad de penetración, la acción estabilizante podrá escalar como el volumen del componente superconductor^(41,42).

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha mostrado a los superconductores como una opción que el mundo científico y tecnológico debe tener presente en un primer plano, ya que por las propiedades que estos presentan, pueden significar una evolución importante en la sociedad, así como se dió en la prehistoria con la invención de la rueda y actualmente como se dió con el paso de los bulbos a los circuitos integrados o con el desarrollo del rayo láser, y creo que las aplicaciones mostradas en esta tesis así lo demuestran. Actualmente diversos problemas que se presentaron ha inicios de 1987 con respecto a las propiedades de transporte eléctrico, más claramente, con tener materiales que pudieran soportar grandes densidades de corriente sin perder la superconductividad o debido a que estos materiales eran cerámicos, la duda era de si se podrían generar procesos en los que se pudieran obtener materiales lo suficientemente buenos como para desafiar a los actuales, como en el caso de los cables eléctricos. Estos dos problemas están casi resueltos. Igualmente en 1987 los científicos se preguntaban si se podría superar la barrera de los 91 K, actualmente, se habla de superconductores que han rebasado los 151 K, y a finales de 1993, científicos franceses reportaron haber logrado un material que presentaba la superconductividad por arriba de los 200 K, aunque no pudieron repetir la muestra por lo que esto solo lo podemos tomar como algo todavía no logrado. Sin embargo, la mayoría de las expectativas y de los problemas que se han fijado o se han presentado con estos materiales se han superado. Por lo que creo que nos encontramos a unos cuantos años para empezar a ver las primeras aplicaciones de gran escala dentro del mercado mundial.

Por estos motivos creo que es conveniente que en la facultad se empiece a abordar más y no solo en algunas prácticas aisladas o en las pláticas en clase de algunos cuantos profesores, el tema de la superconductividad. Siento que estamos a buen tiempo para que tengamos la oportunidad de preparar personas que se encuentren listas en algunos años, justo para cuando se empiezen a dar las primeras aplicaciones con estos materiales. Más ahora cuando estamos en los inicios de un tratado de libre comercio, si no queremos quedar rezagados con respecto a los demás países, creo que se tienen que tomar medidas importantes en la enseñanza de estos materiales y no sólo a nivel licenciatura, si no a nivel bachillerato, tal y como lo está haciendo, por ejemplo, los Estados Unidos.

En lo que respecta al desarrollo de las chumaceras superconductoras creo que actualmente estas son una buena opción para algunas aplicaciones específicas, debido a que su capacidad de carga no es lo suficientemente buena, en comparación con las chumaceras convencionales,

aunque, las pruebas citadas, hablando de velocidades superiores a las 100,000 rpm, junto con las aplicaciones señaladas para estos dispositivos, los muestran, eso sí, con características superiores a las chumaceras magnéticas pasivas. Por estas razones y por lo mostrado a lo largo de este trabajo es que creo que en un futuro, estas chumaceras superconductoras pueden ser una buena opción para entrar en el mercado y ocupar un lugar importante, más aún si a través de diferentes configuraciones, tales como, lo empezaron a llevar a cabo, las chumaceras magnéticas superconductoras híbridas, se logra mejorar la capacidad de carga que estos dispositivos pueden soportar.

Hubiéramos querido, tanto mi director como un servidor, haber reproducido experimentalmente varias de las pruebas que en este trabajo mencioné, pero por ciertos factores ajenos a nuestra voluntad, algunos, y otros por falta de equipo o material necesario para realizar dichas pruebas, nos fue imposible llevar a cabo. Sin embargo, las pruebas realizadas, tales como, la elaboración del material superconductor o el desarrollo de un dado para poder darles forma de anillos a dichos materiales, y poderlos utilizar como chumaceras en un dispositivo completo, creo que fueron suficientes como para que la persona que se encuentre interesada en continuar con este trabajo, tenga las bases necesarias como para poderlo hacer.

En esta misma parte, pero en lo que respecta a las materias primas necesarias para la construcción de una chumacera superconductoras, mencionaré que hasta este momento, por las características mostradas, es más conveniente trabajar con el compuesto YBaCuO y en este sentido, el único problema que se puede presentar en cuanto a la obtención de los materiales es por el lado del itrio, ya que es un elemento que en México no se encuentra, pero una sugerencia que se puede dar para conseguir este elemento, es la de evitar intermediarios ya que estos elevan el costo en forma considerable y si de por sí este elemento es costoso, obteniéndolo por esta manera puede elevar el costo del proyecto. La sugerencia aquí, es contactar con el principal país productor de este elemento, en este caso, China. La misma recomendación la daría para el caso de los imanes, durante este trabajo mencioné principalmente la aleación de NdFeB, ya que este imán ha demostrado ser el que actualmente presenta las mejores propiedades para utilizarlos con los superconductores, en este lado también el que demostró tener los mejores precios para, ya sea, la obtención de las materias primas y fabricar uno mismo la aleación, como para adquirir el imán ya completo fue también China.

En esta conclusión no quiero dejar de mencionar la satisfacción que me dejó el haber podido trabajar con estos materiales superconductores. Aunque actualmente muchas de las aplicaciones con estos materiales se ven como un sueño, en lo personal, tengo mucha confianza de que gracias al trabajo que se está haciendo mundialmente a nivel de investigación y desarrollo a través de Ingenieros, Fisicos y Químicos entre otros, en un futuro muy cercano estos sueños se podrán convertir en realidad, y mi deseo es de que también México a través de la Universidad Nacional Autónoma de México pueda contribuir de alguna forma a acelerar este momento, por mi parte con este trabajo quiero poner mi granito de arena para que personas ininteresadas en este tema tengan un punto de referencia de hacia donde poder dirigir sus esfuerzos.

Por último, quiero finalizar este trabajo dando las gracias a mi director de tesis, el Dr. José Gpe. Pérez Ramírez por todo el apoyo, paciencia, facilidades y prestaciones que me brindó para que pudiera llevar a cabo este trabajo, al Quim. Antonio Morales Espino por la asesoría y equipo prestado, vitales también, en la realización de este trabajo, y en general, al Instituto de Física (IFUNAM) y a las personas que en el laboran por permitirme utilizar sus instalaciones; así como a mi co-director, el Ing. Juan Manuel Rojas Gómez, por el apoyo y la confianza incondicional que me brindó en todo este proceso.

REFERENCIAS

- [1] Robert C. Juvinall. Fundamentals of Machine Component Design. John & Sons, 1983.
- [2] Gordon F. Ekholm, "Wheeled Toys in Mexico", American Antiquity, Vol. XI, Págs. 222-228, 1947.
- [3] Matthew W. Stirling, "Wheeled Toys From Tres Zapotes Veracruz", Amerindia No.1, Centro de Estudios Arqueológicos y Antropológicos Americanos Dr. Paul Rivet, Págs. 1-7, 1962.
- [4] George C. Vaillant, La Civilización Azteca, Ed. Fondo de Cultura Económica, Págs. 140-141, 1965
- [5] Thomas D. Rossing and John R. Hull, "Magnetic Levitation", The Physics Teachers, p. 552-562, December 1991.
- [6] J. G. Bednorz and K. A. Muller, "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", Z. Phys. B., Condensed Matter **64**, p. 189-193, April 1986.
- [7] Robert W. Dull and H. Richard Kerchner, "A Teacher's Guide to Superconductivity for High School Students", Largo High School and Oak Ridge National Laboratory, October 1993.
- [8] Virgil Moring Faires. Design of Machine Elements, (Fourth Edition). MacMillan Company, 1987.
- [9] Joseph E. Shigley. Mechanical Engineering Design, (Third Edition). International Student Edition, McGraw Hill, 1979.
- [10] Paul H. Black and O. Eugene Adams Jr. Machine Design, (Third Edition). McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [11] P. Orlov. Ingeniería de Diseño, (Segunda Edición), Editorial Mir, Moscú, 1985.
- [12] Luca M. Carlos, Máquinas Eléctricas.

- [13] Jean Paul Yonnet, Guy Lemaquand, Sophie Hemmerlin and Elisabeth Olivier Rulliere, "Stacked Structures of Passive Magnetic Bearings", *J. Appl. Phys.*, **70** (10), p. 6633-6635, 1991.
- [14] P. J. Ouseph, "Levitation of a Magnet Over a Superconductor", *The Physics Teachers*, p. 205-209, April 1990.
- [15] David J. Bishop, Peter L. Gammel and David A. Huse, "Resistance in High Temperature Superconductors", *Scientific American*, p. 24-31, February 1993.
- [16] Z. J. Yang, T. H. Johansen, H. Bratsberg, G. Helgesen and A. T. Skjeltop, "Levitation and Interaction in a Magnet-Superconductor System", Invited Paper in the 2nd World Congress on Superconductivity, Houston, 1990.
- [17] David J. Bishop, Peter L. Gammel, David A. Huse and C. A. Murray, "Magnetic Flux-Line Lattices and Vortices in the Copper Oxide Superconductors", *Science*, **255**, p.165-172, 1992.
- [18] E. H. Brandt, "Rigid Levitation, Flux Pinning, Thermal Depinning and Fluctuation in High-Tc Superconductors". Proceedings of the NASA-Conference "Advances in Materials Science and Applications of High Temperature Superconductors", April 2-6, 1990, in NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. USA.
- [19] Enciclopedia que habla sobre superconductividad, p. 1364-1374.
- [20] C. Y. Huang, "Applications of Superconductivity", Lockheed Missiles & Space Co., Inc., Research & Development Division, Palo alto, Ca, USA, 1987.
- [21] Richard Rowberg and Daniel Morgan, *Superconducting Magnetic Energy Storage: Opportunities and Issues*, Congressional Research Service, High Tc Information Service, **6**, No. 7, July 1993.
- [22] John E. C. Williams, "Superconducting Magnets and Their Applications", Proceedings of the IEEE, **77**, No. 8, p. 1132-1142, August 1989.

- [23] James L. Kirtley and Frederick J. Edeskuty, "Application of Superconductors to Motors, Generators, and Transmission Lines", Proceedings of the IEEE, **77**, No. 8, p. 1143-1154, August 1989.
- [24] T. D. Schlabach, "Hi-T_c Superconductor Wire Fabrication and Prospects for Use in Large Scale Applications, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey, December 1988.
- [25] P. Tixador, "Magnetic Levitation and MHD Propulsion", J. Phys. III France **4**, p. 581-593, 1994.
- [26] V. W. Adams, B.A., M. Phil., C.Phys., M. Inst. P., "High Temperature Superconductors and Marine Power Applications", J. Nav. Eng., **32** (2), p. 260-271, 1990.
- [27] Michael Tinkham, "Superconductivity 75th Anniversary", Physics Today, p.22-44, March 1986.
- [28] T. H. Geballe and J. K. Hulm, "Superconductivity - The State That Came in from the Cold", Science, **239**, p. 367-374, January 1988.
- [29] Bokhimi, "Los Materiales Cerámicos Superconductores", reporte de divulgación, Instituto de Física, 1990.
- [30] T. Van Duzer, "Superconductor Electronics", Cryogenics, **30**, p. 980-995, December 1990.
- [31] John Clarke, "Principles and Applications of SQUIDS", Proceedings of the IEEE, **77**, No. 8, p. 1208-1223, August 1989.
- [32] A. I. Braginski, "Progress and Trends in High-T_c Superconducting Electronics", FED Journal 1 Suppl., p. 18-34, 1991.
- [33] Clark A. Hamilton, Donald G. McDonald, Joseph E. Sauvageau and Stephen R. Whiteley, "Standards and High-Speed Instrumentation", Proceedings of the IEEE, **77**, No. 8, p. 1224-1232, August 1989.

- [34] Superconductivity in the USA, Electronics and Power Engineering Applications, Report of the 1993 OESTEMS mission to the USA, High T_c Information Service, 6, No. 9, September 1993.
- [35] Lee Carlson, "Bullish on Bearings", Superconductor Industry, p. 22-28, Summer 1991.
- [36] F. Hellman, E. M. Gyorgy, D. W. Johnson, Jr., H. M. O'Bryan, and R.C. Sherwood, "Levitation of a Magnet Over a Flat Type II Superconductor", J. Appl. Phys. 63 (2), January 1988.
- [37] Christopher Gabrys, John R. Hull and Thomas M. Mulcahy, "A High-Speed Demonstration Motor with Superconducting Bearings", Am. J. Phys. 60 (12), p.1153-1154, December 1992.
- [38] Hi-Tc News, May 1994.
- [39] Dantam K. Rao, "Load Capacity of Passive Superconducting Levitation System", Submitted to Magnetic Bearings and Dry Gas Seals Conference, March 13-15, 1991, Washington, D.C.
- [40] J. R. Hull, T. M. Mulcahy, K. Salama, V. Selvamanickam, B. R. Weinberger and L. Lynds, "Magnetic Levitation and Stiffness in Melt Textured Y-Ba-Cu-O, J. Appl. Phys. 72 (5), September 1992.
- [41] C. K. McMichael, K. B. Ma, M. Lin, R. L. Meng, Y.Y. Xue, P. H. Hor and W. K. Chu, "Applications of Ceramic Superconductors in Magnetic Bearings", Proceedings of the SC Global '91 Conference, December 20, 1990.
- [42] C. K. McMichael, K. B. Ma, M. W. Lin, M. A. Lamb, R. L. Meng, Y. Y. Xue, P. H. Hor and W. K. Chu, "Effects of Material Processing in High Temperature Superconducting Magnetic Bearings", Appl. Phys. Lett. 59 (19), p. 2442-2444, November 1991.
- [43] C. K. McMichael, K. B. Ma, M. A. Lamb, M. W. Lin, L. Chow, R. L. Meng, P. H. Hor and W. K. Chu, "Practical Adaptation in Bulk Superconducting Magnetic Bearing Applications", Appl. Phys. Lett. 60 (15) p. 1893-1895, 13 April 1992.

- [44] C. K. McMichael, K. B. Ma, M. A. Lamb, M. W. Lin, L. Chow, R. L. Meng, P. H. Hor and W. K. Chu, "Hybrid Superconducting Magnetic Bearing (HSMB) for High Load Devices", Proceedings of the International Symposium on Magnetic Suspension Technology, August 19, 1991.