

CAPÍTULO 4: MOTORES SUPERCONDUCTORES: ESTADO ACTUAL

4.1 Introducción

De las ecuaciones de Maxwell pueden deducirse expresiones que aportan una visión práctica muy útil en el diseño y la comprensión de las máquinas eléctricas y además manejan variables que se pueden medir y usar fácilmente.

En general se admite para el cálculo industrial, que la potencia de una máquina rotatoria puede expresarse del siguiente modo ^[Vajda]:

$$P_{salida} = K \cdot n \cdot V \cdot B_{GMAX} \cdot J_{MAX} \quad (4.1)$$

Donde:

P_{salida} = Potencia de salida

V = Volumen activo del motor

n = Velocidad de rotación del rotor

B_{GMAX} = Inducción máxima en el entrehierro

J_{MAX} = Densidad máxima de corriente

En los motores convencionales se usa material ferromagnético para incrementar el campo magnético en el entrehierro y conseguir grandes conversiones de potencia. Puesto que la chapa magnética se satura con densidades menores que 2T, ésta es la inducción máxima alcanzable en las máquinas convencionales.

La densidad de corriente máxima J_{MAX} que se puede hacer circular por los devanados esta limitada por la capacidad de evacuar el calor producido en los mismos y el espacio disponible para los conductores. Por lo tanto está muy influenciado por el sistema de refrigeración empleado.

Forzando el aire de circulación se pueden alcanzar 30 A/mm². Con circulación forzada de agua se pueden llegar hasta los 200 A/mm² ^[López]

Si se puede incrementar B_{GMAX} , se puede incrementar la potencia de salida de la máquina con el mismo volumen y densidad de corriente, o reducir volumen o cobre con la misma potencia de salida.

Es en este aspecto en el que los superconductores pueden aportar su gran capacidad de conducir corrientes muy intensas con reducidas pérdidas y generar grandes campos magnéticos prescindiendo del hierro que limita la inducción de las máquinas convencionales.

El hecho de eliminar las pérdidas en el cobre permite tener máquinas con una potencia mucho mayor que las actuales. Por ejemplo, un transformador que trabaje con una densidad de corriente de 3 A/mm², con una potencia nominal de 2MVA, si se bobinara con material superconductor con una densidad de corriente de 500 A/mm², pasaría a tener una potencia de 330 MVA. ^[Alvarez]

4.2 El factor de calidad

Laithwaite ^[Laithwaite] define la “calidad” de una máquina como “la capacidad de una máquina de transformar potencia de una forma a otra.

Es evidente que la calidad debe englobar aspectos vitales que no se refieren sólo al rendimiento, ya que este puede aumentarse siempre a expensas de otras características tales como la relación potencia/peso, el factor de potencia, el coste, etc.

Como hemos visto en expresiones anteriores, una fuerza es el producto de una corriente por la inducción magnética. En los circuitos eléctricos se precisa una f.e.m. que haga circular una corriente. Los circuitos magnéticos precisan una corriente para que produzca flujo.

El factor de calidad vendrá dado por la capacidad de obtener corriente a partir de una f.e.m. dada y por la capacidad de obtener flujo a partir de una corriente dada. Como la capacidad de transformar potencia depende de la velocidad que pueda alcanzar la máquina, se puede poner:

$$G = K \cdot (I/E) \cdot (\Phi/I) \cdot \omega = K \cdot (1/R) \cdot L \cdot \omega = K \cdot (L/R) \cdot \omega \quad (4.24) \quad (4.3)$$

donde: G = factor de calidad
 K = constante de proporcionalidad
 E = f.e.m.
 Φ = flujo creado
 I = intensidad que crea el flujo
 R = resistencia del secundario
 L = inductancia mútua entre rotor y estator
 ω = velocidad angular

Una máquina con bloques de superconductor en el rotor tendrá una L pequeña, ya que se tendrá un entrehierro grande y no tendrá hierro, pero una R muy pequeña, puesto que el rotor es superconductor y una ω grande en aquellas máquinas donde el rotor pueda levitar.

Se puede, por lo tanto, obtener una máquina con un factor de calidad grande, aunque el rendimiento no sea del orden del de las máquinas convencionales.

4.3 Máquinas eléctricas con superconductores

Desde el descubrimiento de los superconductores tipo II, y paralelamente a la mejora de sus características, han ido apareciendo multitud de aplicaciones que abarcan casi todos los campos de la técnica. Entre ellos, la electrotecnia con transformadores, limitadores de corriente, almacenamiento magnético de energía, conducción de energía eléctrica sin pérdidas y varios tipos de motores y generadores. En este apartado se presenta el estado actual de la aplicación de los materiales superconductores a los motores y generadores

Los materiales superconductores presentan un comportamiento histerético, al ser sometidos a ciclos variables de campo magnético. Los superconductores tipo II son materiales con memoria, cuya magnetización depende fuertemente de la historia previa a las condiciones actuales de trabajo. Cada vez que se recorre un ciclo de histéresis se producen pérdidas proporcionales al área de dicho ciclo.

Este hecho hizo que los primeros motores en los que se pensó fueran aquellos en los que se mantuviera un estado estable, con al menos un conductor recorrido por corriente continua, como pueden ser máquinas homopolares de corriente continua o motores síncronos.

Más tarde, con materiales superconductores con fuertes centros de anclaje, que dificultan el movimiento de los vórtices, se han diseñado y construido motores de inducción, y de reluctancia.

Dado el peculiar ciclo de histéresis de los superconductores, también se han construido motores, que aprovechan precisamente las pérdidas de histéresis para producir par. Son los motores de histéresis.

Existen aplicaciones donde las altas prestaciones son preponderantes y el rendimiento queda en un segundo plano. Un claro ejemplo son los motores para aplicaciones de baja inercia y grandes velocidades.

Un rotor cuyo material activo presente una componente diamagnética, puede levitar.^[Bosch] En capítulos anteriores se ha descrito el comportamiento diamagnético de los superconductores. Se puede pensar, pues, en motores con rotor superconductor que leviten, evitando, por lo tanto, la necesidad de cojinetes mecánicos.

Los cojinetes siempre tienen asociadas velocidades máximas, pérdidas de fricción, necesidad de mantenimiento y sustitución. Los motores construidos en el ICMAB en colaboración con la UPC, aprovechan esta característica, siendo motores levitantes que pueden alcanzar grandes velocidades.

Constituyen el objeto principal del presente trabajo y los próximos capítulos se dedicarán a su descripción y al estudio de sus características

4.3.1 Motores Devanados

El primer reto para la fabricación de estos motores, es la consecución de un cable que posea características eléctricas aceptables. Se pueden construir los devanados con metal superconductor de baja temperatura, pero requieren helio como

refrigerante. Tienen la ventaja de ser muy dúctiles y poderse bobinar casi con cualquier radio, pero presentan el inconveniente de la necesidad de refrigerar a bajas temperaturas.

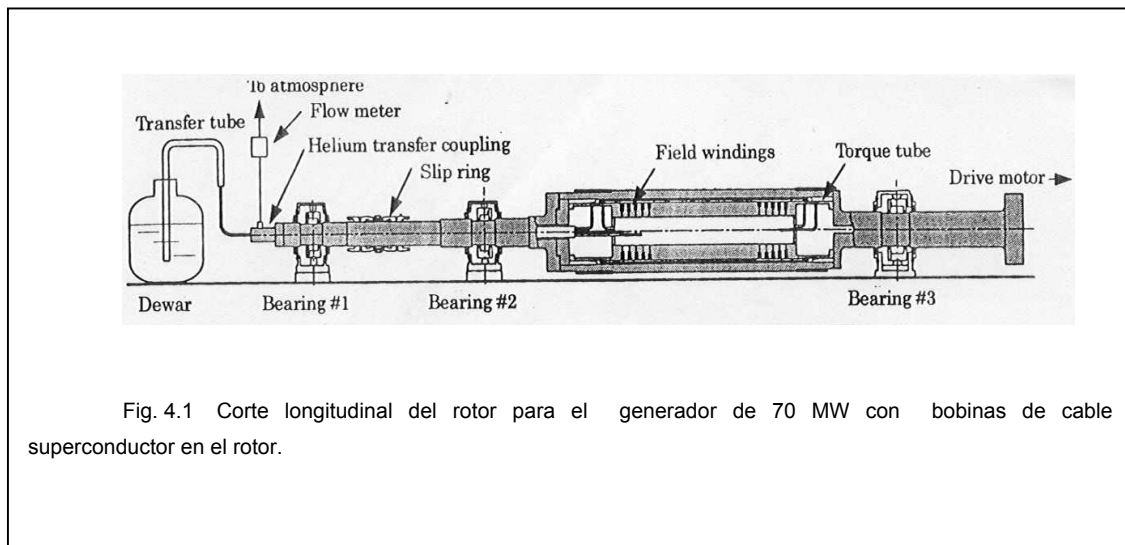
La alternativa son los cables hechos con superconductores de alta temperatura y refrigerados con nitrógeno, pero, actualmente, sus características están todavía muy lejos de las necesarias para poder ser usados en motores comerciales. Solamente refrigerados a bajas temperaturas pueden soportar campo y corriente necesarios para las diversas aplicaciones. Para la fabricación del mismo se requiere una tecnología muy compleja.

Los principales fabricantes de cable superconductor (Intermagetics General, American Superconductor, Sumitomo, Vacuumschmelze, NST) han apostado por la técnica PIT (Powder in tube) que consiste en poner polvo de BSCCO superconductor en un tubo de plata y alargarlo mediante extrusión o laminación. El polvo interior va adquiriendo la forma del tubo. Posteriormente, con el tubo ya alargado se produce un tratamiento de calor. Normalmente, el tratamiento se produce en dos etapas. En la primera se produce una fusión parcial del material a 900°C y posteriormente se somete a unos 840°C durante unas 100 horas. Las muestras resultantes son texturadas y con simetría central.

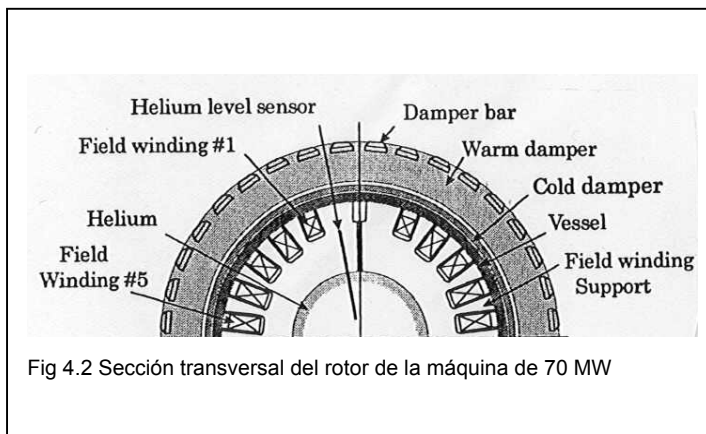
Con esta técnica se produjeron cables de hasta 1000 m de longitud en 1994. Actualmente este cable permite doblarse como mínimo un radio de 3 cm y soporta una $J_c=7000 \text{ A/cm}^2$ refrigerado a 77K. Con estas limitaciones se pueden construir todos los tipos de motores clásicos pero con las ventajas que aporta el material superconductor. En la actualidad, se desarrolla una segunda generación de cables superconductores, los llamados “Coated Superconductors” en la que el superconductor se reduce a un recubrimiento de escasas micras. Las densidades de corriente que se alcanzan sin campo exterior llegan a 10^8 A/mm^2 a 77K y son más inmunes al campo aplicado

En general se suele poner el cable superconductor donde pueda trabajar en estado estable evitando así las pérdidas por histéresis que se producen si deben transportar corriente alterna.

Destacaremos algunos ejemplos de éste tipo de máquinas construidas en los últimos años:



-Generador síncrono de 70 Mw. Generador construido en Japón^[Shimada], con



el objetivo de verificar la tecnología básica requerida para el diseño y posterior construcción de un generador de 200 MW.

El estator es convencional y en el rotor se han situado las bobinas de

NbTi refrigeradas con helio. La figura 4.1 muestra el esquema longitudinal de éste motor. El prototipo aporta ciertas ventajas respecto los convencionales como incremento del rendimiento en un 1% , reducción de volumen y peso y baja reactancia síncrona

-Motor síncrono de 1000 hp, construido en los Estados Unidos. Dispone de un devanado estatórico convencional refrigerado con agua y rotor con bobinas de

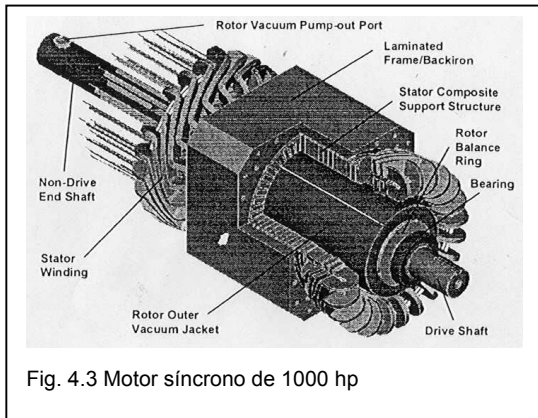


Fig. 4.3 Motor síncrono de 1000 hp

superconductor de alta temperatura, refrigeradas con helio^[Aized]. Las bobinas han sido fabricadas con 2 hilos de superconductor de alta temperatura. Refrigerado a 33 K, y con una corriente de 134 A, el campo generado por el rotor es de 1,5T. Las principales ventajas respecto un motor

convencional de las mismas características son una reducción de las pérdidas a la mitad^{[Song][Joo][Xu]}. Asimismo, se han reducido a la mitad el peso y el tamaño. La figura 4.3 muestra el motor descrito

-Motor lineal de inducción de 11 kW, construido en Japón. El prototipo está

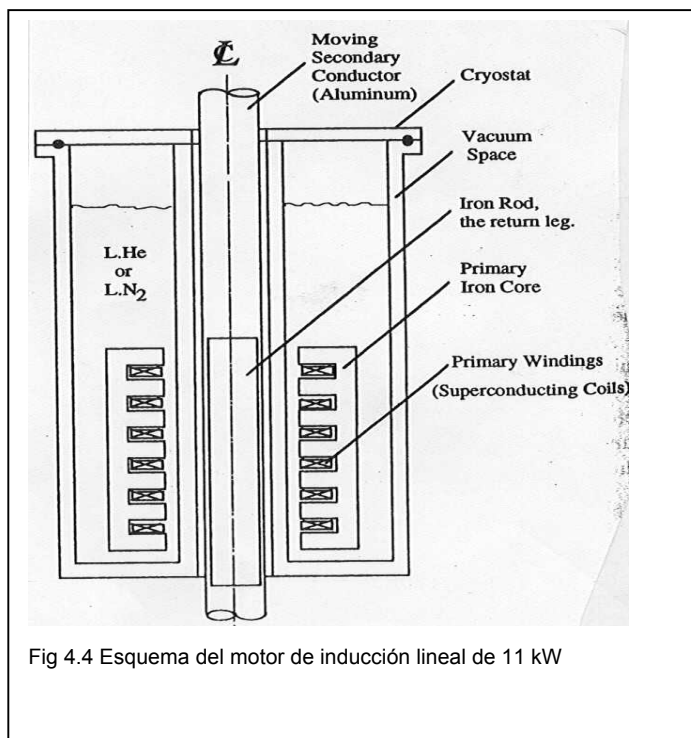
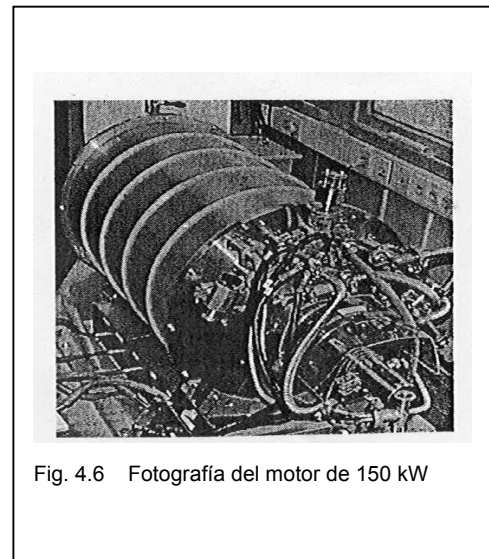
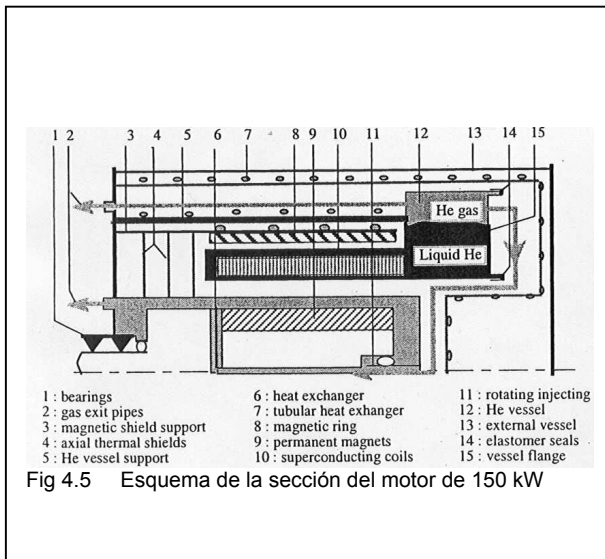


Fig 4.4 Esquema del motor de inducción lineal de 11 kW

pensado para usar en sistemas de elevación y en la fase de medición se pretendía estudiar^[Ishiyama] el comportamiento de los devanados al someterlos a corriente alterna en un ambiente real, o sea, con campos magnéticos externos y excitados con corrientes con alto contenido de armónicos. Básicamente esta constituido por un devanado primario con superconductor de tres fases y

dos polos, a base de hilo de CuNi/Cu/NbTi (3.2/1.1/1), refrigerado con helio, y secundario formado por un cilindro de aluminio, que se desplaza linealmente. La figura 4.4 muestra el motor indicado

-Motor síncrono de 150 kW. construido en Francia. Se trata de un motor híbrido, con imanes de NdFeB en el rotor, refrigerados a 150K y devanado trifásico en el estator, de 8 polos, con bobinas formadas por 7 cables extrafinos de NbTi,



refrigeradas con helio^[Tixador1].

El conductor de NbTi fue introducido en los años 80 i sus características en c.a. han abierto nuevas oportunidades para aplicaciones en máquinas eléctricas. La buena relación de par o potencia por unidad de peso los hacen una buena elección para barcos, trenes y en general sistemas en movimiento.

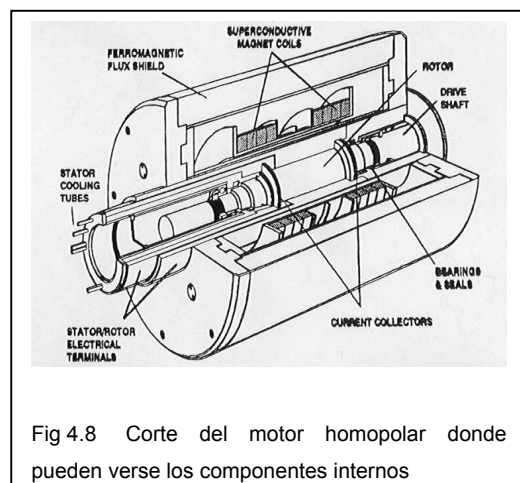
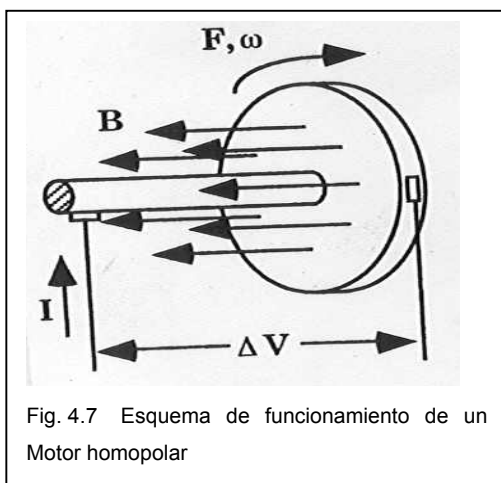
El uso de superconductor en el estator y el rotor es una opción muy atractiva, pero la necesidad de refrigerar el rotor en movimiento añade grandes dificultades, especialmente a bajas temperaturas (5K). A temperaturas de 20K, con cables HTSC, las dificultades disminuyen, pero las características eléctricas de los cables son mucho menores. Para este motor se ha escogido la opción de poner imanes en el rotor y cable superconductor en el estator.

Los devanados del estator se han distribuido en 4 cilindros con 24 bobinas elementales y tres fases situadas en el interior del contenedor de helio. Una pantalla magnética se ha dispuesto exteriormente alrededor del sistema criogénico para confinar el campo en el interior de la máquina..

Se pretende así conseguir un motor con un peso relativamente bajo y un buen rendimiento. El resultado es el motor de 150 kW, 400 rpm, cuyo esquema

transversal se muestra en la figura 4.5 La figura 4.6 es una fotografía del motor indicado

-Motor homopolar de 125 kW construido en los Estados Unidos. El motor ha sido construido y montado en un barco de la marina USA. El campo magnético se genera con bobinas de BSCCO 2223 y produce 125 kW refrigerado a 4.2 K y 91 kW cuando se refrigera a 28 K^[Superczynsky]. Se ha elegido un motor homopolar por su capacidad de producir un par grande y constante en un amplio rango de velocidades. Además el devanado de un motor homopolar no está sometido a un par de reacción al par producido en el rotor. La figura 4.7 muestra el principio de funcionamiento donde puede observarse que el par se produce sin variación en la dirección del campo magnético aplicado. La figura 4.8 muestra un corte del motor construido que permite observar los componentes internos. Pueden observarse dos bobinas que se han realizado con 5640 vueltas de hilo superconductor



-Motor síncrono a diferentes temperaturas de funcionamiento

Cabe preguntarse el comportamiento de los motores descritos en los apartados anteriores pero refrigerados con nitrógeno líquido. Tal como hemos señalado al principio del capítulo, los cables superconductores de altas temperatura a 77 K todavía no están disponibles con las características necesarias para ser usados en motores comerciales. Como ejemplo citamos la caracterización de un motor síncrono^[Ericson]

construido en Finlandia, de 1500W, cuya corriente de transición sigue la siguiente variación con la temperatura :

Parámetro/Temperatura	77K	20K	4K
Corriente de Transición(A)	38	185	235

Puede observarse la gran variación en la corriente de transición al subir la temperatura a la de ebullición del nitrógeno. En los últimos 2-3 años, la fabricación de cables ha experimentado grandes progresos. Actualmente, se dispone de cable superconductor de $J_c=36 \cdot 10^4$ A/cm², soportando el autocampo. A pesar de ello, todavía no se ha llegado a los valores de corriente y campo críticos idóneos para ser usadas en máquinas eléctricas

4.3.2 Motores con bloques de superconductor

Estos motores pueden tener el devanado inductor como los motores clásicos o de cable superconductor como los indicados en el apartado anterior. El material activo del inducido está formado por bloques de superconductor acompañado o no de material ferromagnético según los casos.

El principio de funcionamiento de los motores construidos de esta forma es parecido al de los motores clásicos homónimos, pero con las características diferentes que les proporciona el material superconductor. Los más construidos han sido motores de reluctancia variable, de histéresis y motores síncronos. Utilizan la capacidad de atrapar campo magnético, el diamagnetismo, o la característica histerética de los superconductores de alta temperatura.

A partir del desarrollo de Y-Ba-Cu-O texturado que, actualmente está disponible con densidades de corriente superiores a $4 \cdot 10^7$ A/m², a la temperatura del nitrógeno líquido, muchos investigadores han construido y estudiado motores de

campo atrapado y histéresis con bloques de este material superconductor. La principal ventaja de estos motores radica en tener una relación par-masa o potencia-masa superior a sus homólogos convencionales, además de poder levitar.

Los motores convencionales de imanes permanentes están magnetizados uniformemente a través del volumen del material y los materiales comúnmente usados como el Nd-Fe-B poseen una magnetización remanente de 1.5 T. Además tienen un gran campo coercitivo, o sea, que la magnetización varía poco si se someten a un campo inverso.

Igualmente el Y-Ba-Cu-O se desmagnetiza débilmente y la magnetización se produce por corrientes reales en el superconductor, que se pueden considerar, desde el punto de vista macroscópico, uniformemente distribuidas.

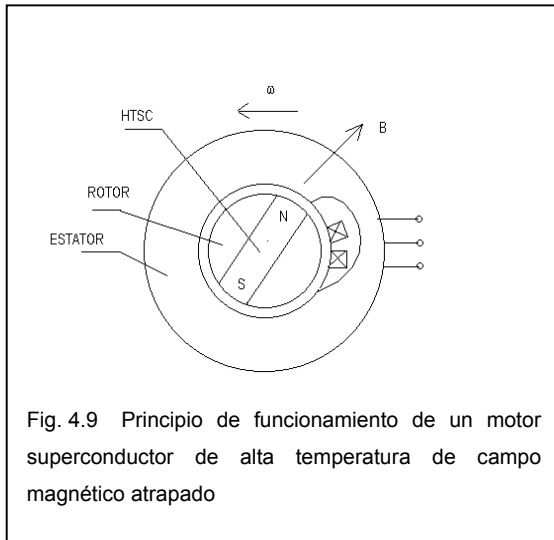
La ventaja del superconductor es que la magnetización es proporcional al producto de la densidad de corriente y el radio del grano. Así, si se consigue un bloque de un solo grano se pueden conseguir magnetizaciones superiores a las del imán permanente.

Para cilindros que han sido enfriados en un campo magnético intenso, la magnetización resultante es de forma cónica, empezando por cero en el borde del cilindro y acabando el pico en el centro ^[Vajda]. La magnetización media es un tercio del valor de pico. Así para conseguir características semejantes a las de los motores convencionales debería poderse magnetizar con un valor de pico de 4.5 T. A 77 K se han conseguido magnetizaciones de 1T en la superficie del cilindro de superconductor.

La distribución interior de la magnetización no se ha medido hasta la fecha, pero se sabe que depende de la forma de la muestra y de su composición granular. Actualmente se han obtenido muestras con valores de 8.5 T a 50 K. Con estos valores de magnetización se pueden conseguir motores cuyas características sean claramente superiores a los convencionales.

Seguidamente se describirán los principios de funcionamiento de los que han sido construidos hasta ahora y presentados en los últimos congresos.

4.3.2.1.- Motores de flujo atrapado



En capítulos anteriores se ha visto que los superconductores tipo II permiten que el flujo penetre en ellos a partir de un campo exterior superior a H_{c1} . Este flujo es atrapado por los centros de anclaje que intencionadamente se han introducido en el interior del material. Los bloques de superconductor pueden estar envueltos en un molde de acero, que ayuda a confinar el campo magnético y sirve de soporte mecánico para proteger a los bloques de superconductor de las

fuerzas tensionales a que serán sometidos.

El superconductor se comporta de modo parecido a un imán permanente. Si el campo generado por el inductor empieza a girar, el rotor seguirá el campo y girará con él, como si se tratara de un motor síncrono^[Hull].

Si se incrementa el par en el eje, la velocidad permanecerá constante y se incrementará el ángulo de par. Este proceso seguirá mientras la energía requerida para mantener la carga en el eje sea inferior a la necesaria para sacar el flujo de los centros de anclaje en el interior del superconductor.

Si el par en el eje sigue aumentando y el campo inductor gira a mayor velocidad que el rotor, entonces se empiezan a producir pérdidas por histéresis que serán las que definirán la característica del motor.

Otra posible configuración consiste en disponer una bobina superconductor rodeando un rotor saliente como los usados en un motor de reluctancia clásico. El par en este rotor tiene una componente sincrónica y una componente de reluctancia, que viene dada por^[Rodrigues].

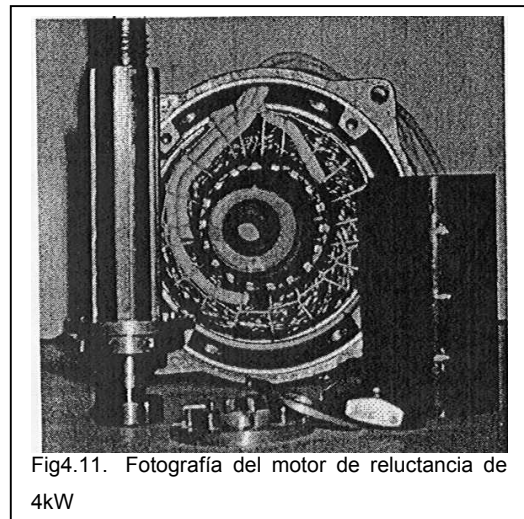
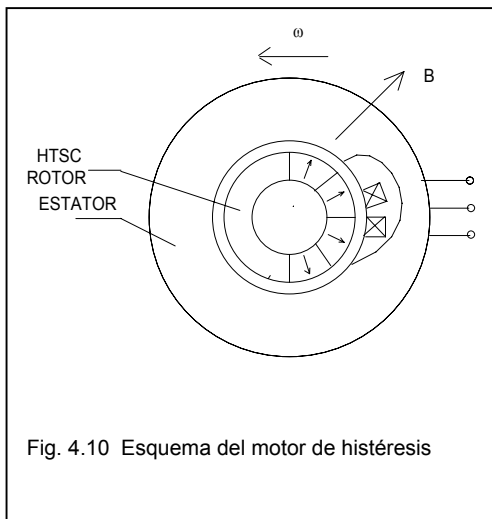
$$T(\theta) = T_E(\theta) + T_R(\theta) = \frac{3U\Psi_{RSmax}}{2X_{max}X_{min}} \sin \theta + \frac{3U^2}{2X_{max}X_{min}} (X_{max} - X_{min}) \sin(2\theta)$$

4.3.2.2.-- Motores de Histéresis

El esquema constructivo de estos motores es el que muestra la figura. El superconductor puede ser un cilindro completo como el dibujado o bloques en forma de sector circular pegados unos a otros hasta cubrir toda la superficie marcada^[Kovalev]. Las características son parecidas en ambos casos

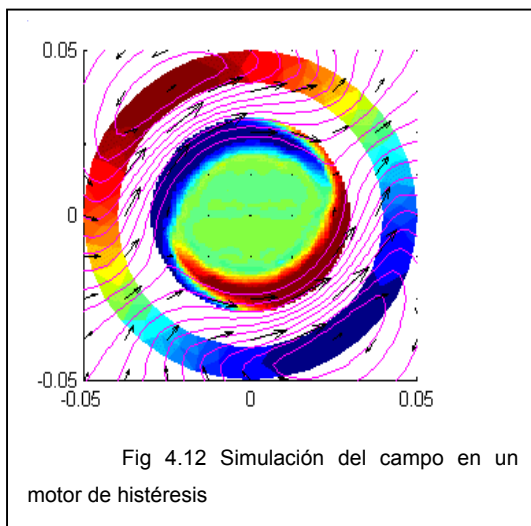
Contrariamente a lo que sucede en los motores convencionales, en este caso el par mecánico resulta de la repulsión entre el campo rotatorio del estator y los polos magnéticos inducidos en el superconductor.

La figura 4.10 muestra el esquema del motor con las partes más importantes.



En la figura 4.11 se muestra una fotografía del motor fabricado en el Moscow State Aviation Institute. La figura 4.12 es la simulación del campo producido y atrapado en un motor se histéresis realizada en la Universidad de Oxford^[Barnes]

El par se puede considerar debido a la interacción entre las corrientes in



e intragranulares producidas en el superconductor y el campo rotatorio y es linealmente proporcional a las pérdidas totales por histéresis en el rotor e independiente de la velocidad angular de giro.

A la temperatura del nitrógeno líquido los parámetros del motor

superconductor son actualmente de 3 a 5 veces superiores a los de los motores de histéresis convencionales.

El par producido por un rotor de material superconductor de radio exterior D_0 y iámetro interior D_i viene dado por la expresión ^[Rodrigues]:

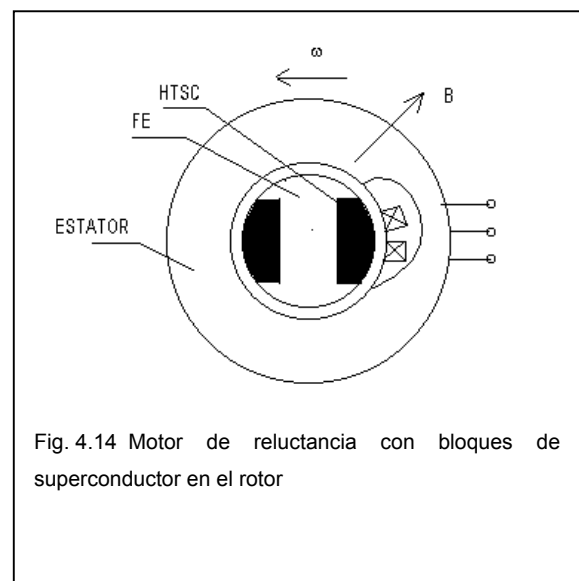
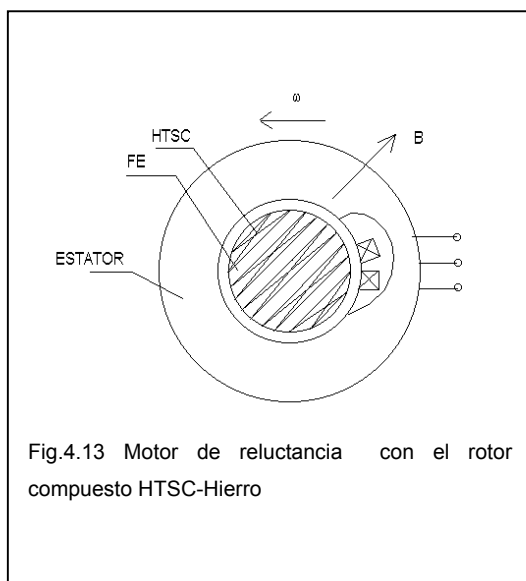
$$T_u = \frac{p}{3\pi} D_0 J_c \bar{B} \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^3 \right] \beta(\delta) \quad \text{donde} \quad \beta(\delta) = 1 - \frac{1}{\alpha \delta^{2.2} + 1}$$

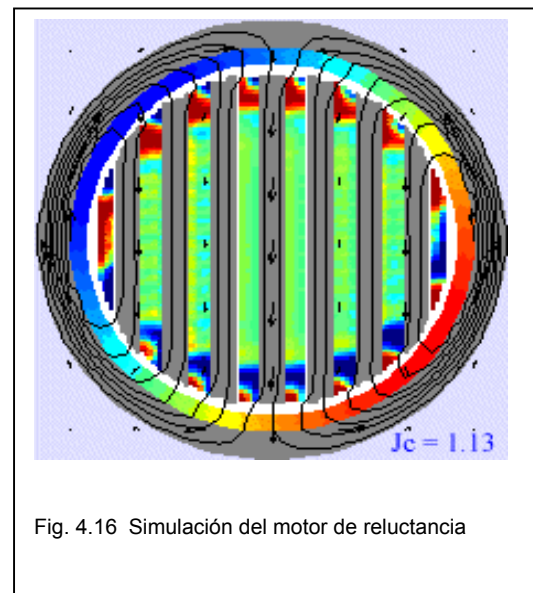
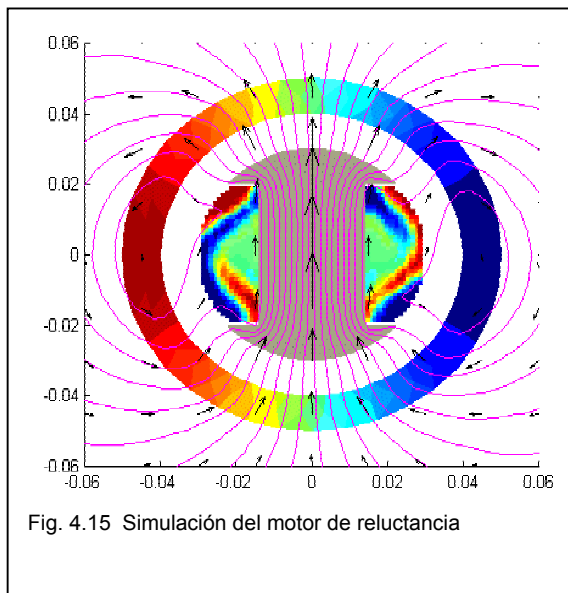
Los factores δ y α , dependen de las propiedades del material superconductor y del diámetro del rotor.

4.3.2.3.- Motores de reluctancia

La potencia máxima de salida y las características del motor de reluctancia están determinadas básicamente por la relación entre las permeabilidades magnéticas en el eje longitudinal y transversal.

En los motores convencionales se consigue una alta relación entre ambas reluctancias usando material magnético en un eje y aire en el otro. En el motor superconductor se reemplaza el aire por bloques de material superconductor que impone sus propiedades diamagnéticas ^{[Oswald][Kovalev]}





Mejorando la relación entre las conductividades se incrementa la potencia que el motor puede entregar. Los resultados de las pruebas hechas hasta el momento muestran que la relación potencia-masa del motor se incrementan en una relación de 3-5 en los motores con bloques de superconductor a la temperatura del nitrógeno respecto a los convencionales.

En las figuras 4.13 y 4.14 se muestran dos posibilidades de realización del rotor para estos motores. En ambas se pretende incrementar la relación indicada anteriormente, pero experimentalmente se demuestra que el primer tipo posee un mayor factor de potencia y rendimiento que el segundo, que sin embargo le supera en el par de arranque. En ellas se puede observar los esquemas de funcionamiento de los dos tipos de motores de reluctancia ensayados. Se han fabricado y ensayado motores de hasta 4kW en el Moscow State Aviation Institute.

Las figuras 4.15 y 4.16 muestran simulaciones de los mismos tipos de motores realizadas en la Universidad de Oxford y que fueron presentadas en el SCENET (The european network for superconductivity, 2nd Workshop on APPLIED SUPERCONDUCTIVITY), celebrado en Noviembre de 1997, en Barcelona.

La expresión del par en este tipo de motores, en caso de ser alimentados por un sistema trifásico de tensiones constante, viene dado por:

$$T(\theta) = -\frac{3}{2} \frac{U^2}{\omega^2 L_{max} L_{min}} (L_{max} - L_{min}) \text{sen}(2\theta)$$

Este par describe dos ciclos por cada rotación completa del rotor, con valores máximos para valores de $\theta = (k+1)(\pi/4)^\circ \text{Elec}$, donde $k=0,1,2\dots$

La figura 4.17 muestra un resumen de los motores con bloques de superconductor en el rotor^[Rodrigues]

