

CAPÍTULO 6: MOTOR DE FLUJO AXIAL

6.1 Introducción

En el capítulo 5 se describe la construcción y estudio de un motor de flujo radial. Este es el tipo de motores predominante en aplicaciones industriales. Su geometría permite disponer de cabezas de bobina pequeñas en comparación con la longitud activa del conductor. En los motores convencionales significa un buen aprovechamiento del cobre, puesto que la mayor parte del mismo crea campo magnético útil y el flujo de dispersión es menor. Esta geometría es adecuada en sistemas de baja reluctancia en los que el núcleo férreo del interior del rotor permite que el campo sea intenso con corrientes de excitación bajas. Pero, en nuestro caso, en el que no se utiliza el hierro en el interior del rotor, el alcance radial del campo es corto debido a su estructura multipolar con lo que la mayor parte del volumen interior es inactivo, sólo supone un aumento de la reluctancia del motor.

Un segundo aspecto a tener en cuenta lo constituye la interacción en dirección axial que da lugar a la estabilidad del rotor en esa dirección. En el motor de flujo radial descrito en el anterior capítulo, el escaso gradiente de campo magnético a lo largo del eje, hace que las fuerzas de levitación, en la dirección axial, sean pequeñas. Para aumentar la estabilidad en esa dirección, se añadió un disco superconductor en la parte superior con el que aprovechar el flujo de dispersión, de componente axial.

Otra alternativa para conseguir la interacción, en la que se basa este tipo de motores, es la del motor con campo axial, con rotor en forma de disco. Este tipo de motor, en modo convencional, no está muy extendido, sin embargo, es muy atractivo en aplicaciones especiales en las que la aceleración o la baja inercia son fundamentales. En ellos, el flujo de excitación es axial, creado por dos semiestatores planos, y el rotor se sitúa entre ellos. En esta configuración se puede obtener un gradiente de campo importante en el sentido axial y por ello, disponer de fuerzas de levitación elevadas sobre el rotor. Por otro lado, en esta disposición, el entrehierro está totalmente ocupado

por el material superconductor, lo que da lugar a un aprovechamiento íntegro de la región donde tiene lugar la interacción, independientemente del número de polos.

Nuestro siguiente paso es, por lo tanto, investigar las posibilidades de los superconductores en este tipo de motores. Para ello se construirá un motor con bloques de superconductor y se analizará su comportamiento.

En nuestro caso, se utilizan dos semiestatores de ocho polos y tres fases. Suponemos que el campo generado interactuará con el rotor superconductor produciendo las fuerzas necesarias para dar lugar al par y a la levitación. Estas fuerzas quedarán determinadas por el ciclo de histéresis de magnetización del superconductor, tal y como se observó en el capítulo anterior.

El capítulo consta de una descripción de los componentes básicos, de las simulaciones hechas por ordenador que nos permitirán analizar la viabilidad del proyecto, la construcción del motor y sus caracterizaciones estática y dinámica. Para finalizar se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado.

6.1.1 Motor de flujo axial

La característica principal de un motor de flujo axial es que el devanado inductor crea un campo magnético paralelo al eje de giro rotórico o principal del motor.

Los motores de flujo axial presentan ciertas ventajas respecto a los de flujo radial relativamente poco explotadas. Tradicionalmente se han usado éstos últimos en aplicaciones de conversión de potencia, pero hay aplicaciones donde las características del flujo axial los hace especialmente atractivos, como es el caso de la utilización de las fuerzas entre el inducido y el inductor para limitar esfuerzos y cargas sobre los cojinetes^[Bosch 1].

En estos motores el rotor gira entre dos semiestatores magnéticamente activos que crean el campo y poseen grandes superficies polares. La forma de disco permite

grandes flujos con pequeño volumen rotórico, lo que repercute en una disminución del momento de inercia y de la masa del rotor

El rotor del motor que hemos escogido para nuestro trabajo, ha sido obtenido a partir de un motor comercial (Mavilor), en el que se ha sustituido el rotor de imanes permanentes por otro superconductor. Éste último es un disco de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio que sustituye el convencional. Ocho discos de material superconductor insertados en el disco, constituyen la parte activa del rotor.

Al no haber material ferromagnético en el rotor, se incrementa considerablemente su reluctancia. Este hecho determina las características del motor que deberá ser alimentado con corrientes de intensidades mayores que las habituales para crear el campo magnético.

En las bobinas del estator, prácticamente no hay dispersión de flujo, salvo en las cabezas de bobina y, dependiendo de la separación entre los dos semiestatores y del paso polar, el flujo que se cierra sin participar en la interacción, entre polos del mismo semiestator, se puede minimizar dando lugar a la característica baja inductancia del rotor que permite una muy buena respuesta transitoria frente a un escalón de tensión de alimentación.

Desde el punto de vista térmico la configuración es muy favorable, ya que divide en dos bloques las pérdidas en el hierro y en el cobre y permite la evacuación de calor por ambos semiestatores, incrementando la relación entre la superficie de evacuación y el volumen de hierro estático. Esto permite prescindir de los canales de aireación en máquinas grandes. En nuestro caso, la refrigeración se lleva a cabo mediante el arrastre por fricción del fluido que rellena el entrehierro en buen contacto con todas las partes activas.

Según la posición relativa de los dos semiestatores, se pueden conseguir configuraciones distintas, enfrentando entre si polos del mismo signo o de signos diferentes o desplazándolos parcialmente para conseguir situaciones intermedias ^[López].

Actualmente no hay motores de inducción de flujo axial de gran potencia, aunque en la década de los 80 se han comercializado motores de hasta 10 kW. La gran longitud del entrehierro no ha permitido que alcancen grandes inducciones y por lo tanto han penetrado poco en el campo de los accionamientos por su bajos rendimientos, sin embargo su bajo coste y el reducido peso del rotor, los hacen interesantes en el campo de posicionamientos de precisión, donde la baja inercia es fundamental.

En el caso de rotor con bloques superconductores (figura 6.2) se añade una ventaja importante, dado que el flujo penetra en la dirección favorable. El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (de aquí en adelante YBCO) es un material claramente anisótropo^[Mora] y, por lo tanto, con valores críticos muy diferentes según la dirección que se considere. En nuestro caso el flujo pasa de un semiestátor a otro cruzando el entrehierro en la dirección perpendicular al mismo y penetrando en las pastillas de superconductor por la dirección más favorable.

El prototipo que se ha construido y que es objeto de este apartado, emplea los semiestátors procedentes de motores de flujo axial comerciales MA55 de Mavilor Motors, con rotor de imanes permanentes de Sm Co. Los semiestátors son circulares con un diámetro exterior $\Phi_e = 170$ mm, y uno interior $\Phi_i = 84$ mm, Su espesor es de 18mm

El objetivo de nuestro trabajo es el análisis del funcionamiento del motor y la adquisición de experiencia y conocimientos para proponer mejoras. Esperamos que nos permita adquirir la tecnología suficiente para posibilitar en el futuro incidir en sistemas como acumuladores de energía y transporte levitado.

Disponemos de ocho discos de superconductor de 30 mm de diámetro y 4 mm de grosor, cortados de bloques del mismo diámetro crecidos mediante “top seeding” isotérmico, que no han sido caracterizados individualmente pero se conoce su comportamiento superconductor a través de una estimación experimental de la fuerza de levitación sobre el bloque completo del que se ha cortado cada disco. La caracterización completa de estas muestras escapa al alcance de éste trabajo. Cualquier variación de sus

prestaciones modificaría sólo cuantitativamente el resultado de la investigación. Típicamente, el material utilizado tiene las siguientes características:

$$T_c = 90 \text{ K}$$

$$I_c \sim 10^4 \text{ A/cm}^2$$

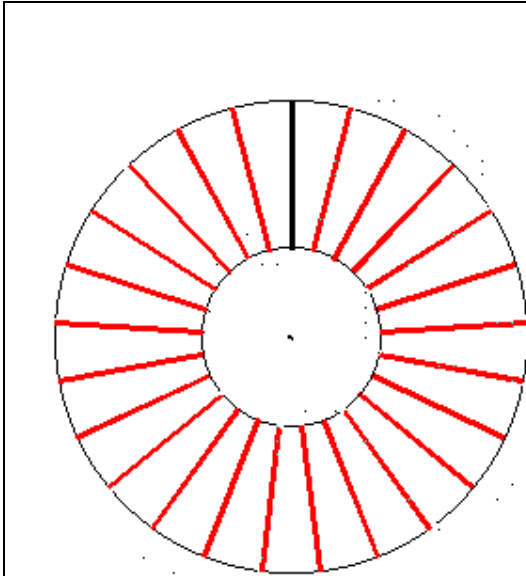


Fig. 6.1 Esquema de ranuras del semiestator de Mavilor Motors S.A.

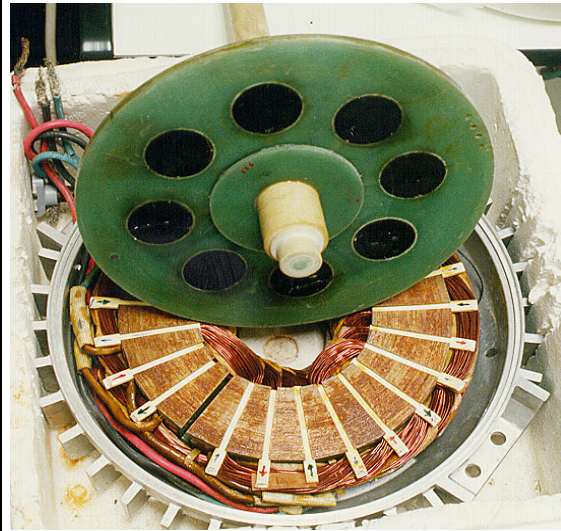
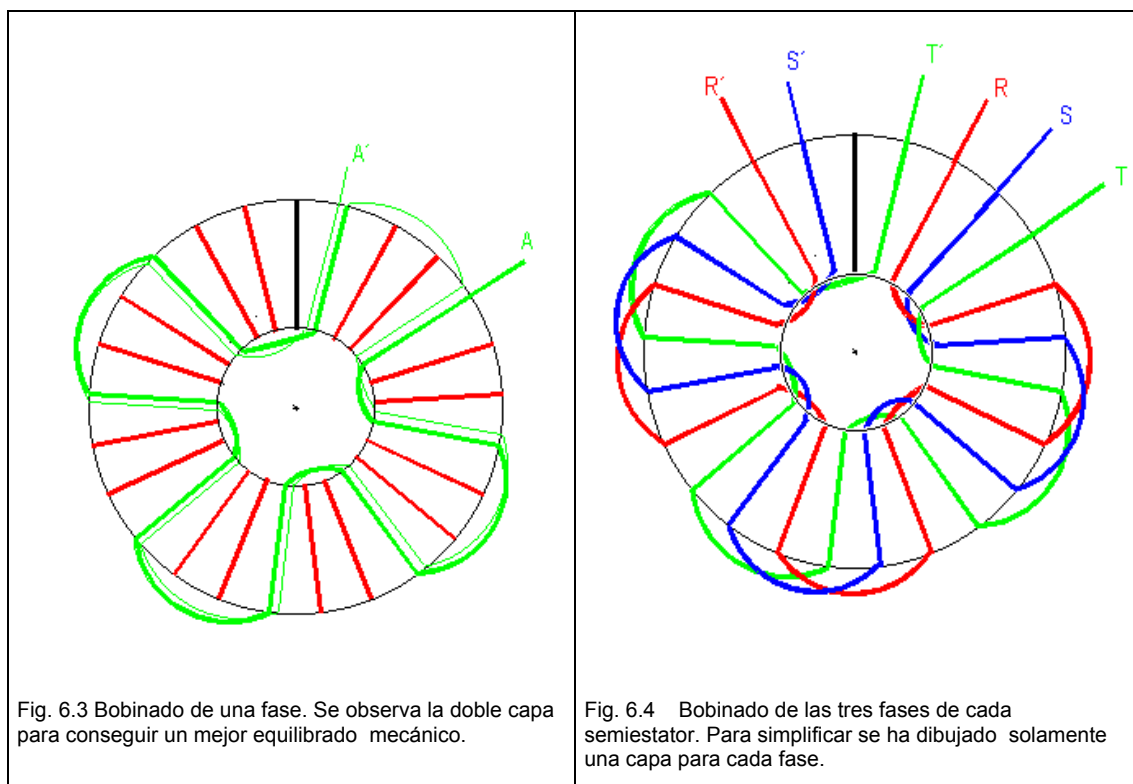


Fig.6.2 Fotografía de un semiestator y del rotor.

Como hemos mencionado en los párrafos anteriores, para la realización de la parte experimental de este trabajo se ha partido de dos semiestatores fabricados por Mavilor Motors S.A. Cada uno de ellos tiene un devanado trifásico distribuido en 24 ranuras, más una ranura vacía para evitar el cosido magnético, ya que están diseñados originariamente como servomotor síncrono de ocho pares de polos con rotor de disco de baja inercia y ocho imanes permanentes de Sm-Co. Comercialmente se usan en servomotores de baja inercia que pueden entregar una potencia de 5 kW. La figura 6.1 muestra la disposición de las ranuras en cada semiestator, en negro está marcada la ranura vacía. En la figura 6.2 puede verse una fotografía del estator en su carcasa junto

con el rotor superconductor construido. En ella se puede apreciar la ranura vacía del estátor que se corresponde con la marcada en negro en el esquema anterior.

El devanado es de doble capa, trifásico, con una ranura por polo y fase y con 5 espiras por ranura y capa, acortado un 1/25 de ranura debido a la ranura vacía. Las ranuras activas y las cabezas de bobina configuran un devanado en “Cruz de Malta”. Esta configuración es muy habitual^[Bosch 2] en este tipo de motores, por facilidad de construcción y porque se consigue con ella una onda de fuerza magnetomotriz senoidal con escasa distorsión armónica .



En los catálogos del fabricante se pueden encontrar las principales características de los estatores utilizados, montados en el motor comercial M55 de Mavilor Motors. Entre ellas destacamos las siguientes:

Resistencia del devanado: 0.31Ω

Inductancia del devanado: 1,85 mH

Constante de tiempo eléctrica: 5,9 ms

La figura 6.3 muestra la distribución de una fase de acuerdo con la descripción que ya se ha hecho. En la figura 6.4 se muestra la disposición de las tres fases en las ranuras de cada semiestátor. Se puede apreciar, en los dos casos, la asimetría que origina la ranura vacía.

Los dos semiestátors de que disponemos son aparentemente idénticos. Las tres fases del devanado se distinguen exteriormente por un color distinto del aislante de cada fase (negro, rojo y azul) y los dos terminales de cada fase tienen una longitud diferente para distinguir los bornes homólogos y están disponibles al exterior, pudiéndose realizar cualquier tipo de conexión. Cuando se montan los dos semiestátors con la ranura vacía encarada, quedan también encaradas una fase del mismo color y dos fases de colores distintos.

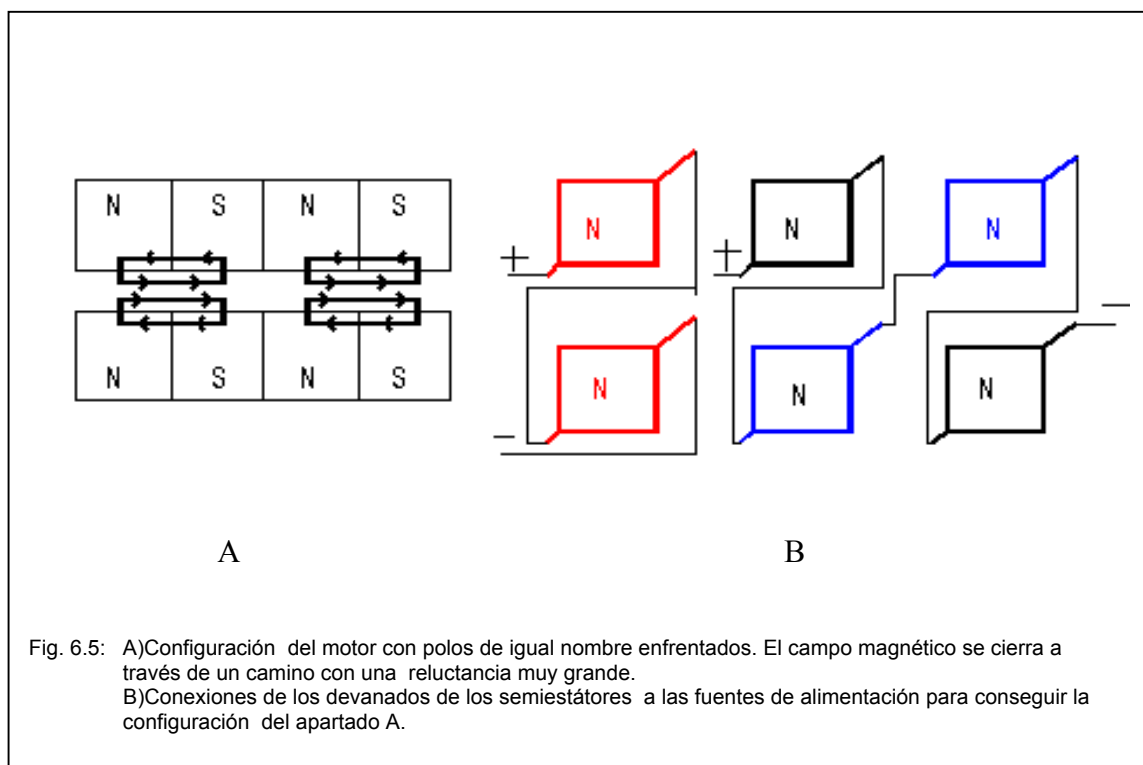


Fig. 6.5: A) Configuración del motor con polos de igual nombre enfrentados. El campo magnético se cierra a través de un camino con una reluctancia muy grande.
B) Conexiones de los devanados de los semiestátors a las fuentes de alimentación para conseguir la configuración del apartado A.

Como se ha indicado en los párrafos anteriores, se pueden montar los semiestatores encarando polos de igual nombre, de nombre distinto o solapados. En cada caso las propiedades serán diferentes.

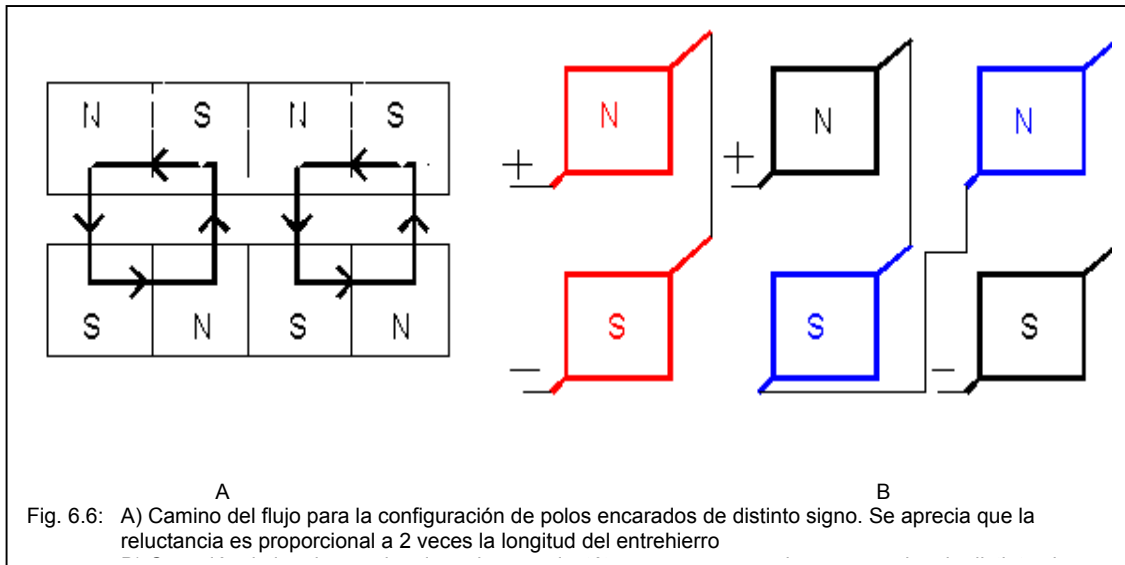
La figura 6.5A muestra la disposición de polos de igual signo encarados. Se puede ver que las líneas de flujo se cierran a través del entrehierro por caminos de gran reluctancia, ya que el paso polar es muy largo comparado con el entrehierro y, en la figura 6.5B, pueden verse los detalles de la conexión de los devanados a dos fuentes de alimentación. Se han conectado en serie para hacer pasar por ambos la máxima intensidad que permite la fuente de alimentación.

Se han utilizado dos fuentes para simular un instante de alimentación trifásica. En nuestro caso se ha elegido aquel instante en que por una fase pasa la intensidad máxima y por las otras dos la mitad cambiada de signo ($R=100\text{ A}$, $S=-50\text{ A}$ y $T=-50\text{ A}$)

Otra posible configuración es encarar polos de distinto signo. En este caso el campo magnético se cierra atravesando dos veces el entrehierro. La reluctancia magnética dependerá de la longitud del mismo, que ya hemos comentado que en estas máquinas es relativamente grande (del orden de 10 mm). En esta configuración la densidad de flujo magnético es mayor ya que la reluctancia es menor, dos veces el entrehierro frente a la distancia media entre polos.

La figura 6.6A muestra esquemáticamente el camino del campo magnético y la B las conexiones de los devanados de ambos semiestatores para conseguirla.

En la fotografía 6.2 puede observarse con detalle el devanado en un semiestator del motor Mavilor MA-55. La carcasa exterior de aluminio no ha sido usada en nuestro prototipo. Podemos ver parte del devanado trifásico repartido en 24 ranuras y sus terminales más la ranura vacía. También puede verse el rotor de fibra de vidrio al que se ha añadido un eje para poder efectuar las medidas que servirán para caracterizar el motor y los ocho bloques de YBCO de forma cilíndrica separados una distancia igual al paso polar.



6.1.2 El conductor de Cu a 77 K

Como hemos indicado en el apartado anterior, nuestro prototipo consta de 2 semiestatores y un rotor con bloques de superconductor.

El motor se sumergirá totalmente en nitrógeno líquido. Con ello se consigue la temperatura criogénica de 77 K, necesaria para que las cerámicas del rotor sean superconductoras.

El hecho de trabajar sumergido en nitrógeno líquido hace que la refrigeración mejore notablemente al ceder el calor a un fluido a una temperatura tan baja. Como consecuencia de ello se puede incrementar notablemente la corriente que se hace pasar por el motor y conseguir así un campo magnético superior.

La energía producida por efecto Joule en un conductor por el que circula una corriente eléctrica, se transfiere en forma de calor, normalmente a un fluido que hace de refrigerante. Para incrementar la transferencia de calor, el conductor debe incrementar su temperatura. El límite suele estar en la temperatura máxima que puede soportar el dieléctrico o, si no hay dieléctrico, en la temperatura de fusión u oxidación de contactos o soldaduras del propio conductor.

Cuando el refrigerante es nitrógeno líquido, las cosas cambian bastante. La eficiencia de la refrigeración depende enormemente de factores como la rugosidad del conductor o si la refrigeración es forzada o estática. La formación de burbujas y su evacuación es también una problemática de resolución no trivial^[Wilson]

Cuando un conductor situado en un baño de nitrógeno, sin refrigeración forzada, empieza a disipar energía, se producen pequeñas burbujas en el fluido. Estas aíslan momentáneamente el conductor del refrigerante, dificultando la transferencia de calor. A medida que se incrementa la energía transferida, las burbujas son más numerosas y el conductor debe incrementar su temperatura para compensar la dificultad que esto supone. En el límite, las burbujas se juntan y aíslan prácticamente el conductor del refrigerante. Exteriormente se observa porque grandes burbujas alcanzan constantemente la superficie del nitrógeno y se produce un fuerte salto térmico entre la superficie del conductor y el refrigerante.

Estudios realizados en el ICMAB^[Varesi], demuestran que el límite para conductores metálicos como el cobre o la plata está en una disipación de 10^5 W/m² (potencia por unidad de superficie de intercambio). Esto significa un salto térmico de unos 10 K entre la superficie del conductor y el refrigerante. Se debe trabajar por debajo de esta potencia por unidad de superficie para conseguir una buena refrigeración.

Teniendo en cuenta este límite podemos determinar la máxima intensidad de excitación que se puede alcanzar en éstas condiciones:

Potencia disipada por el conductor:

$$P = RI^2 = \rho \frac{l}{s} I^2 \quad (6.1)$$

En el caso de un conductor cilíndrico:

$$P = \rho \frac{l4}{d^2\pi} \left(J^2 \frac{d^4\pi^2}{16} \right) = \rho \frac{ld^2\pi}{4} J^2 \quad (6.2)$$

La potencia por unidad de superficie será:

$$\tilde{P} = \frac{P}{S} = \frac{P}{l \pi d} = \rho \frac{l d^2 \pi}{l \pi d \cdot 4} J^2 = \rho \frac{d}{4} J^2 \quad (6.3)$$

O sea:

$$\rho \frac{d}{4} J^2 \leq 10^5 \quad (6.4)$$

El cable del devanado del motor esta recubierto por una resina aislante térmica y eléctrica. En ella hay que considerar un salto térmico cuyo cálculo parte de la ecuación:

$$10^5 = K_T \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6.5)$$

$$\Delta t = 10^5 * 10^{-4} \frac{1}{0.3} = 33.33 \text{ K} \quad (6.6)$$

donde:

$K_T =$ conductividad térmica del aislante cuyo valor es de 0.3 (W/K·m)

$X =$ espesor del aislante, aproximadamente 10^{-4} m

El cobre estará, en este caso a:

$$77 \text{ K} + 33 \text{ K} + 10 = 120 \text{ K} \quad (6.7)$$

La resistividad del cobre es :

$$T \text{ ambiente:} \quad 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$$

$$T=77 \text{ K:} \quad 0.12 \cdot T_{\text{ambiente}} = 0.201 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$$

$$T=100 \text{ K:} \quad 0.22 \cdot T_{\text{ambiente}} = 0.369 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$$

$$T=120 \text{ K:} \quad 0.3 \cdot T_{\text{ambiente}} = 0.504 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$$

Teniendo en cuenta este valor de la resistividad del cobre a 120 K ($0.504 \cdot 10^{-8}$ Ω/m) y que el cable de nuestro motor tiene un diámetro de unos 4 mm, tenemos:

$$J \leq \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-5}}{0.504 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}} = 1.4085 \cdot 10^8 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \quad (6.8)$$

Luego podemos hacer pasar una intensidad de:

$$I = J \cdot S = 1.4085 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 = 1770 \text{ A} \quad (6.9)$$

En el laboratorio del ICMAB disponemos de 2 fuentes de alimentación de 100 A de c.c. que usaremos para excitar dos devanados independientemente. Esta será la máxima intensidad que pasará por los devanados. Por lo tanto creemos que el gran coeficiente de seguridad que se usa (superior a 17) es suficiente para compensar el error que se puede cometer al omitir de los cálculos la resistencia térmica de la resina y el efecto de la compactación de los conductores en el interior de las ranuras. Recordemos que la

intensidad nominal del motor es de 20 A y que nosotros pensamos alimentarlo con una fuente de corriente continua con una intensidad máxima de 120 A.

No debe olvidarse el esfuerzo electrodinámico entre conductores, pues a medida que subamos la corriente, la fuerza crece cuadráticamente con ésta, obligando a reconsiderar la fijación de las bobinas.

6.1.3 Procesado del superconductor

Los materiales superconductores de alta temperatura y, en particular el YBCO, suelen ser cerámicas de estructura cristalina anisótropa. Puede hablarse de dos tipos de proceso de fabricación: sinterizado y texturado^[Murakami].

En el primer caso el material se agrupa sin orden. La sencillez de la técnica permite preparar muestras de múltiples geometrías y dimensiones, con una relativamente buena homogeneidad. La solidificación texturada, sin embargo, da lugar a que el material oriente los ejes de su celda unidad en la misma dirección. Esto crea una trama o textura en el material que da nombre al proceso e indica los planos de crecimiento. Conseguir esto no es sencillo e impone ciertas limitaciones a la fabricación de determinadas geometrías o dimensiones.

Para materiales sinterizados, la corriente crítica obtenida es del orden de 500 A/cm², mientras que en los texturados puede llegar a los 10⁵ A/cm², aunque para bloques grandes, no suele exceder los 10⁴ A/cm². Existe una diferencia de más de 2 órdenes de magnitud que modifica sustancialmente las aplicaciones en las que pueden emplearse. De hecho, para aplicaciones industriales, solamente tienen interés los materiales texturados, dejando los sinterizados como simple referencia académica.

El proceso de fabricación consiste en primer lugar en la elección de los materiales que formarán la estequiometría del material^[Mora], un tratamiento térmico donde se forma la estructura deseada del material y un último proceso de oxigenación para ajustar la composición final de la cerámica.

Se parte de una fase superconductor YBaCu₃O₇ (123), otra no superconductor llamada fase verde Y₂BaCuO₅ (211, en un 30%) y cierta cantidad de CeO₂ (1%), todo ello en forma de polvo molido hasta alcanzar un tamaño de grano aproximado de 0.5 μm de diámetro.

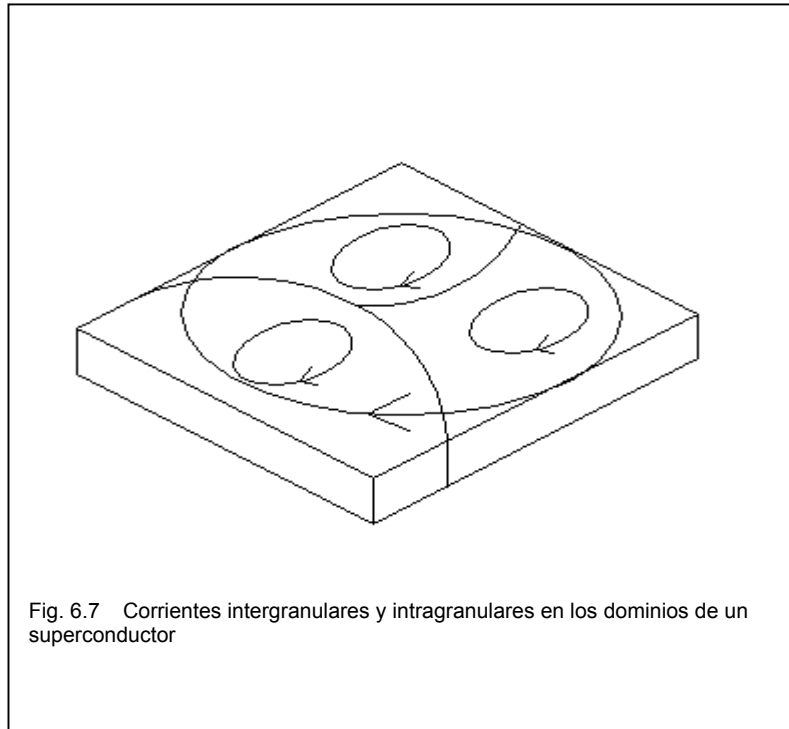
La fase 123 constituye el superconductor propiamente dicho, mientras que las inclusiones de fase 211 permiten para crear defectos en la red capaces de actuar como centros de anclaje con el fin de incrementar la corriente crítica. El CeO₂ aumenta la viscosidad de la fase líquida, y contribuye a dispersar la fase 211.

Al objeto de texturar el material, se deben crear direcciones de crecimiento preferentes y, con ello, conseguir el ordenamiento estructural requerido. Para ello se somete el material a un gradiente térmico progresivo, de forma que todos los puntos del mismo pasen por el mismo perfil de temperaturas en distintos tiempos. Esto se puede conseguir desplazando la muestra respecto al horno a velocidades muy pequeñas.

Otra técnica que hace que la muestra solidifique en una determinada dirección es la conocida como “top seeding” [Granados 1]. Consiste en colocar sobre la muestra una semilla cuyo punto de fusión más elevado permite que se conserve siempre sólida. La fase líquida irá solidificando alrededor de esta semilla en su misma dirección.

Para fabricar bloques cilíndricos como los utilizado en el motor superconductor, se usan pastillas cuyos planos *ab*, de corriente crítica superior, sean perpendiculares al eje de simetría de la misma, consiguiendo de esta forma que la magnetización sea máxima en esa dirección.

La solidificación direccional no garantiza que la pastilla sea un monodominio, sino que normalmente se inicia la solidificación en varios núcleos que van creciendo hasta encontrarse unos con otros formando granos o dominios.



La superficie donde se encuentran dos o más dominios constituye la frontera de grano. Esta frontera constituye un aislante o una zona superconductora de menor corriente crítica.

Si la dimensión de esta frontera es inferior a la longitud de coherencia (longitud que permite la interacción entre dos electrones), ésta sirve de centro de anclaje e incrementa la corriente crítica del superconductor. Si la dimensión es mayor, constituyen barreras aislantes que limitan las prestaciones del material. Macroscópicamente, estas fronteras limitan granos o dominios por los que circulan corrientes intragranulares y permiten pasar las corrientes intergranulares

Una muestra sinterizada es una muestra con multitud de fronteras de grano de tamaño muy pequeño. Una muestra texturada tiene un tamaño de grano muy superior y las orientaciones de los granos son coincidentes en las fronteras. De aquí la gran diferencia en sus características.

6.2 Simulaciones

6.2.1 Objetivos

El objetivo esencial de éste trabajo es analizar el funcionamiento de un motor con bloques de superconductor. Los principios en los que se basa son las leyes de Maxwell y la física del superconductor.

Dada la complejidad de la geometría, abordar éste análisis desde el punto de vista teórico requiere excesivas simplificaciones, que nos alejan cada vez más de la realidad. Para acercarnos a ella, hemos elegido dos caminos diferentes: las simulaciones con programas de elementos finitos y la experimentación. En este capítulo, focalizamos nuestra atención en la primera de ellas.

Esperamos que las conclusiones que extraigamos de éste análisis, nos permitirán extrapolar y aconsejar nuevos diseños que mejoren las características de los motores con superconductor.

En párrafos precedentes se ha comentado que el prototipo que usaremos ha quedado definido por la disponibilidad de un motor comercial de flujo axial. El coste económico de diseñar y construir un motor nuevo escapa a nuestras posibilidades en esta fase del proyecto. Es por esto por lo que no utilizaremos la simulación para diseñar un nuevo prototipo, pero nos será muy útil para validar los resultados experimentales en geometrías donde la resolución de las ecuaciones de Maxwell es prácticamente inabordable por otros procedimientos.

6.2.2 Elección del programa

Actualmente existen en el mercado muchos programas de elementos finitos capaces de resolver circuitos magnetoestáticos ^[Mora]. La gran expansión que han experimentado en los últimos tiempos es debida, en gran parte, al incremento de la potencia de cálculo de los ordenadores y a su introducción en el mundo industrial que ha aumentado el mercado de este tipo de programas.

El gran desarrollo de aplicaciones comerciales ha permitido pasar al campo de la industria y hoy en día se aplica de forma rutinaria en multitud de ramas de la ingeniería y de la física. Su aplicación ha permitido la optimización de dispositivos tan dispares como los perfiles del ala de un avión, estructuras de edificios y presas o circuitos de microondas en radiofrecuencia. En la mayoría de los casos que se han citado, la complejidad de la geometría hacía prácticamente inviable la solución analítica.

En el campo del magnetismo, cualquier nuevo diseño de contactores, relés, motores, o cualquier tipo de accionamiento complejo, puede ser analizado con programas de elementos finitos. Esto permite, de forma rápida, disponer de datos que permitan optimizar los diseños antes de montar los prototipos.

La máxima velocidad de diseño se consigue cuando, a partir de un elemento construido, se pretende analizar sus fallos mediante la simulación numérica. Así las propuestas de mejora ahorran mucho gasto constructivo y el prototipo final se acerca más rápidamente al comportamiento deseado.

En el caso del motor superconductor, el conocimiento previo de las fuerzas, nos permitirán seleccionar la parte tractora y la célula de carga. Por otra parte, como se ha comentado, nos servirá para validar la parte experimental.

Hay que pensar que en la fase de montaje pueden cometerse errores difíciles de detectar, como pueden ser rozamientos entre partes móviles, o falta de rigidez en los soportes al no cerrar correctamente el polígono de fuerzas. Por ejemplo, si el sistema de la parte tractora tiene muchas pérdidas por rozamiento, puede que la lectura del par sea inferior a la prevista.

En el caso de refrigeración a temperaturas criogénicas, la formación de hielo y escarcha proveniente de la condensación de vapor de agua, del aire o del aliento de los operadores, puede ser un obstáculo para el giro del motor.

Hemos observado en varias ocasiones como se forma hielo sobre el superconductor y en las ranuras del motor tras repetidos procesos de enfriamiento y

calentamiento. La necesidad de disminuir el entrehierro a la mínima distancia hace que este hielo provoque rozamientos entre las partes móviles.

La formación de este hielo no será objeto de la simulación, ya que tiene una fuerte componente aleatoria. Este es un ejemplo de las dificultades con las que se tropieza en la fase experimental.

De todos los programas de elementos finitos de que se dispone comercialmente, en el ICMAB se han usado el paquete COSMOS y QUICKFIELD. En los casos de magnetostática que han sido analizados por ambos programas, los resultados han diferido en menos de un 1%. Esto permite indicar que podemos usar cualquiera. Aunque ambos programas proporcionan soluciones muy parecidas, QUICKFIELD tiene un preprocesador muy amigable que permite al usuario familiarizarse con el rápidamente. Las simulaciones que se presentan a continuación están hechas con QUICKFIELD versión 3.2.

6.2.3 Breve descripción del programa

El programa QUICKFIELD es, en realidad, un paquete que puede resolver problemas de tipo magnetostático, electrostático, de flujo de corriente, térmico, etc., mediante cálculo numérico basado en elementos finitos. Para nuestros propósitos usaremos solamente el bloque magnetostático.

Este bloque está dividido en tres partes:

-Preprocesador : Incluye el dibujo de la geometría, definición de propiedades magnéticas, condiciones de contorno y mallado. Merece especial mención el mallado. La versión para aprendizaje permite la definición de 500 elementos. Ello obliga a tener un cuidado muy especial en el momento de elegir las dimensiones de la malla, que deberá ser más tupida en los puntos donde se prevé que el campo magnético tendrá mayor variación que en los puntos alejados del paso de corriente, donde el campo magnético será prácticamente cero. La correcta elección de los parámetros de mallado es de capital importancia para la correcta resolución del problema.

La limitación del número de elementos afecta también a la zona de estudio. En la versión de QUICKFIELD de que se dispone no existen elementos con condición de infinito por lo que los límites del contorno pueden afectar el cálculo. Si se disminuye excesivamente la zona para disponer de un mallado más compacto, puede que la condición de campo cero en el contorno aplane artificialmente el campo en zonas próximas, distorsionando los resultados. Ampliarlo excesivamente implica tener elementos muy grandes en el mallado, con la consiguiente pérdida de precisión. Por ello, la elección de la zona debe ser un compromiso entre estos dos factores. Afortunadamente el programa permite definir la dimensión del mallado para cada vértice del mallado de forma independiente.

-Procesador : Resuelve las ecuaciones de Maxwell para el problema especificado.

-Postprocesador: Es un entorno gráfico que permite la representación de varias formas y colores de los resultados obtenidos.

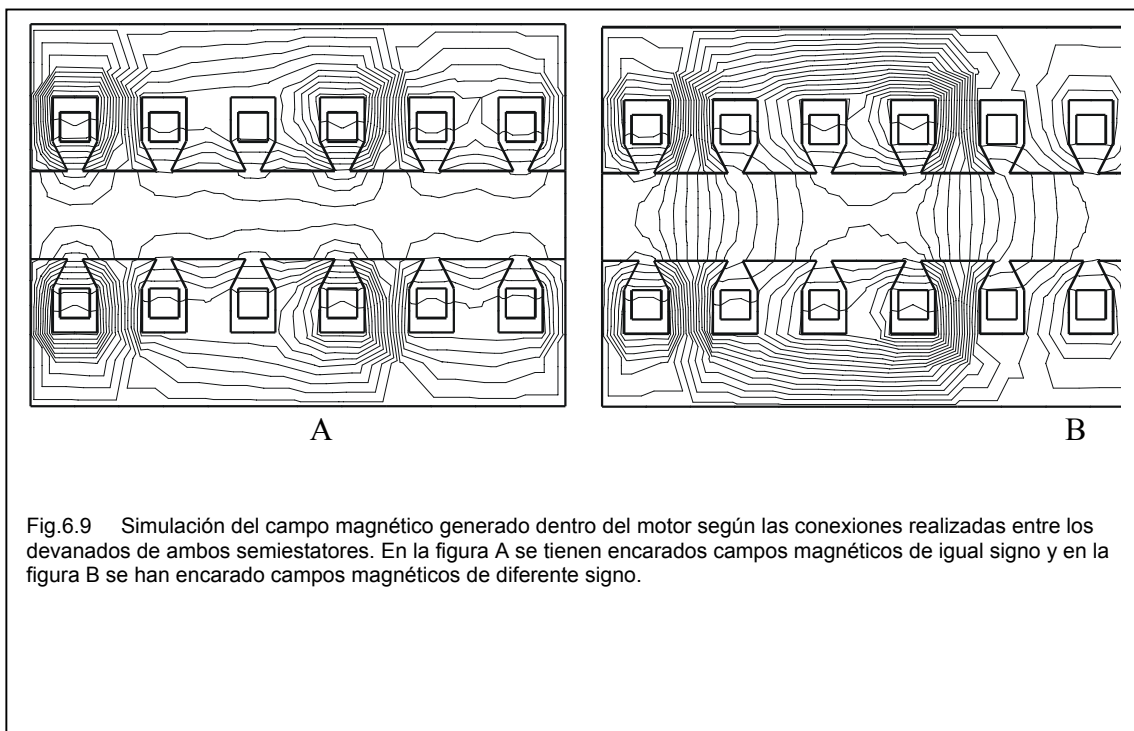
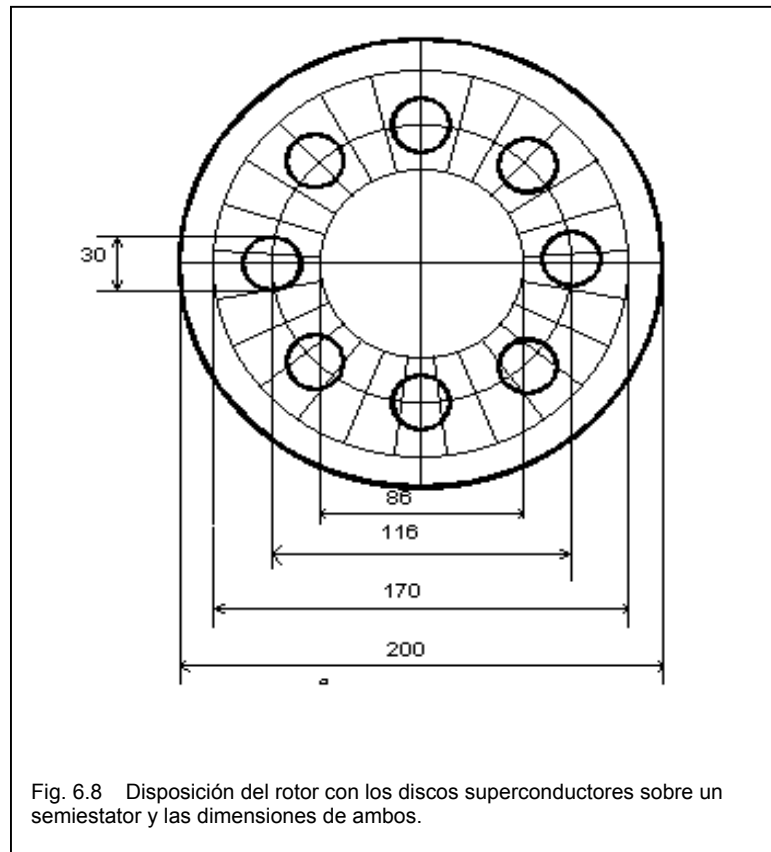
6.2.4 Modelización del motor

Consideraremos el motor seccionado a lo largo de un plano axial y luego desarrollado hasta conseguir una estructura plana. Además, dada la simetría, simularemos solamente una parte del motor con una pieza de superconductor. Esta parte se repite 8 veces a lo largo del rotor.

La figura 6.8 muestra la disposición del rotor con los superconductores, su posición sobre un semiestator y las dimensiones de ambos.

El diámetro exterior del rotor hace que sobresalga respecto al hierro del semiestator y queda prácticamente a la misma medida que las cabezas de bobina de éste. Aquí no se han dibujado para no afectar lo esencial de la figura.

La distancia entre ranuras varía desde un máximo en la periferia del semiestator hasta un mínimo en el



diámetro interior. Para la simulación se ha considerado la distancia entre ranuras

correspondiente al radio medio donde se han situado los bloques de superconductor, o sea, a un radio de 58 mm.

$$\text{Distancia entre ranuras} : \frac{2 * \pi * 58}{25} = 14.57 \text{ mm} \quad (6.10)$$

Asimismo, se considera la influencia de 6 ranuras. Pensamos que, dado que un bloque de superconductor ocupa unas dos ranuras, la gran distancia relativa del resto hace que su influencia sea despreciable. Tampoco se considera la asimetría introducida por la ranura numero 25, pues su efecto no es significativo.

La figura 6.9 muestra el campo magnético generado en el interior del motor cuando se encaran polos del mismo signo (A) y cuando se encaran polos de distinto signo (B)

En la figura 6.10 se muestran los valores del campo magnético para una línea que pasa por el centro del entrehierro. Puede observarse la diferencia de valores del campo en ambos casos, siendo superior, como se esperaba, en el caso de polos opuestos encarados.

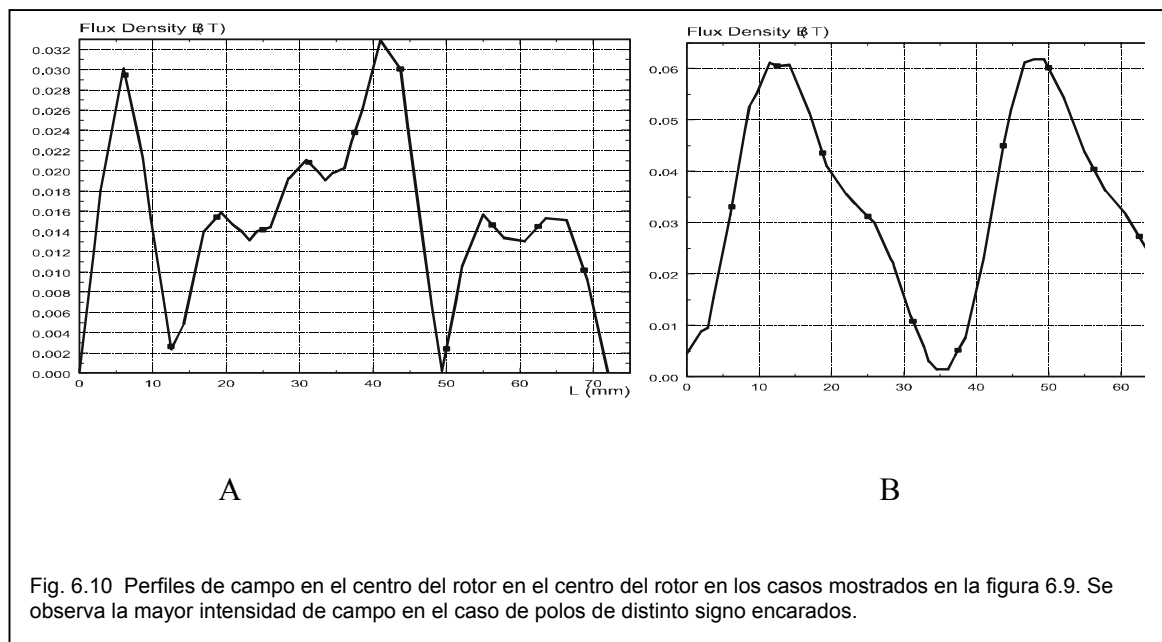
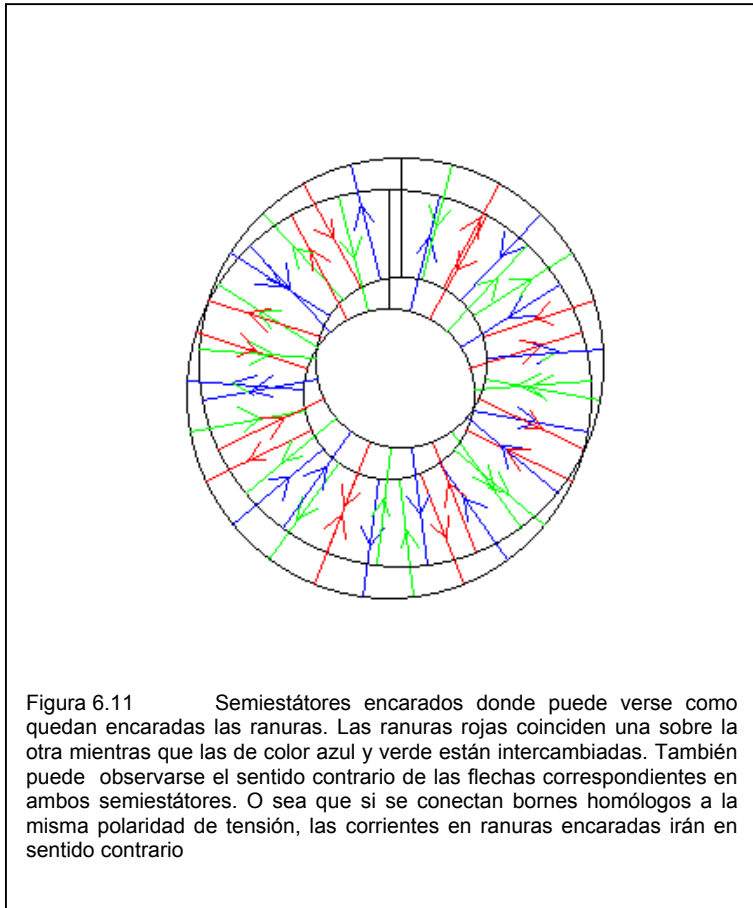


Fig. 6.10 Perfiles de campo en el centro del rotor en los casos mostrados en la figura 6.9. Se observa la mayor intensidad de campo en el caso de polos de distinto signo encarados.



En esta primera simulación modelaremos el superconductor como si se encontrara en el estado Meissner, o sea, como si no permitiera la entrada de flujo en su interior (diamagnético perfecto). Para ello se le considera como un si se tratara de un material con una permeabilidad magnética muy pequeña. Esta situación marcará el límite del comportamiento en el caso ZFC (zero field cooled). Éste es el caso

que más interesa, puesto que habitualmente tendremos el motor enfriado y le aplicaremos tensión. O sea, que habrá transitado a superconductor en ausencia de campo magnético.

Para el valor de la intensidad se ha tomado 60 A en una fase y -30 A en las dos restantes. Cada semiestator está bobinado con cable de 8 hilos en paralelo. El bobinado es, como se ha dicho, en cruz de malta y se han pasado 10 vueltas de cable. Esto da, para las ranuras de la fase de mayor intensidad:

$$\text{corriente por ranura: } 60A * 10\text{vueltas} = 600 A \quad (6.11)$$

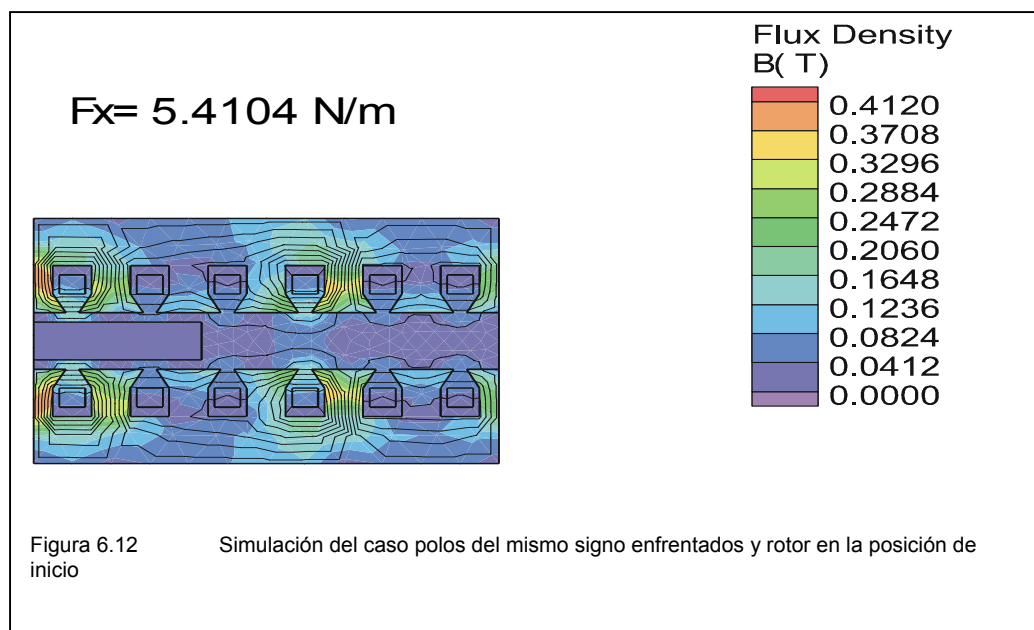
Para la simulación se ha tomado el conjunto de conductores como un conductor cuadrado de 4 mm de lado. Esto da una densidad de corriente de $37,5 * 10^6 \text{ A/m}^2$ (6.12

Para las ranuras cuya intensidad es la mitad, la densidad de corriente será de $18,75 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

$$\delta = \frac{600}{(4 * 10^{-3})^2} = 37,5 * 10^6 \quad (6.12)$$

Al encarar dos semiestátors idénticos como los que disponemos para nuestro prototipo, queda una fase encima de su homóloga y las otras dos cruzadas, es decir, si la fase roja queda sobre la roja, la verde quedará sobre la azul y la azul sobre la verde.

Además puede observarse como queda el sentido de las corrientes en cada ranura. Esto significa que si se conectan bornes homólogos a tensiones de igual polaridad, por las ranuras encaradas circulará la corriente en sentido contrario. Este hecho es especialmente importante para saber si tenemos encarados polos de igual signo o de signo contrario. En las figuras 6.10 A y B, puede observarse la gran diferencia



cuantitativa y cualitativa del campo generado en ambos casos.

Teniendo en cuenta los datos precedentes se ha simulado el comportamiento del motor cuando se conecta de forma que quedan encarados polos de igual polaridad y cuando se encaran polos de polaridad opuesta. En ambos los casos se han considerado diversas posiciones en las que el superconductor se va desplazando dentro del rotor.

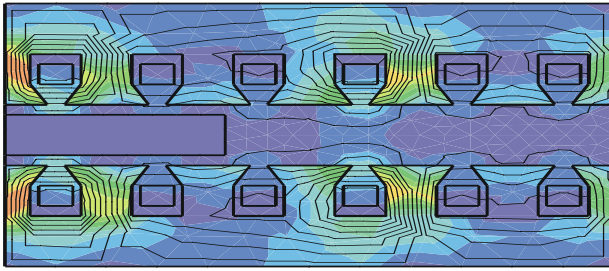
- Polos de igual polaridad encarados:

La figura 6.12 muestra esta simulación. En este caso se ha situado el bloque superconductor al inicio del recorrido, en la parte izquierda del espacio simulado. En el Anexo A2 pueden verse el resto de las simulaciones, que se han realizado con el bloque superconductor desplazado 4 mm respecto al anterior, hasta finalizar el recorrido en la parte derecha de la figura. Además se ha añadido la fuerza que se ejerce sobre el superconductor en la dirección del eje X. Como esperábamos, la fuerza según el eje X es pequeña y cambia de signo según el bloque superconductor esté entrando o saliendo de un polo. De la interacción del superconductor en estado Meissner y el campo magnético siempre resulta una fuerza repulsiva, para alejarlo si está saliendo o para rechazarlo si está entrando.

No se ha incluido la fuerza de levitación. Dada la simetría en el eje Y, ésta debería ser cero cuando el superconductor está centrado. De hecho el programa ha dado valores muy pequeños (del orden de 0,2 N/m). Esto es debido a la distribución inhomogénea de los nudos del mallado que hace que a pesar de que la figura sea simétrica, el campo calculado a partir de ella no resulte totalmente simétrico. Este caso no ha sido contrastado experimentalmente, y aunque el resultado parece lógico no poseemos otra medida para asegurar la mutua validación.

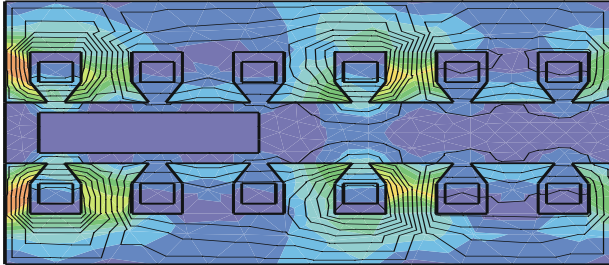
En todos los casos simulados se ha considerado que el superconductor se comporta como diamagnético casi perfecto. Como el programa no admite una permeabilidad nula, se ha considerado que el material tiene una permeabilidad magnética relativa con un valor muy pequeño ($\mu_r=10^{-10}$).

En las siguientes páginas se muestran algunas de las simulaciones indicadas en formato compactado para poder observar el comportamiento del campo magnético, y la fuerza sobre el bloque de material superconductor. Se incluyen 6 casos de polos de igual polaridad encarados y 6 casos de polos encarados de distinta polaridad. En ellas se muestra una secuencia de movimiento del rotor a través del entrehierro y a lo largo de un paso polar.



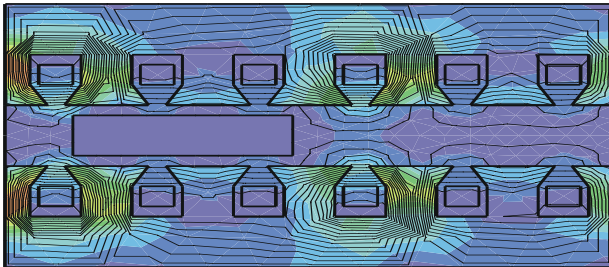
Desplazamiento: 0mm

Fx: 5,41 N/m



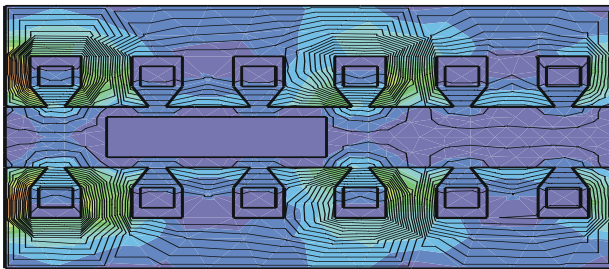
Desplazamiento: 4mm

Fx: -7,41 N/m



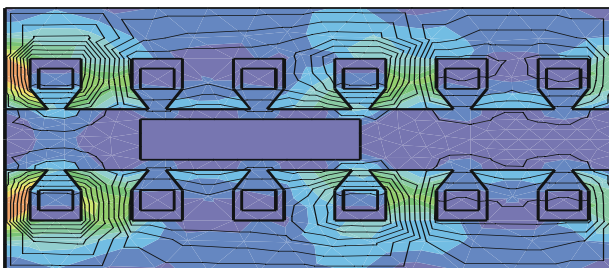
Desplazamiento: 8mm

Fx: 4,15 N/m



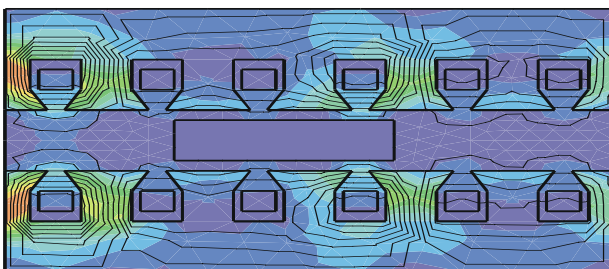
Desplazamiento: 12mm

Fx: -1,74 N/m



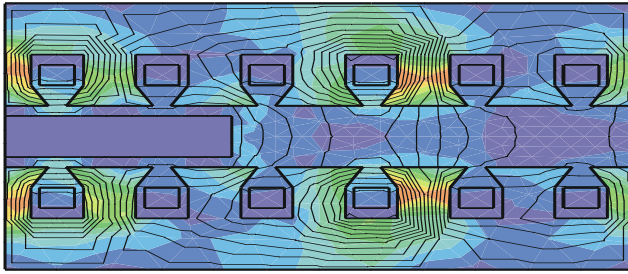
Desplazamiento: 16 mm

Fx: -9,35 N/m



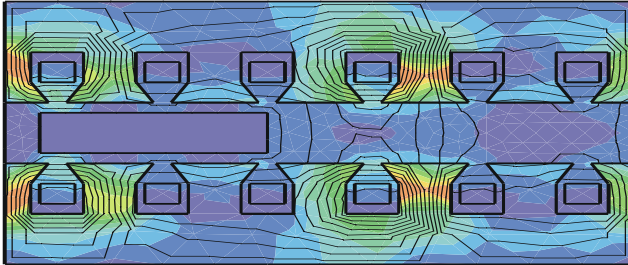
Desplazamiento: 20mm

Fx: -2,55 N/m



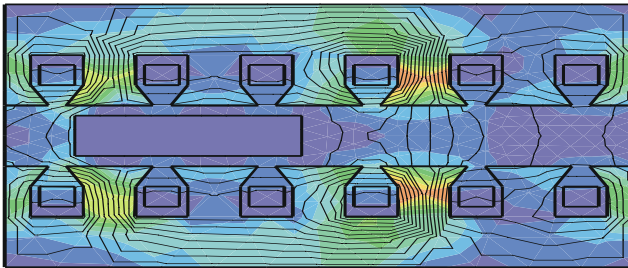
Desplazamiento: 0mm

Fuerza Fx: -19,778 N/m



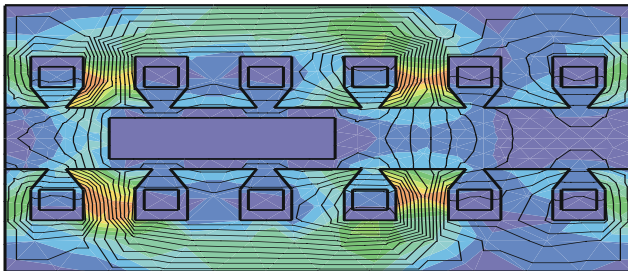
Desplazamiento: 4mm

Fuerza Fx: -20,88 N/m



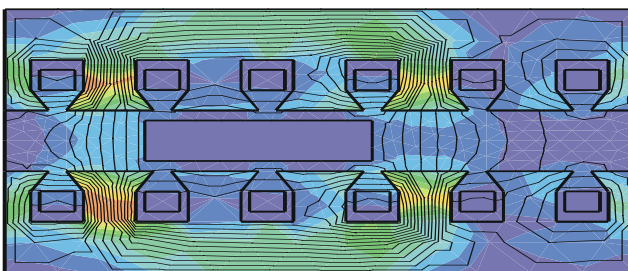
Desplazamiento: 8mm

Fuerza Fx: 34,601 N/m



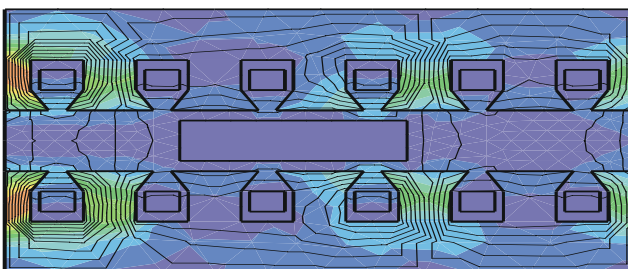
Desplazamiento: 12mm

Fuerza Fx: 52,501 N/m



Desplazamiento: 16mm

Fuerza Fx: 38,361 N/m



Desplazamiento: 20mm

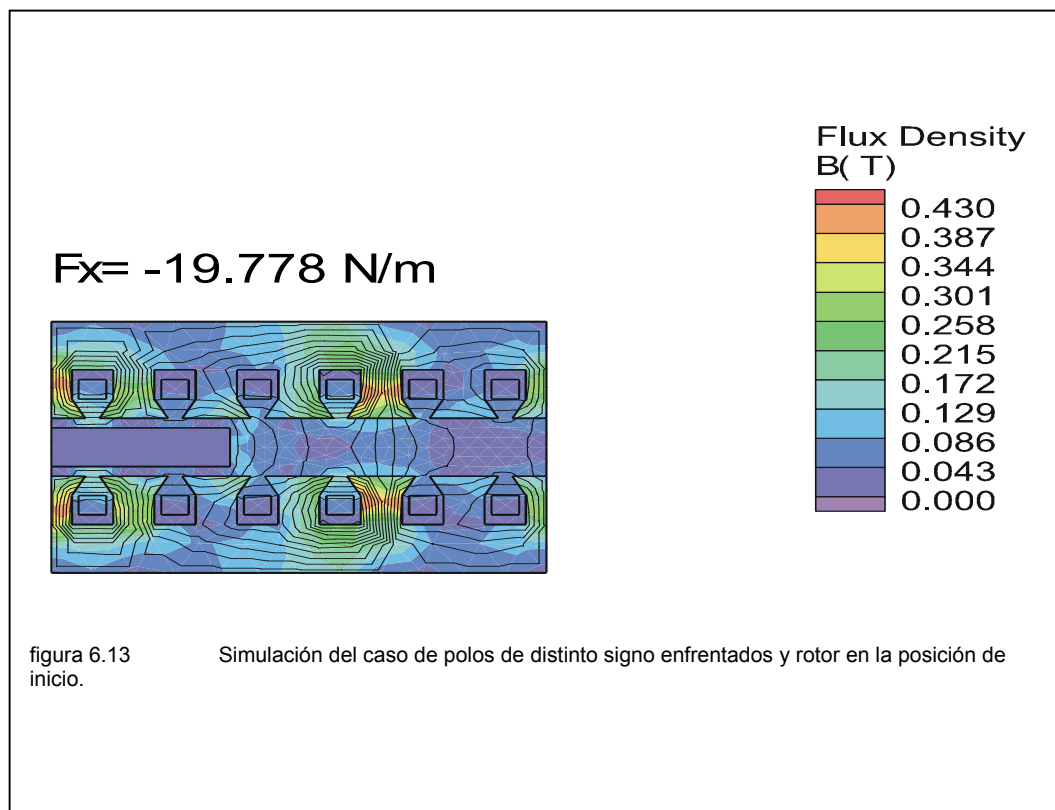
Fuerza Fx: -8,07 N/m

En cada figura se ha indicado el valor de la fuerza en la dirección X que es una medida del par que se ejerce sobre cada bloque superconductor. Como vimos en el capítulo 3, un campo con una fuerte componente radial, como es el creado en el caso de polos del mismo signo encarados, da lugar a fuerzas de levitación grandes y pares pequeños. Se puede observar el gran flujo de dispersión en las ranuras que se produce con esta disposición.

Tal como se ha indicado en anteriores párrafos, el caso que creemos más interesante, porque proporciona un mayor par, es el de polos encarados de diferente signo. En este caso, como muestran las figuras 6.10 y 6.11, el campo en el entrehierro es mucho mayor y esperamos un par también mayor, a la vez que una fuerza de levitación menor.

- Polos opuestos encarados:

A continuación se muestra una de las simulaciones para este caso donde, al igual que hicimos en las simulaciones para polos de igual signo encarados



desplazaremos el superconductor a lo largo del rotor y observaremos los resultados. En el Anexo 2 se muestran el resto de las simulaciones con distintas posiciones del rotor. Para poder comparar con los resultados obtenidos experimentalmente y los calculados con la simulación, iniciaremos el desplazamiento en pasos de 4 mm. A partir del

A	B	C	D	E
Posición (mm)	Fuerza N/m	Fuerza (N)	Par por bloque (Nxm)	Par total (Nxm)
27	-20,893	-0,5432	-0,0314	-0.2515
28	-10,057	-0,2614	-0,0151	-0,1213
29	-5,1463	-0,1338	-0,00776	-0,06208
30	0,21098	0,00548	0,003185	0,025426
31	34,601	0.899626	0.05217	0.4117
32	47,25	1,2285	0,07125	0.5700
33	49,43	1,2981	0,07529	0.6023
34	52,348	1,3610	0,07894	0.6315
35	52,501	1,3650	0.07917	0.6333
36	48,843	1,2699	0,07365	0.5892
37	52,103	1,3546	0,07857	0.6285
38	50,742	1,3192	0,07651	0.6121
39	38,361	0,9973	0.05784	0.4627
40	21,654	0.5630	0.03265	0.2612
41	8,4864	0,2206	0.01279	0.1023
42	-11,074	-0,2879	-0.01669	-0.1335

TABLA 1 : Datos tomados en un semipolo con desplazamientos del rotor de 1 mm.
 Columna A: Posición del rotor
 Columna B: Fuerza calculada en la simulación
 Columna C: Fuerza sobre cada bloque
 Columna D: Fuerza sobre los ocho bloques de superconductor

primero, disminuirémos a saltos de 1mm para tener más datos y poder comparar las curvas obtenidas con la simulación y la los resultados experimentales. Las condiciones de contorno impuestas en la simulación hacen que el campo calculado quede bastante distorsionado en algunas zonas. En nuestro caso, la condición de potencial cero en el flanco izquierdo de la geometría hace que el campo calculado se sobrevalore en casi un 20% en esa región. Este resultado ha sido obtenido comparando el valor del campo en esta zona y otras simétricas pero alejadas del contorno de la geometría considerada. Debido a este hecho, desplazamos el rotor unos 4mm, donde el efecto de la condición de contorno queda diluido y a partir de este punto tomaremos los datos para comparar los resultados .

La figura 6.13 muestra la simulación en este caso. En el anexo A2 pueden verse el resto de las simulaciones hasta completar un recorrido completo del bloque superconductor por el espacio simulado.

Como puede observarse en las simulaciones, ahora, el campo que atraviesa el entrehierro es superior al caso de polos de igual signo encarados. Además, como era previsible, la fuerza en el eje X es muy superior. Este caso ha sido el elegido en el montaje experimental. Por ello resulta interesante tabular los datos para poder compararlos. Con el fin de obtener una curva lo más exacta posible, se han añadido datos de 13 simulaciones más para desplazar el rotor un semipolo en saltos de 1mm. La tabla I muestra estos datos que han sido representados en la figura 6.14

Para la obtención de los datos de la tabla 1 se ha seguido el siguiente procedimiento:

Columna A: Posición del superconductor

Columna B: Fuerza por metro lineal ejercida sobre el bloque superconductor en el eje de las X.

Columna C: Fuerza ejercida sobre cada bloque de superconductor. Para ello se ha considerado un bloque rectangular cuya superficie sea equivalente a la del bloque real de forma circular.

$$l = \sqrt{\pi \cdot R^2} = \sqrt{\pi \cdot (0.015)^2} = 0.026 \text{ m}$$

$$F = \text{col}(B) \text{ (N/m)} \cdot 0.026 \text{ m} = \text{col}(C) \text{ N}$$

Columna D: Par en cada bloque superconductor. Se calcula multiplicando la fuerza por la distancia al centro.

$$\text{col}(D) = \text{col}(C) \text{ (N)} \cdot 0.058 \text{ (m)} = \text{col}(D) \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

Columna E: Par total. Se calcula multiplicando el par de cada bloque por el numero total de bloques (8)

$$\text{col}(E) = \text{col}(D) \text{ (N} \cdot \text{m)} \cdot 8 = \text{Par total (N} \cdot \text{m)}$$

Los datos de la columna B han sido introducidos en un programa de tratamiento de datos (Origin 4.0) del que se han obtenido el resto de columnas y el gráfico de la

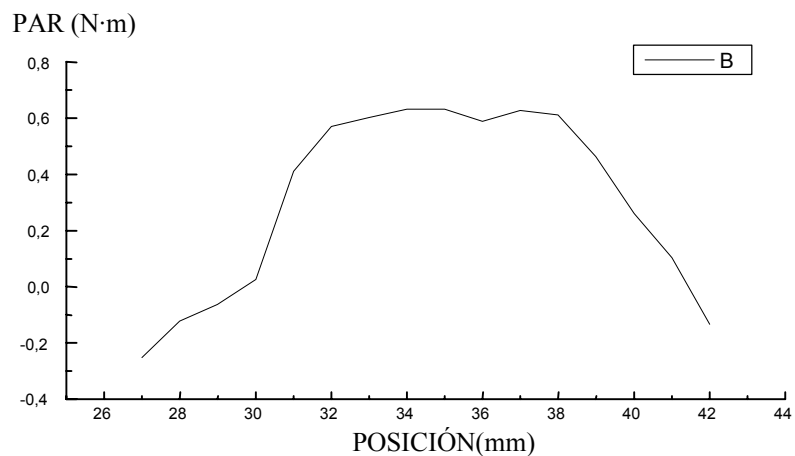


Figura 6.14 Gráfica del par en función del desplazamiento. Datos obtenidos de la tabla 1 El desplazamiento del rotor corresponde aproximadamente a medio paso polar, es decir, 90 grados eléctricos.

figura 6.14.

6.2.5 Análisis del motor de flujo axial

Tal como vimos en la expresión de la fuerza por unidad de volumen entre un campo magnético externo y un elemento magnetizado, aquella es función de los gradientes de campo externo y la magnetización producida en el material^[Granados3]. Además, hasta la saturación del material, la magnetización depende del campo magnético aplicado. Por lo tanto, la fuerza producida dependerá tanto del valor del campo aplicado como de su gradiente. Esto hace que el estudio de este campo externo adquiera una importancia notable.

En esta sección analizaremos el campo producido en el entrehierro del motor de flujo axial, con el que obtendremos la magnetización, así como sus gradientes en el volumen del superconductor, con los que podremos estimar el par. Con ello, pretendemos sacar conclusiones respecto a las características de este campo y del

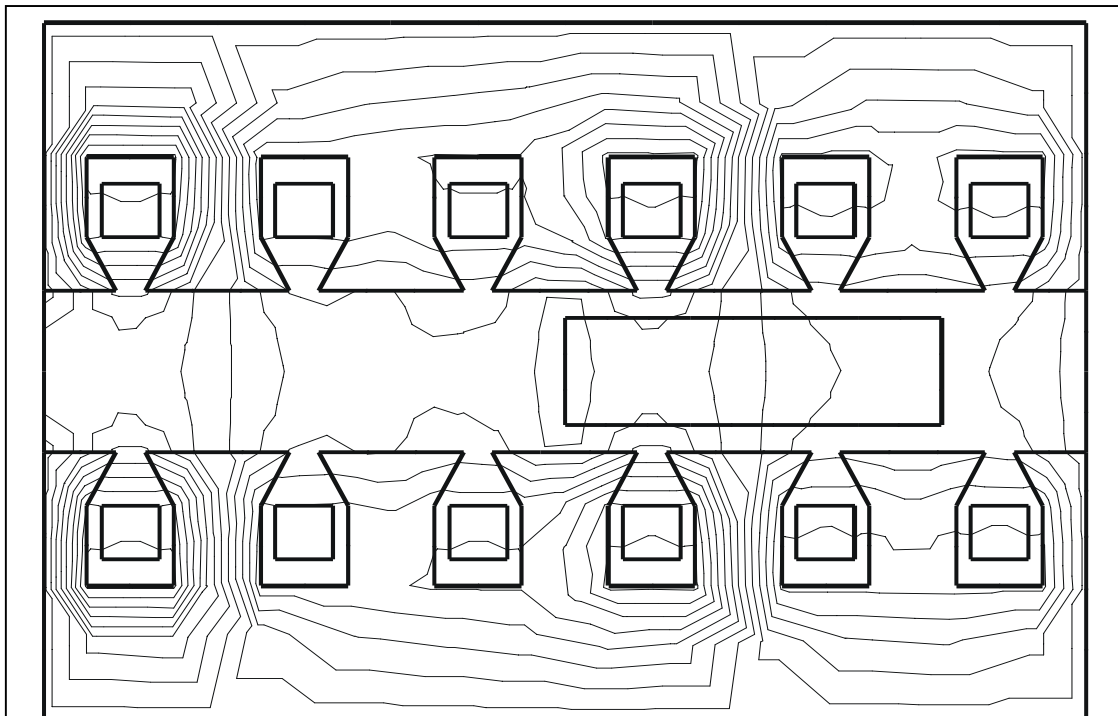
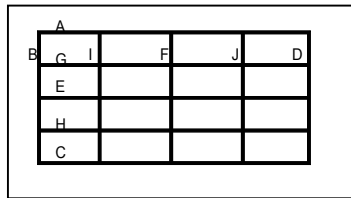


Fig. 6.15
gradiente

Campo en el interior del motor. El superconductor se ha situado en una zona de máximo

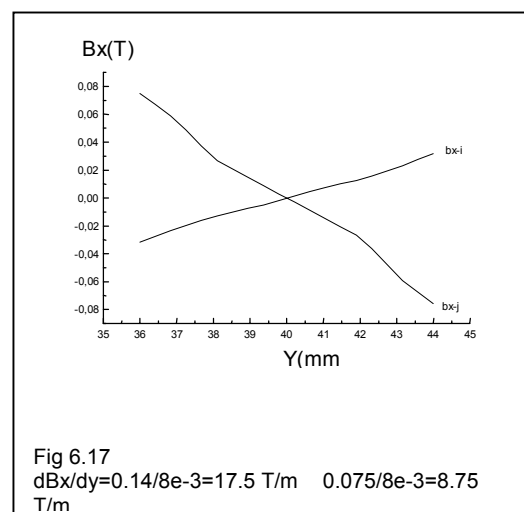
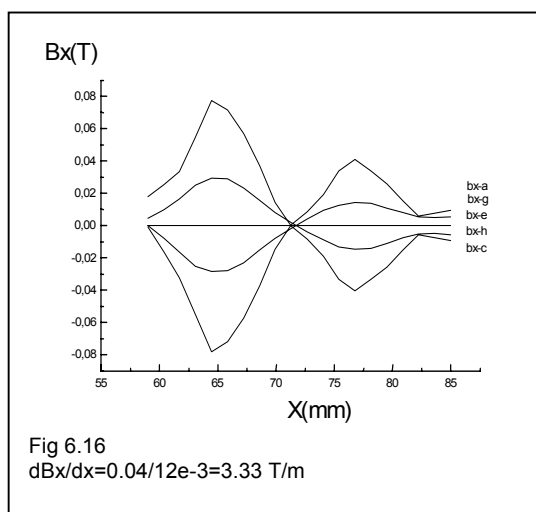
superconductor que permitan mejorar el par y la levitación del rotor con superconductor.

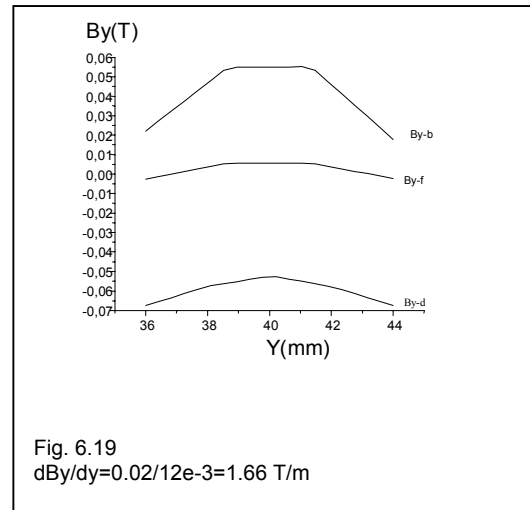
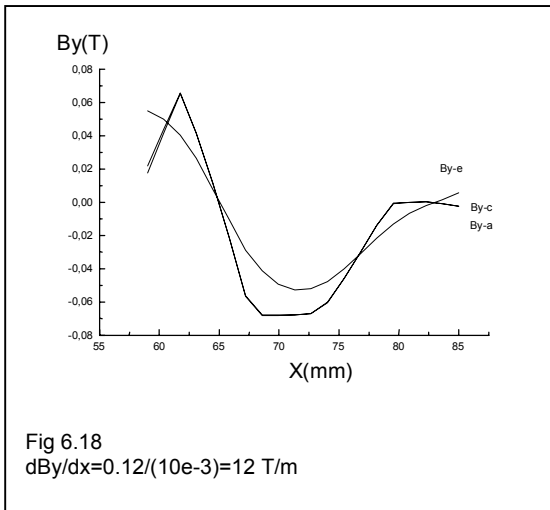


Los gradientes del campo han de ser calculados en todo el volumen del superconductor. Dadas las dimensiones del mismo, este gradiente será variable para cada punto. Por ello, cuando se desee conocer el gradiente del campo respecto de una variable (por ejemplo x), ha de hacerse para todos los valores de la variable y .

El sistema elegido para el cálculo es la discretización de los ejes. Así que el gradiente respecto de la variable x se calculará para varios puntos del eje de las y , y se tomará el promedio de todos. El volumen del superconductor se ha dividido en 3 líneas verticales y 3 horizontales, tal como puede verse en la ilustración superior. Si las curvas de gradiente son simétricas y la variación del gradiente es lineal con la distancia se considerará suficiente esta división y en caso contrario, se añadirán dos líneas más para tener resultados más exactos.

Los campos en el volumen interactivo son:





Las figuras 6.16 y 6.17 muestran la componente B_x del campo. Los cálculos para el gradiente promedio se muestran en las mismas. En el caso de la figura 6.17 se ha promediado al pendiente de ambas curvas.

Las figuras 6.18 y 6.19 muestran la componente B_y en las direcciones x e y . En las mismas se muestra el cálculo numérico del gradiente del mismo como la pendiente promedio de las curvas mostradas.

Si sustituimos los valores del gradiente calculados en la fórmula de la fuerza, tenemos las siguientes expresiones:

$$F_x = (M_x \frac{dB_x}{dx} + M_y \frac{dB_x}{dy}) \cdot V = (M_x \cdot 3.33 + M_y \cdot 13) \cdot V \text{ (N)} \quad (6.13)$$

$$F_y = (M_x \frac{dB_y}{dx} + M_y \frac{dB_y}{dy}) \cdot V = (M_x \cdot 12 + M_y \cdot 1.66) \cdot V \text{ (N)} \quad (6.14)$$

En ellas podemos ver la importancia relativa de cada una de las magnetizaciones. Como puede apreciarse, incrementar M_x significa un incremento significativo de F_y y uno más modesto de F_x , mientras que incrementar M_y significa un gran incremento de F_x y uno menor de F_y .

M_x y M_y dependen del campo externo aplicado, pero también de la orientación de los planos ab del superconductor. Como ya vimos en el capítulo 3, el YBCO es un material fuertemente anisótropo.

F_x representa la fuerza en la dirección X por unidad de volumen y nos da una medida del par. Para conocerlo exactamente habría que multiplicar esta fuerza por el número de bloques de superconductor y por la distancia al eje del motor. Puesto que ambos términos son constantes una vez fabricado el motor, ésta es una medida, a cierta escala, del par que cabe esperar del mismo.

F_y representa la fuerza de levitación. Esta debe ser entendida como la fuerza con que el bloque superconductor es “empujado” hacia el centro del entrehierro contra el peso del mismo. Si debido a su propio peso el rotor se desplaza hacia abajo, el sistema reacciona empujándolo hacia arriba con la resultante que se indica en la fórmula.

6.3 Caracterización estática. Sistema experimental

Con esta caracterización se pretende observar como interactúan el superconductor y el campo magnético del motor para distintos valores de corriente estática y una vuelta completa del rotor.

Se medirá el par que se requiere para desplazar la posición del rotor una vuelta completa con los semiestatores alimentados a diferentes corrientes.

6.3.1 Sistema de medidas

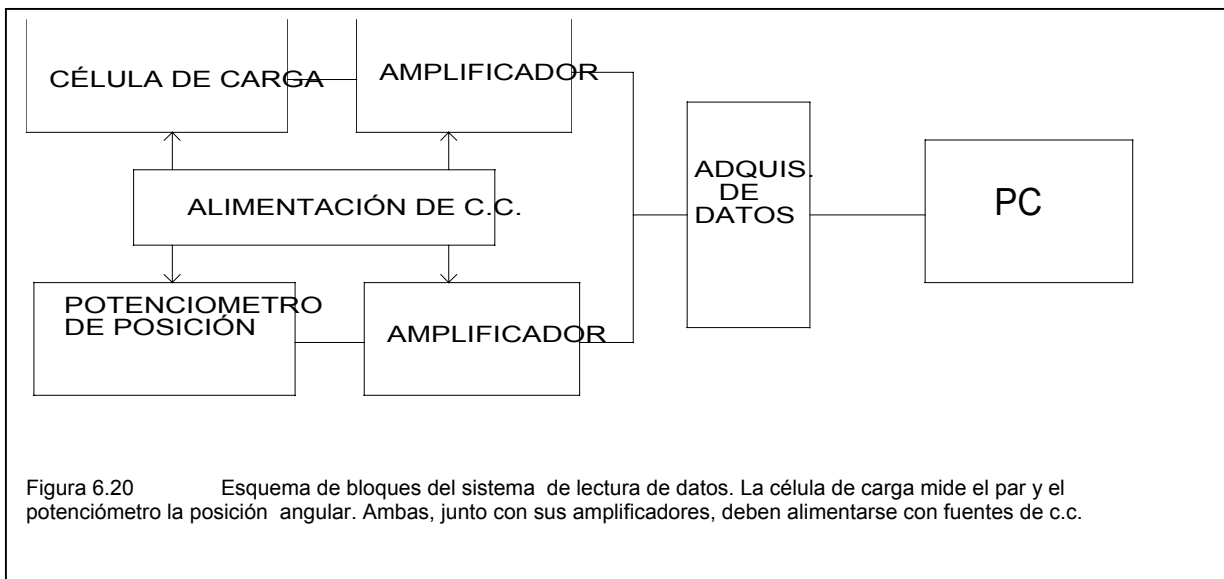
Se requiere, en primer lugar, un sistema de alimentación de corriente continua para crear el campo magnético. En los laboratorios del ICMAB disponemos de dos fuentes programables capaces de dar 120 A cada una de ellas. Una de ellas se programará a I_{MAX} y se conectará una de las fases de ambos semiestatores conectadas en serie. La otra se programará a $I_{MAX} / 2$, y se conectará a las otras dos bobinas. Las bobinas de los dos semiestatores se conectarán en serie.

En segundo lugar se requiere un sistema capaz de ejercer un par sobre el eje acoplado al rotor, superior al par resistente ejercido por los discos de superconductor.

De ésta forma haremos girar el rotor y se medirá el par ejercido en cada punto y la posición del rotor.

El montaje en su conjunto ha de sujetar todos los elementos de medida y cerrar el polígono de fuerzas que se ejerce sobre las distintas partes. También se ha de disponer de un contenedor para el motor, que sea capaz de inundarlo con nitrógeno líquido.

Durante el funcionamiento, el rotor estará flotando entre los dos semiestátos. Para no incrementar excesivamente el entrehierro, se ha pensado que debería situarse a una distancia de cada uno de ellos de unos 2 mm, cuando ocupe el centro del entrehierro. Esta distancia debe ser suficiente para compensar la tolerancia del grosor del rotor y su posible alabeo de forma que no roce durante el giro del mismo.



El sistema que ejerza el par de frenado sobre el eje deberá hacerlo mediante dos fuerzas iguales y de sentido contrario para que la resultante de las mismas sea un par paralelo al eje y la fuerza resultante sobre el mismo sea cero. De lo contrario, esta fuerza resultante tendería a inclinar el eje del motor provocando el rozamiento del rotor con los semiestátos falseando las medidas.

Durante la prueba se medirán tanto la posición del rotor como la fuerza necesaria para hacerlo girar. Para medir la posición del rotor se usará un potenciómetro multivuelta. La variación de la resistencia con la posición del rotor será usada para conocer su posición.

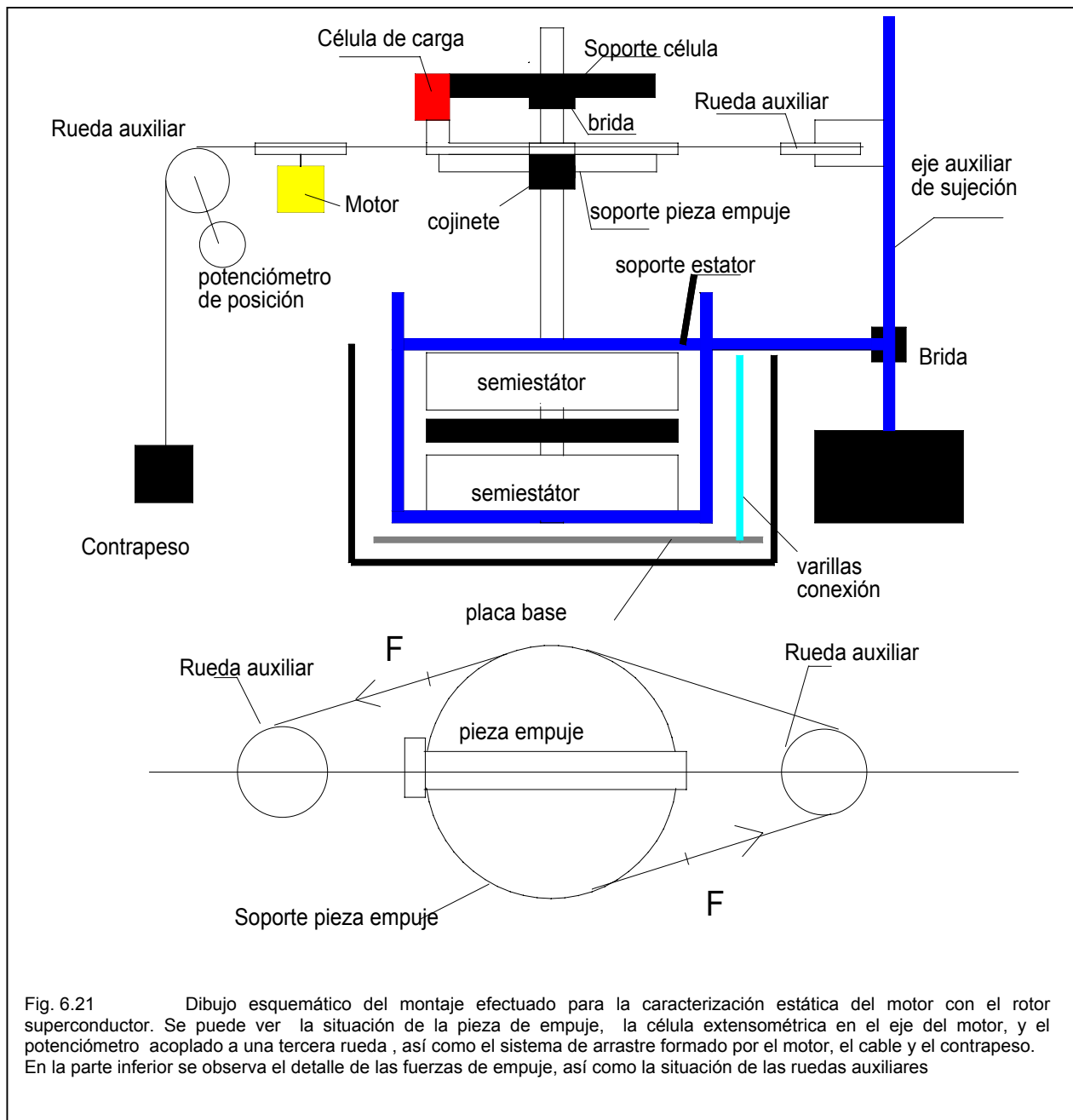
Para conocer el par que se ejerce sobre el rotor se medirá la fuerza con la que se empuja. El producto de esta fuerza por la distancia al eje nos dará el par que necesitamos. Para ello se sujetará al eje, mediante un soporte adecuado, una célula de carga. Esta será la que reciba directamente la fuerza del sistema de tensado. El sensor de fuerza electrónico se deberá alimentar con una tensión de 10 V y a la salida se tendrá una tensión proporcional a la fuerza realizada.

Asimismo se requiere un sistema de adquisición de datos, que lea constantemente la tensión de la célula y la del rotor, y guarde los datos en un archivo para poder ser utilizados posteriormente. Previamente deben acondicionarse las tensiones para que las entradas sean compatibles con el sistema de adquisición. La figura 6.20 muestra el esquema de bloques de los aparatos de medida y acondicionadores de señal necesarios.

En el anexo 6 se detallan las diferentes partes del sistema de medidas utilizado así como detalles de la calibración de la célula de carga y amplificador utilizados en la prueba.

El conjunto de piezas están sujetadas a una estructura de ángulo de hierro ranurado mediante tornillos y arandelas. Algunas de las uniones se han realizado con soldadura para garantizar dimensiones y rigidez. Una de las dos ruedas auxiliares se ha sujetado con una varilla de acero con un fuerte peso en la base. La rigidez del conjunto se ha completado con una barra de hierro ranurado sujeta al resto de la estructura mediante tornillos y abrazaderas.

En las figuras 6.21 y 6.22, puede verse el esquema del montaje efectuado con la indicación de las partes más importantes y una fotografía del mismo:

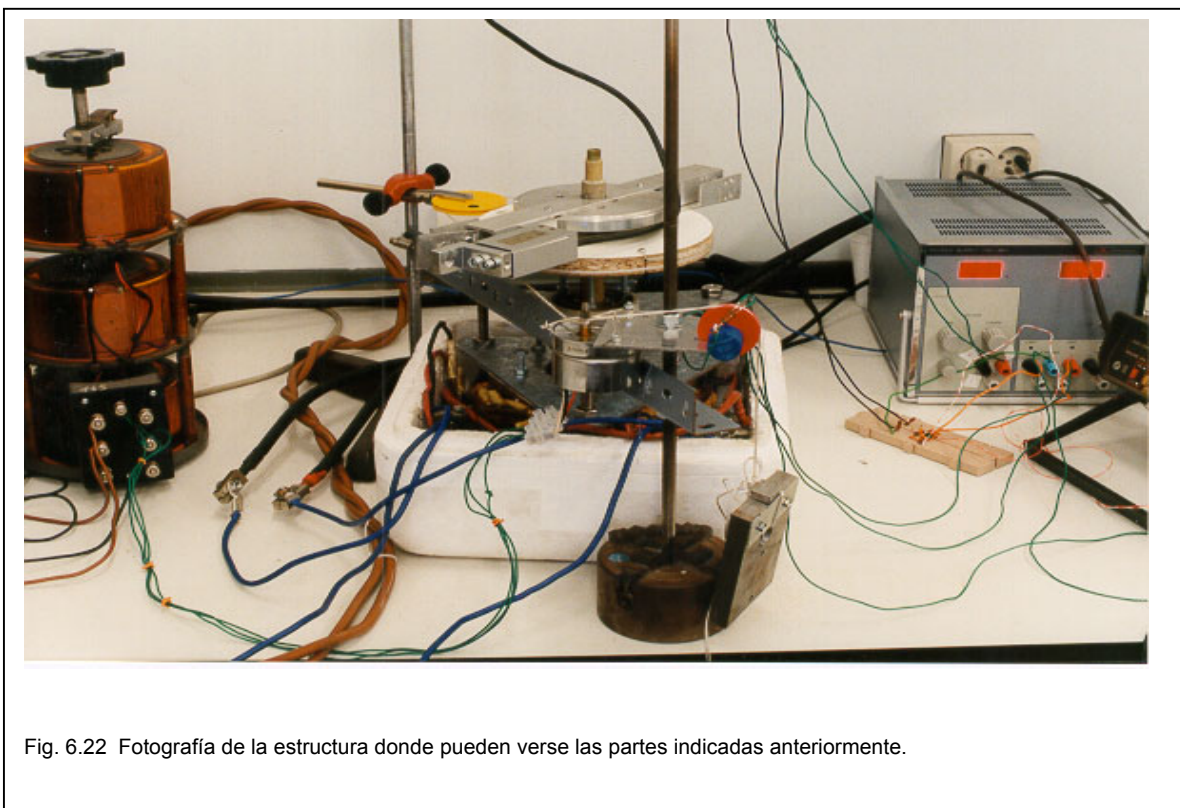


6.3.2 Resultados obtenidos

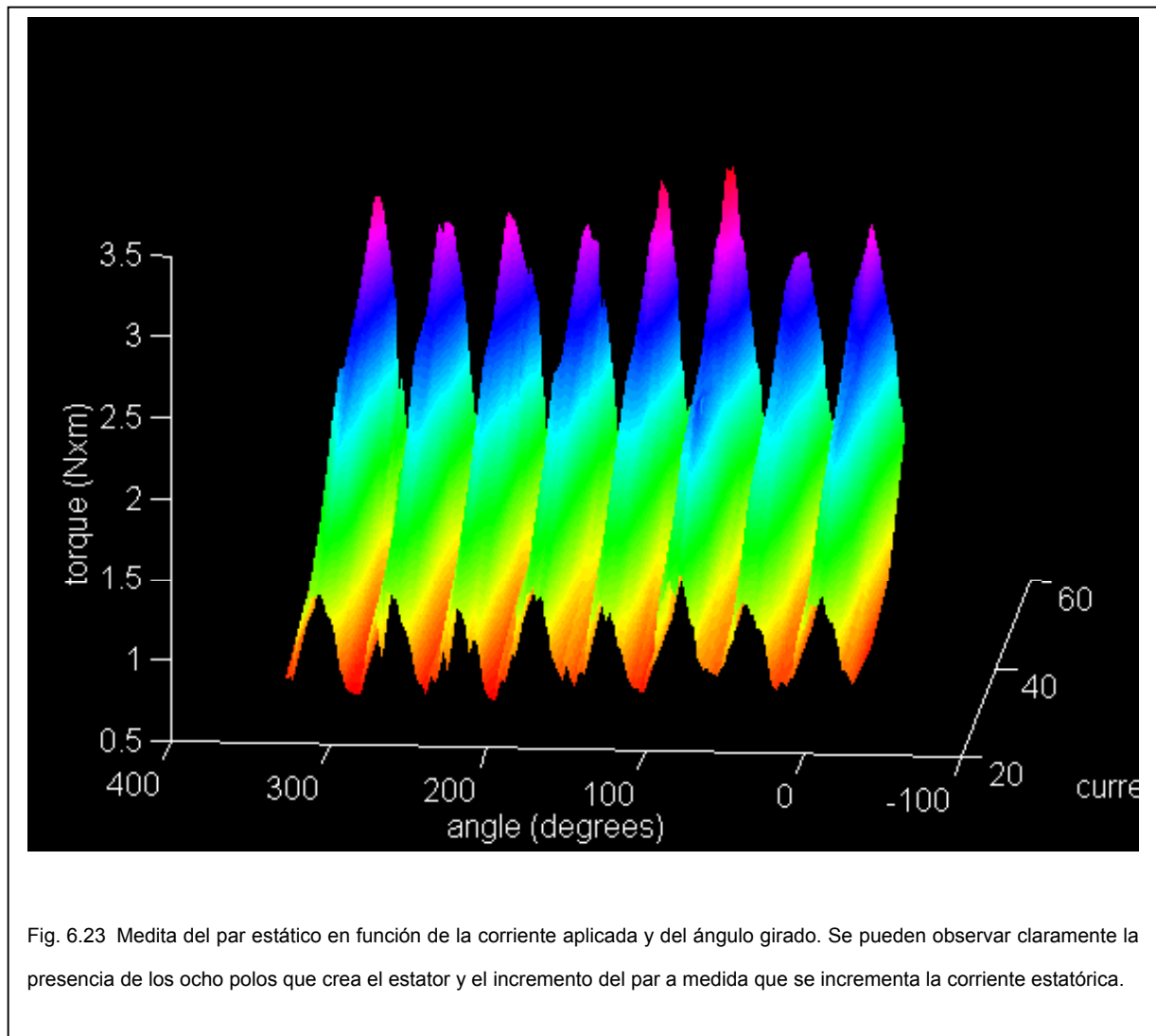
La figura 6.23 muestra la representación de los datos obtenidos. En ella se puede observar claramente la presencia de los ocho polos generados en el estator y el incremento del par con la corriente del inductor.

El par es siempre positivo tanto si el superconductor pasa por un polo Norte o por un polo Sur. El resultado es idéntico al obtenido en la simulación y se ajusta a lo previsto teóricamente, puesto que al cambiar el signo del campo externo, cambia el signo de la magnetización y el producto de ambos se mantiene siempre positivo.

La forma aproximadamente senoidal de las mismas es debido a la forma circular de las pastillas del superconductor. A medida que van girando, los bloques de



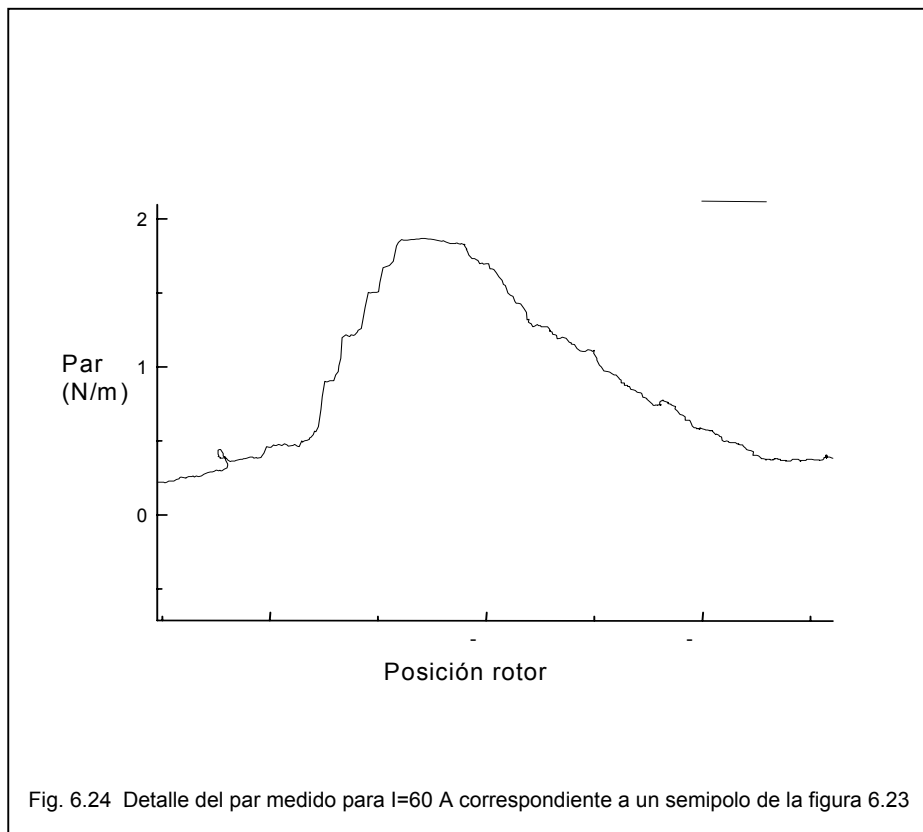
superconductor, que tienen forma cilíndrica, van entrando por las fronteras de los diferentes polos donde el gradiente del campo B_y es mayor.



Todos los efectos sobre el superconductor dependen del volumen que interactúa y al tener forma cilíndrica, de altura constante, el volumen es proporcional a la superficie. La superficie de un círculo que pasa sobre una recta es una función senoidal en el tiempo. A este efecto hay que añadir que la variación del campo en el entrehierro dista de ser una onda cuadrada. En el caso del motor de flujo axial con rotor diamagnético, el efecto de la dispersión del flujo queda notablemente incrementado.

La figura 6.24 muestra la ampliación de un semiestator. Esto permite contrastar los datos obtenidos experimentalmente y los de la simulación con el programa de elementos finitos (Figura 6.14).

Como puede observarse, el par calculado y el medido tienen la misma forma, aunque difieren en la magnitud del mismo. El par calculado máximo alcanza los 0.65 N/m y el medido en la realidad alcanza los 2N/m. Al simular el superconductor como diamagnético perfecto, la reluctancia efectiva es mucho mayor. En realidad el superconductor permite que el flujo penetre en su interior y lo atrapa con sus centros de



anclaje, con lo que el campo es más intenso que el calculado..

Al simularlo como diamagnético, el superconductor genera una desmagnetización en los polos por los que pasa que no coincide exactamente con el que produce en el funcionamiento real. En el caso real, cada vez que pasa por un polo de distinto signo, se produce un desplazamiento de flujo atrapado que pasa de un sentido al contrario, recorriendo un ciclo de histéresis.

Al ser los datos obtenidos en ambas pruebas del mismo orden de magnitud, teniendo en cuenta el criterio establecido al principio del apartado de simulaciones, consideramos que la prueba estática ha sido realizada correctamente y podremos sacar conclusiones de los resultados. Estas son presentadas en el apartado siguiente.

6.3.3 Conclusiones del ensayo estático

1-En las zonas donde no hay gradientes, no hay par ni levitación

$$\vec{F} = \int_v (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}^{ext} dV$$

Este principio queda establecido teóricamente con las ecuaciones siguientes:

$$(M \cdot \nabla)B = (M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y}) (B_x, B_y) = \left[(M_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial B_x}{\partial y}), (M_x \frac{\partial B_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial B_y}{\partial y}) \right]$$

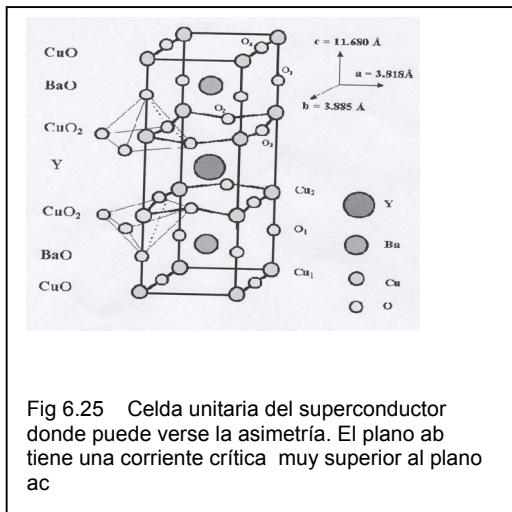
Donde puede observarse que el integrando es proporcional a los gradientes del campo. Donde los gradientes sean cero, la fuerza será cero.

Tanto en el cálculo numérico como en la prueba experimental se ha observado la variación del par al variar el gradiente del campo. Los picos de par se producen siempre donde el gradiente es más grande y los valles donde el gradiente es más pequeño.

2- Para obtener un par grande se necesita una magnetización My grande, lo cual significa:

-Planos ab perpendiculares al eje

-Conexión del motor con polos opuestos enfrentados.



En el apartado 6.2.5 hemos obtenido la siguiente expresión (6.13):

$$F_x = (M_x \frac{dB_x}{dx} + M_y \frac{dB_x}{dy}) \cdot V$$

$$= (M_x \cdot 3.33 + M_y \cdot 13) \cdot V \quad (N)$$

En la que el término dominante es $M_y \frac{dB_x}{dy}$

La conclusión era que para obtener un par grande se debería obtener un valor

de B_y grande. Para ello se pueden utilizar dos procedimientos complementarios e independientes. El primero se refiere a los bloques de superconductor.

Ya habíamos indicado que éste es un material fuertemente anisótropo. Cada celda unitaria tiene forma de paralelepípedo con un plano ab cuya densidad de corriente crítica es un orden de magnitud superior a la que corresponde al plano ac. Puesto que en un superconductor la magnetización es debida a las corrientes que se establecen en el

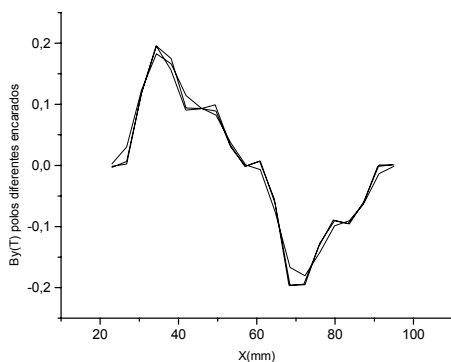


Fig. 6.26 Campo B_y en la parte superior (-1mm), central e inferior (+1mm) del entrehierro en el caso de polos diferentes encarados

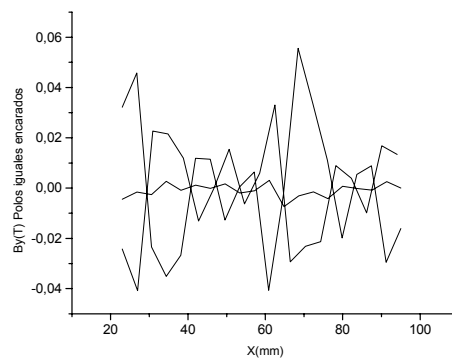


Fig. 6.27 Campo B_y en la parte superior (-1mm), central e inferior (+1mm) del entrehierro en el caso de polos iguales encarados

mismo, si se desea obtener un M_y grande se deberán tener bloques con el plano ab perpendiculares al eje.

El segundo procedimiento se refiere a la disposición relativa de los polos de ambos semiestatores. Para obtener una M_y grande se debe tener un campo B_y grande. Esto se consigue encarando polos de distinto signo entre si. Esta disposición ha sido comentada al principio del presente capítulo. La figura 6.6 muestra las conexiones en serie que hay que hacer para conseguir ésta configuración. Las figuras 6.26 y 6.27 muestran el campo B_y en distintos puntos del entrehierro para ambas configuraciones.

Puede observarse que en el caso de polos opuestos enfrentados, la componente B_y es muy superior a enfrentar polos de la misma polaridad. Si el campo es superior, la magnetización también lo será (hasta la saturación) y se obtendrá de esta forma un par superior. Por lo tanto se deberá usar esta configuración en el caso que interese B_y grande.

Se ha trabajado en todo momento con las bobinas inductoras de cada fase homóloga en serie. Queda para trabajos posteriores el análisis de las conexiones en paralelo en las que la corriente inductora viene influida por la posición del rotor en el entrehierro [Bosch-T]

3-La fuerza de levitación mayor se obtiene orientando el material de forma que la magnetización M_x sea máxima. Esto se consigue con los siguientes procedimientos:

- Planos ab deben ser paralelos al eje

-Configuración del motor con polos opuestos enfrentados

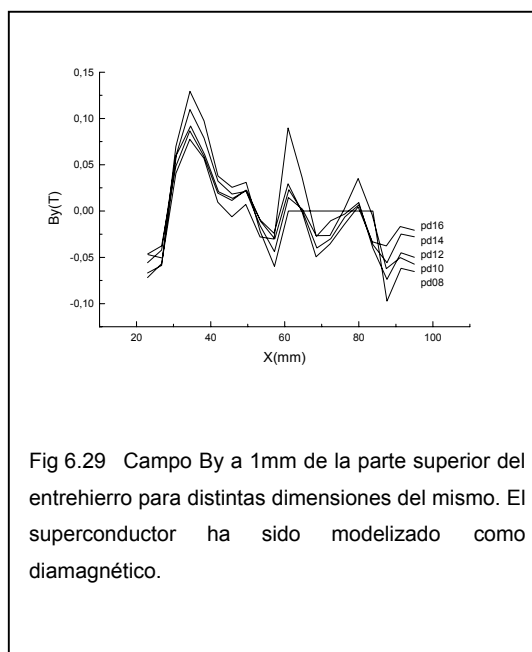
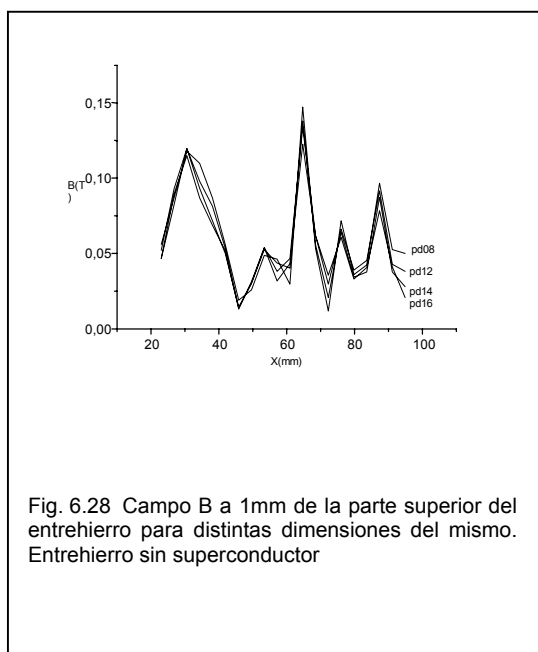
Este caso es completamente similar al anterior. Los razonamientos son totalmente paralelos. B_x debe ser suficiente como para magnetizar hasta la saturación. dB_y/dx es máximo cuando la configuración elegida es de polos opuestos.

Nuestro motor se ha conexionado con polos opuestos enfrentados y planos ab del superconductor perpendiculares al eje, con lo cual se pretende obtener un par grande, puesto que la fuerza de levitación sólo debe ser igual a su propio peso.

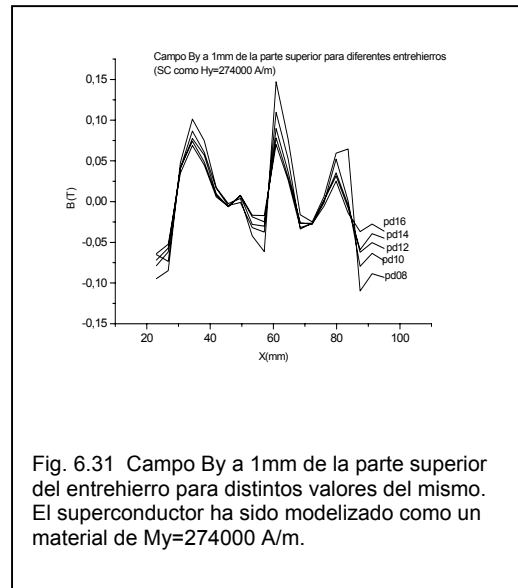
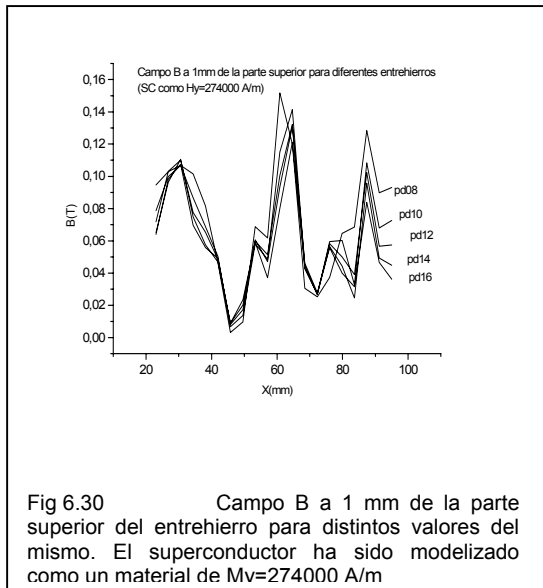
Los esfuerzos dinámicos de la rotación son pequeños en este caso debido a la baja velocidad de giro a la que se realizan los ensayos. Puede considerarse que las lecturas son una secuencia de equilibrios estáticos.

6.3.4 Nuevas consideraciones:

1-En el caso de un motor de flujo axial, ¿cuál es el valor óptimo del entrehierro?

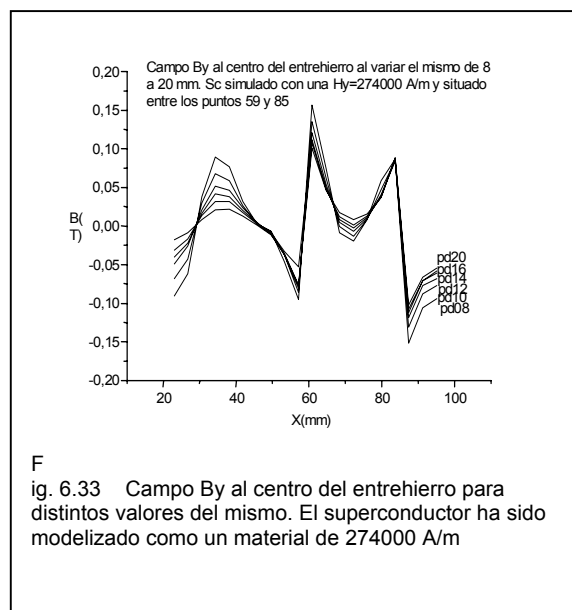
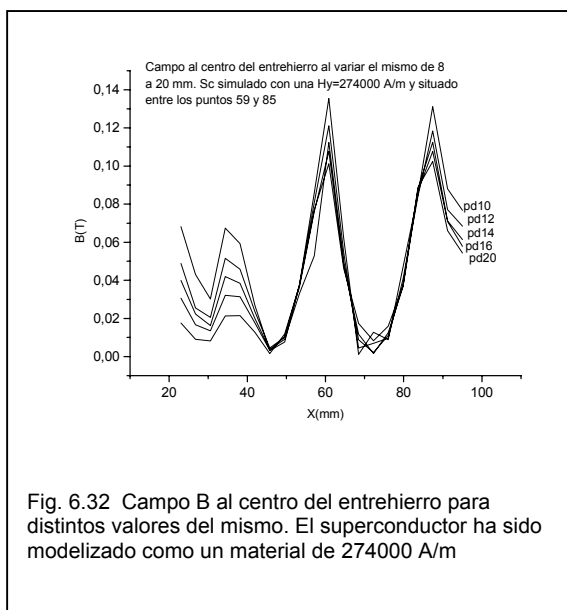


El hierro del estator tiene la mayor contribución a la conformación del campo gracias a su gran susceptibilidad. Sin embargo, una magnetización depende de la excitación magnética local. La excitación magnética local depende esencialmente de las corrientes de excitación en el devanado, pero también dependen de la presencia de otros materiales susceptibles de ser magnetizados como en el caso de los superconductores.



Su característica diamagnética hace que la magnetización sea opuesta a la excitación, con lo que el hierro está sometido a dos campos de excitación opuestos. La no linealidad de la susceptibilidad del hierro es responsable de que la permeabilidad mayor se corresponda con campos débiles, con lo que una inversión de la excitación produce localmente magnetizaciones invertidas en el hierro que afectan el campo total.

Desde este punto de vista, se hace necesario comprobar cual es la distancia adecuada a la que se ha de colocar el superconductor para que un campo local no



invierta la magnetización del hierro

Para responder a esta cuestión se han encontrado los campos en un punto del entrehierro para diferentes amplitudes del mismo y la fuerza que se ejerce en el superconductor en cada caso.

Las figuras 6.28- 6.33 muestran diferentes valores de la inducción y la componente B_y para entrehierros de 8 a 16 mm de grosor. Puede apreciarse que no hay variaciones apreciables en los puntos donde el campo es pequeño, siendo más significativas en los máximos de campo.

La tabla siguiente muestra el calculo de la fuerza sobre el superconductor en los casos de diamagnético ($\mu_R=1 \text{ e-}^7$) y flujo atrapado total ($H_y=274000 \text{ A/m}$).

	F_x (N/m)($\mu_R=1 \text{ e-}^7$)	F_x(N/m)($H_y=274000 \text{ A/m}$)
8mm	24,56	78,98
10mm	14,69	68,46
12mm	12,80	53,40
14mm	12,455	44,66
16mm	9,17	37,86

Los resultados no ofrecen ninguna duda. A mayor entrehierro, el campo es menor y también la fuerza que se ejerce sobre el bloque de superconductor. Por lo tanto, cabe esperar un par menor a medida que se incrementa el entrehierro. En este caso, el valor de $\delta=8\text{mm}$ es el más favorable. En cada caso habrá que elegir el entrehierro en

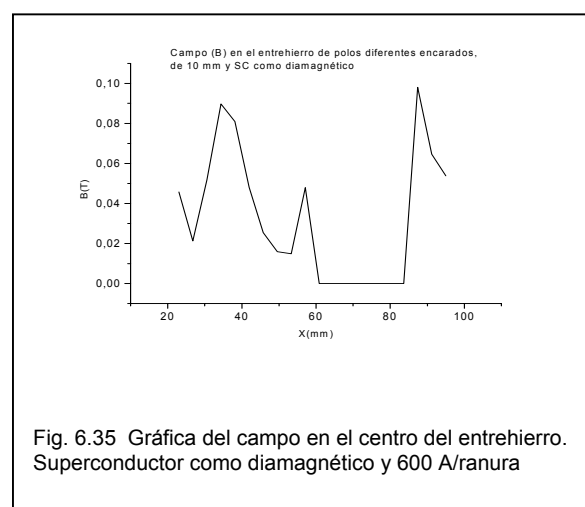
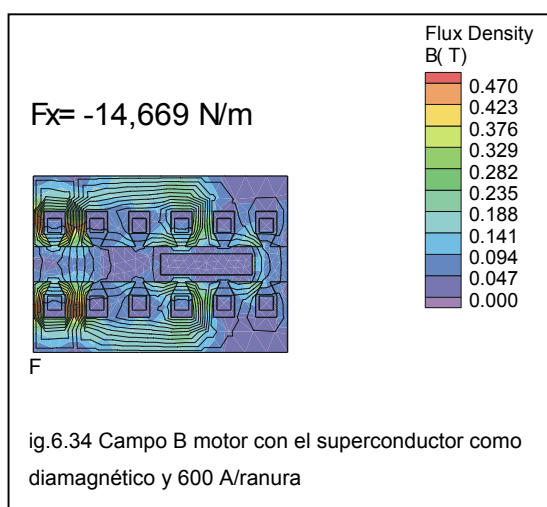
función del grosor de los bloques de superconductor, pero siempre el más pequeño es el que ofrece mayor par.

Sin embargo esta conclusión no es extensible a todas las situaciones. Depende del tamaño relativo de los polos y del bloque superconductor así como de las región donde se encuentre.

2-Disminución de campo al pasar un bloque SC por debajo del polo

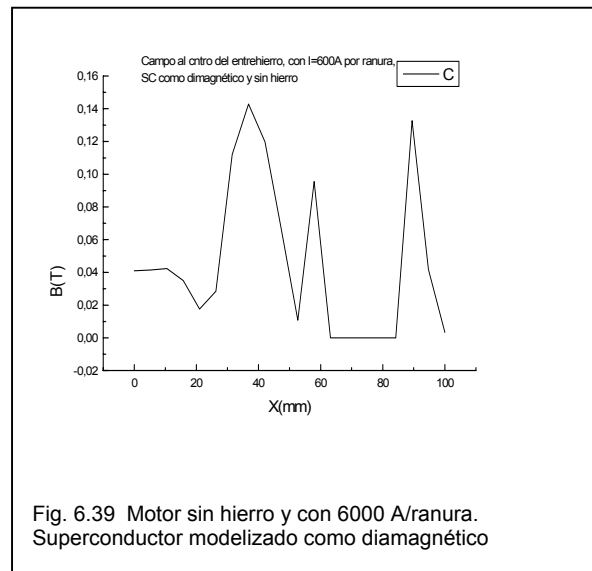
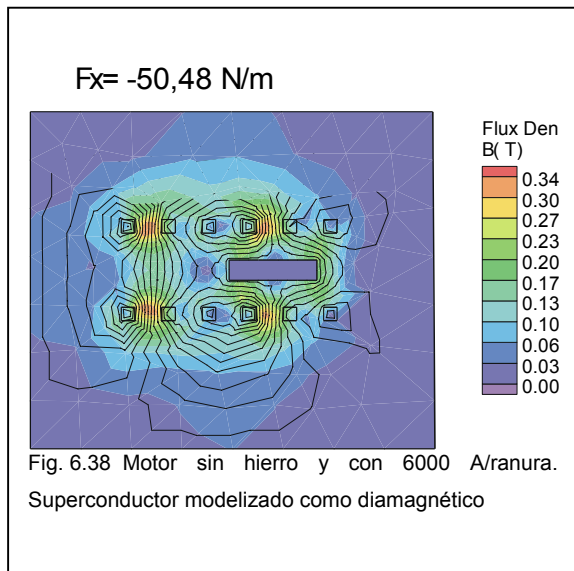
En la siguiente tabla se muestra la variación del campo magnético en un punto del entrehierro a medida que un bloque de superconductor se acerca. El punto considerado es el de coordenadas $X=71$ e $Y=46$, que está situado en la parte superior del entrehierro, entre las ranuras 4 y 5 de las simulaciones. Se ha elegido un bloque superconductor cuadrado de 26 mm de lado. Su superficie equivale a la de un círculo de radio 15mm, como los que se han usado en el rotor experimentado.

C(X)	23-49	27-53	31-57	35-61	39-65	43-69	47-73	51-77	55-81	59-85
(T)	.14	.13	.147	.157	.164	.079	.076	.072	.073	.075



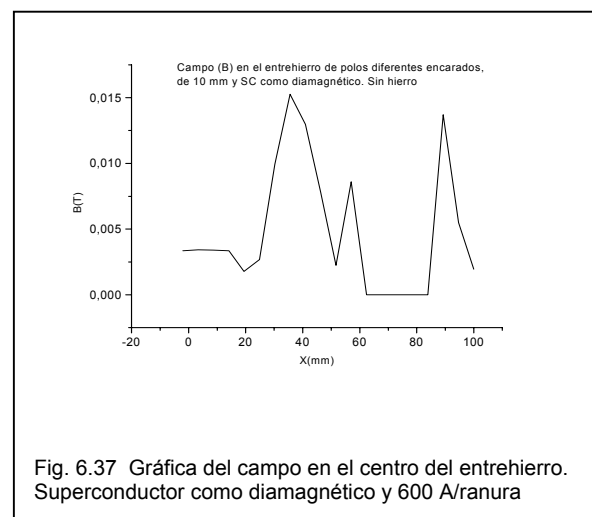
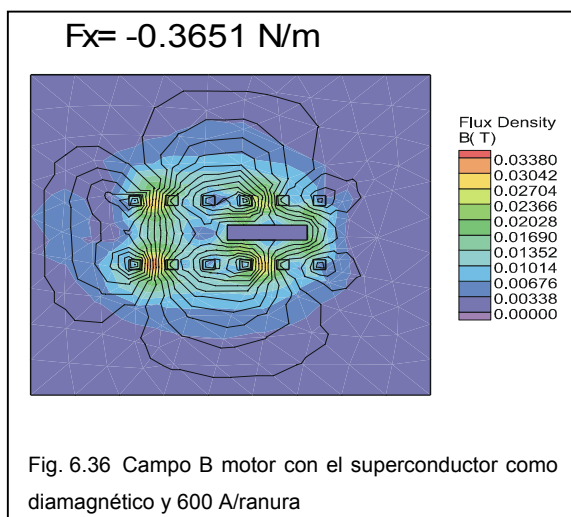
Esta notable disminución que llega al 48 % hace que nos cuestionemos el papel

del hierro en este tipo de maquinas. ¿Debe usarse hierro o debe pensarse en un



motor de diseño totalmente nuevo sin material ferromagnético?

La figura 6.34 muestra el campo en el interior del motor y la 6.35 la gráfica del mismo, para una intensidad magnetizante de 600 A/ ranura y el superconductor



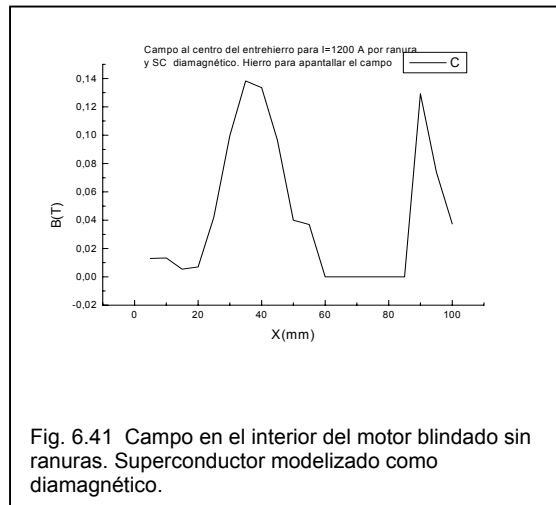
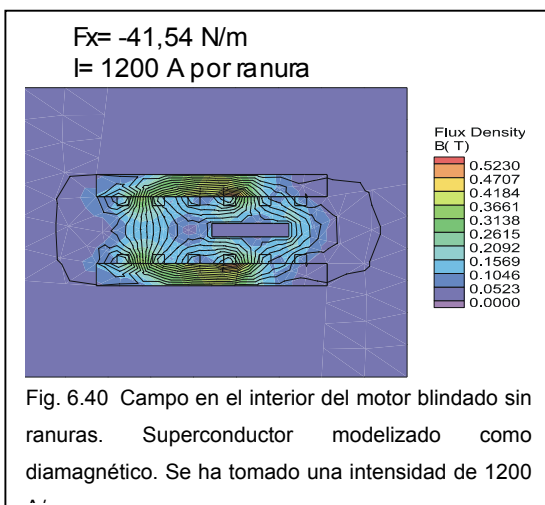
modelizado como diamagnético. Puede leerse la fuerza ejercida sobre el bloque superconductor del rotor.

Las figuras 6.36 y 6.37 corresponden a la simulación del motor con la misma intensidad magnetizante que en el caso anterior y la misma modelización del superconductor, pero habiendo sido eliminado el hierro del mismo. Puede observarse la disminución de campo y fuerza que se ha producido

Las figuras 6.38 y 6.39 muestran el caso anterior, o sea el motor sin hierro pero con una intensidad magnetizante 10 veces superior (6000 A/ranura). Puede observarse que en este caso se ha incrementado notablemente la fuerza ejercida sobre el superconductor y el campo en el mismo. Se trata de un motor sin hierro y con una gran corriente por ranura y correspondería a la idea de un motor con el inductor e inducido totalmente superconductores. El inductor estaría formado por cables superconductores y el rotor por bloques del mismo.

Este diseño exige un especial cuidado con el material que sujete los cables del estator, puesto que se pueden dar fuerzas sobre los mismos de $F_x=177$ N/m y $F_y=50$ N/m por efecto electrodinámico entre ellas. Esta nueva disposición proporciona unas ventajas considerables respecto al motor con ranuras de hierro.

En el caso anterior que, como hemos visto, ofrece grandes ventajas, tiene el inconveniente de la gran dispersión del flujo, que puede alcanzar valores notables fuera del motor. Si no se puede admitir este flujo disperso, cabe blindar el motor con plancha de hierro como muestra la figura 6.40. La 6.41 muestra el gráfico del flujo en el centro



del motor para este caso de motor blindado.

Esta solución mixta parece desvanecer la ventaja de no usar hierro en el motor. La fuerza magnetomotriz necesaria es, sin embargo, inferior al caso de no usar hierro. Se trata de una solución intermedia que permite ventajas tecnológicas constructivas. Por ejemplo el empleo de plancha con ranuras limita el espesor de las mismas a 0.4 mm, pues más finas provocarían problemas de troquelado. Es conocido que cuanto más fina es la plancha magnética, menores son sus pérdidas por corrientes parásitas.

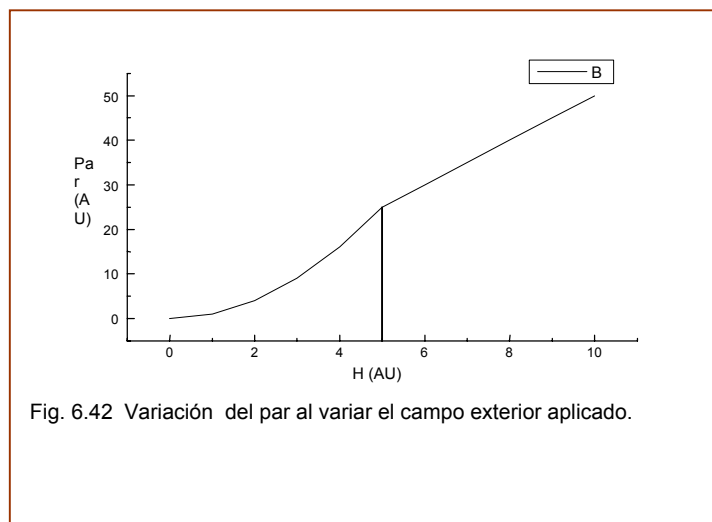
El motor blindado propuesto permite el empleo de plancha magnética arrollada en forma de núcleo toroidal sin dientes. Así puede utilizarse plancha comercial de pocas centésimas de milímetro de espesor, que le confiere una excelentes cualidades magnéticas, y, al no llevar dientes, desaparecen las limitaciones tecnológicas que impiden construcciones polares inferiores a los 10mm en estructuras de dientes y ranuras.

3-Optimización de la corriente de excitación

Para optimizar el diseño del estator, independientemente de la tecnología usada en el mismo, se han de fijar los criterios que definan la corriente óptima que debe circular por el mismo. Para ello nos

basaremos en las magnitudes que definen el par y la curva de magnetización de un superconductor.

Hemos visto:



$$\tau = \frac{d(1/2 \mu_0 (M \times H)V)}{d\alpha}$$

y sabemos que la magnetización del superconductor crece con el campo hasta la saturación del mismo. O sea, que hasta este punto, un incremento del campo magnetizante hace que crezca el par al cuadrado.

A partir de la saturación del superconductor, un incremento del campo externo solo incrementa linealmente el par producido. Por lo tanto, parece que éste es un punto óptimo de campo magnetizante. La figura 6.42 muestra esta variación y el punto de magnetización externa óptima

Como resumen, podemos decir que:

- La intensidad que debe circular, para optimizar el par, es aquella que crea una intensidad de campo magnético que lleve a la saturación el superconductor. Hasta este punto, el par crece con la intensidad al cuadrado. A partir de la saturación, el par crece linealmente con la corriente, mientras que las pérdidas lo hacen con el cuadrado de la misma, por lo que, aunque aumente la potencia, el rendimiento disminuye.

6.4 Caracterización dinámica

Con esta caracterización se pretende observar el funcionamiento del motor al ser alimentado con corriente alterna y someterlo a un par de frenado variable. Para ello, se alimenta el motor y se aplica un par resistente en el eje. Las medidas realizadas son el par y la posición del rotor. La posición del campo esta determinada al controlar el ondulator con el ordenador.

Al ser alimentados con una corriente alterna, los dos semiestátores generan un campo giratorio en el entrehierro de la máquina. Este campo penetrará y quedará atrapado en el superconductor y de la interacción de ambos resultará el funcionamiento del rotor.

La puesta en marcha del motor se realiza según el siguiente proceso ZFC:

- 1 Se enfría el rotor para que el material transite al estado superconductor
- 2 Se aplica una tensión trifásica a los dos semiestátors. El campo penetra al superconductor y queda atrapado en los centros de anclaje.
- 3 De acuerdo con lo observado en el motor de flujo radial, al girar el campo magnético, aparece un desalineamiento entre el campo exterior y el flujo atrapado en el material, pero mientras no haya desplazamiento de flujo, el superconductor gira con el campo atrapado siguiendo el campo inductor siempre en una zona reversible. El comportamiento es como el de una máquina síncrona.
- 4 Si se incrementa progresivamente el par, el flujo anclado se desplaza y desaparece la reversibilidad. El flujo anclado cambia, creándose y desapareciendo vórtices, lo que lleva asociado un gasto de energía que se convierte en un par. Se ha entrado en una zona de irreversibilidad. El superconductor se ve traspasado por el campo del estator y va recorriendo ciclos de histéresis. El par será la derivada de la energía consumida de cada ciclo respecto al ángulo girado. El motor se comporta como un motor de histéresis.

6.4.1 Sistema de medidas

Para realizar la caracterización dinámica se requiere un sistema que permita alimentar con una tensión trifásica los devanados motor, así como un sistema de freno para introducir el par. Deberán poder medirse tanto el par producido como la posición del rotor en cada instante. Para ello se ha preparado el siguiente equipo:

- Contenedor de nitrógeno en el que quepa el motor entero
- Soportes para los semiestátors
- Sistema de freno para variar el par y su control.

- Sistema de alimentación del motor

- Sensores para adquisición de datos
 - par

 - posición del rotor

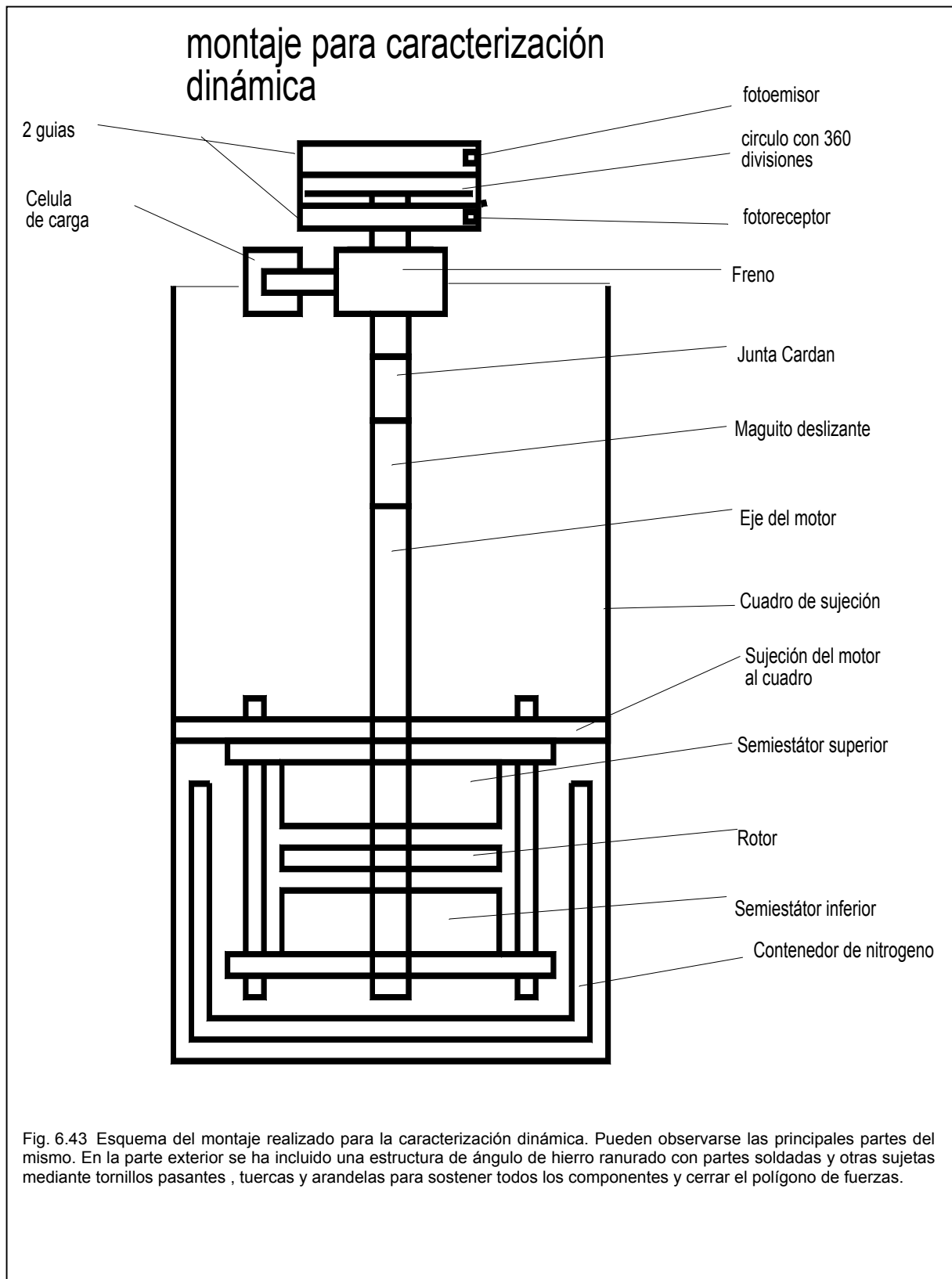
- Interfaces para las señales procedentes de los sensores y su alimentación

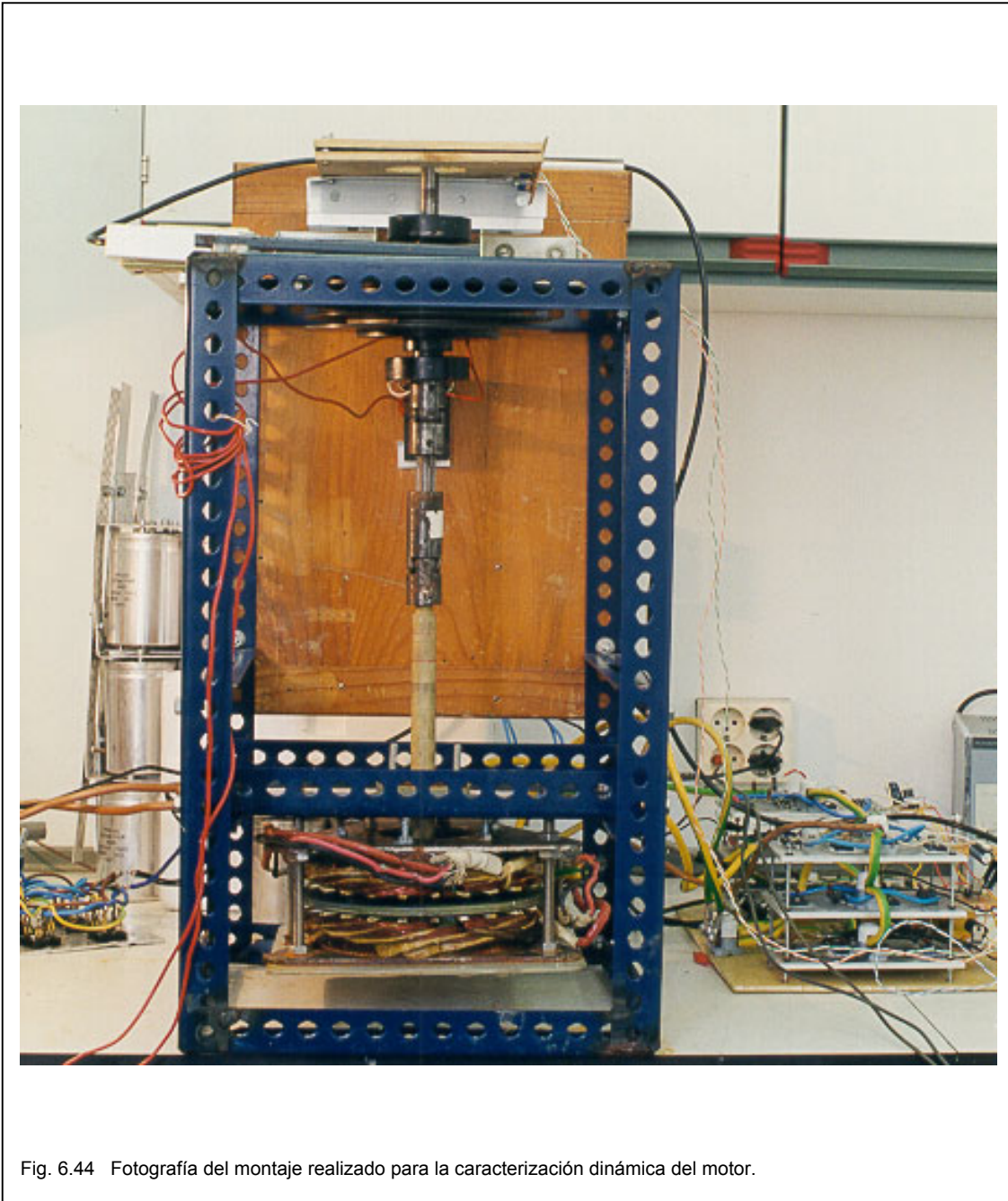
- Estructura que soporte todos los anteriores

- Placa de adquisición de datos conectada al ordenador, que también proporcionará la medición del tiempo.

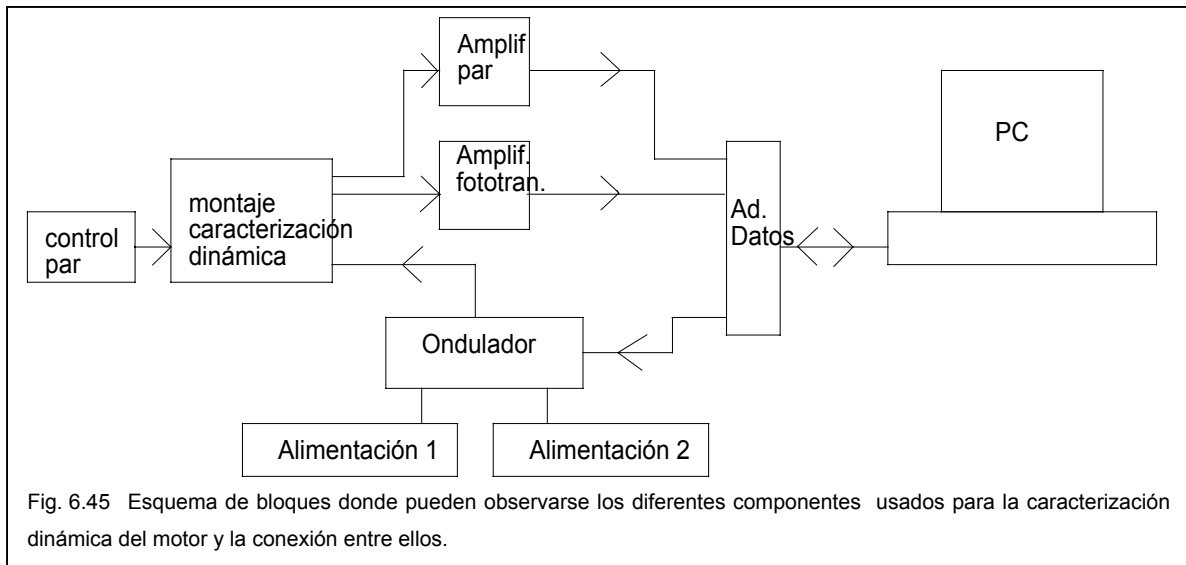
- Software para la adquisición de datos y el ondulator

La figura 6.63 muestra esquemáticamente el montaje realizado para obtener la caracterización dinámica y la figura 6.64 una fotografía del mismo.

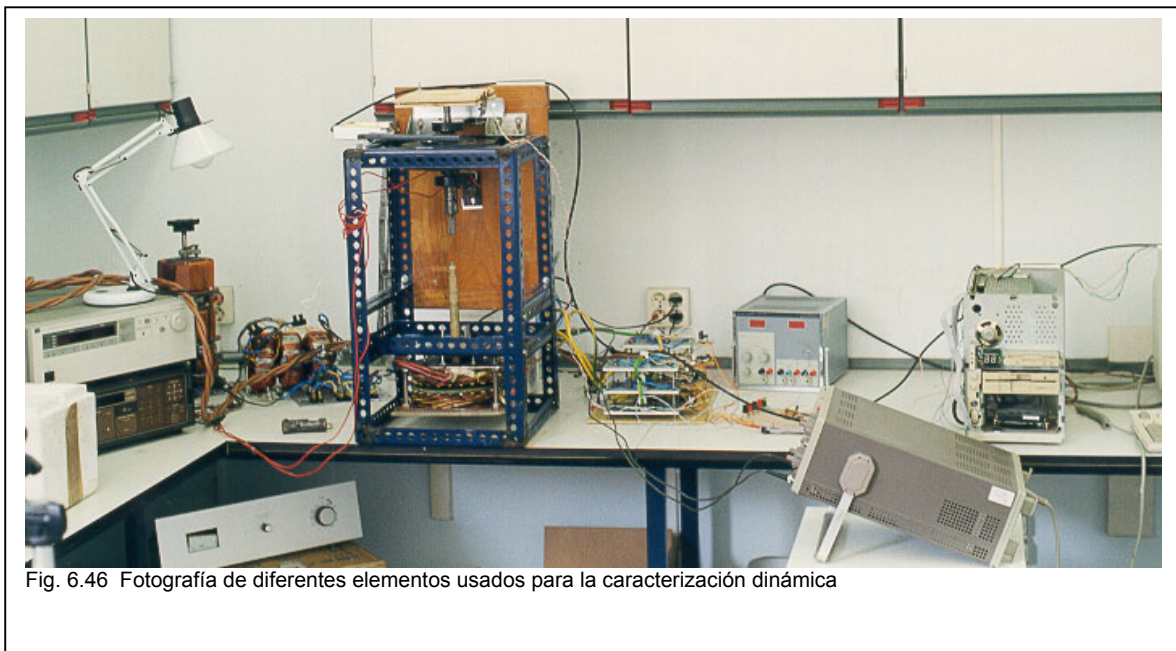




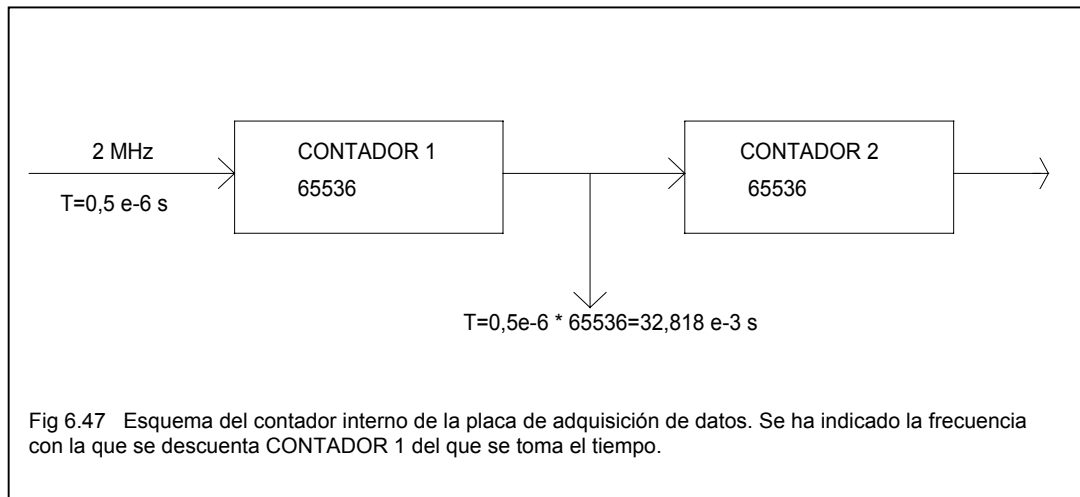
La figura 6.45 muestra el esquema de bloques del montaje para la caracterización dinámica y la figura 6.46 una fotografía del mismo



Para medir el tiempo se usa un doble contador que posee la placa de adquisición de datos. Consta de dos contadores de 16 bits conectados en cascada que se usan internamente como base de tiempos y son accesibles para el usuario.



A la entrada se dispone una onda cuadrada de 2 MHz, lo que da a la salida del primer contador, una onda cuadrada con un periodo de 32,818 ms.



Para la lectura del par se ha usado la misma célula y circuito amplificador que en la caracterización estática. Se deberá multiplicar la lectura de tensión procedente del amplificador de la célula por $0.21053 \text{ (N/V)} \cdot \text{m}$, como se indica a continuación

$$\begin{aligned} \text{Calibración de la célula} \left(\frac{\text{N}}{\text{V}}\right) \times \text{distancia célula - eje (m)} \times \text{lectura célula (V)} = \\ 1.3157 \left(\frac{\text{N}}{\text{V}}\right) \times 0.16 \text{ (m)} \times \text{lectura célula (V)} = 0.2153 \times \text{lectura célula (N} \times \text{m)} \end{aligned}$$

6.4.2 Resultados obtenidos

Las medidas tomadas se han incluido en el anexo 6. La tabla 2 es una muestra de las mismas para indicar como se han usado los datos para obtener las gráficas adjuntas.

Las columnas PAR, POSROT (posición del rotor), y TIEMPO, son las lecturas efectuadas por el ordenador.

La columna S500AA constituye un alisamiento de las medidas del par para disminuir el ruido introducido por el sistema. Consiste en asignar a cada valor del par, el promedio de los 250 anteriores y los 250 posteriores.

La columna POSEST representa la posición del campo magnético. Como éste es generado desde el mismo ordenador que controla la adquisición de datos, se le asigna un valor incremental de una unidad por cada lectura efectuada.

POSROTGR representa la posición del rotor en grados. Para medir la posición del rotor se ha usado un contador interno de la placa de adquisición de datos. Por cada grado que gira el rotor se descuenta este contador. Para tener una medida de la posición creciente a medida que gira el rotor, se hace: POSROTGR = 65535-POSROT.

POSESTGR da la posición del estator en grados. Como cada vuelta se efectúan 64 lecturas, y tenemos 8 polos, se realizará una vuelta mecánica cada 256 lecturas. Para pasarlo a grados mecánicos, se ha realizado la siguiente operación:

$$\text{POSESTGR} = \text{POSEST} * 360 / 256$$

ANGPAR es el ángulo de par. Se consigue restando la posición del rotor de la del estator.

La columna TIEMPO se toma midiendo un registro interno formado por dos contadores de 16 bits conectados en cascada que se descuenta con un reloj de 2 Mhz. Para tener un incremento positivo del tiempo, se restan los valores de la columna del tiempo medido del valor mayor de la misma y se calibra con el período indicado $\text{TIEMPO} = (65449 - \text{TIEMPOM}) * 0.03276$.

PARCAL es la columna del par calibrada en N·m. Para obtenerla se tiene en cuenta la calibración de la célula de carga y la distancia de la misma al eje del motor como se ha indicado al principio del apartado:

$$5/3,8 = 1,3157 \text{ (N/V)}$$

$$1,3157 \text{ (N/V)} * 0,16 \text{ (m)} = 0,21053 \text{ (N·m/V)}$$

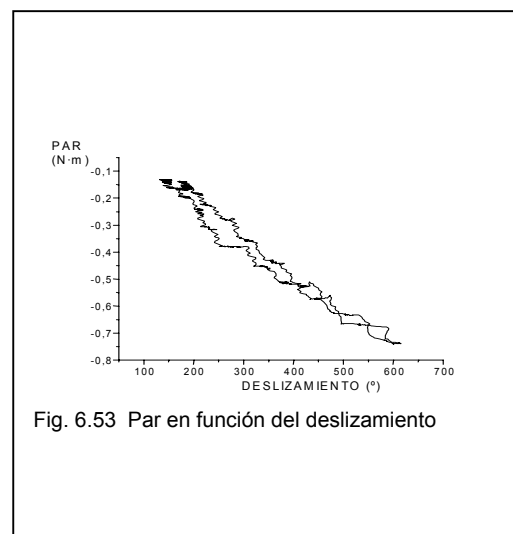
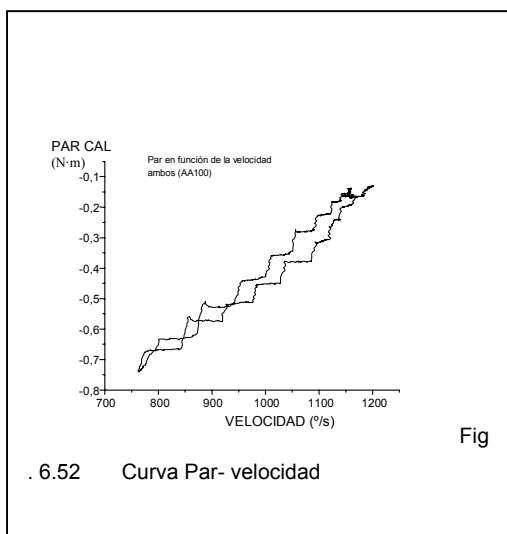
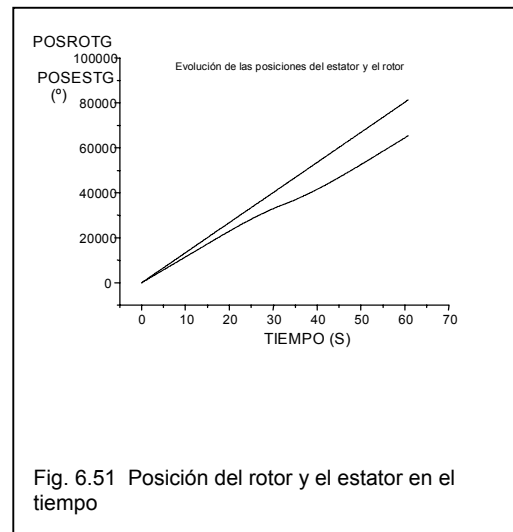
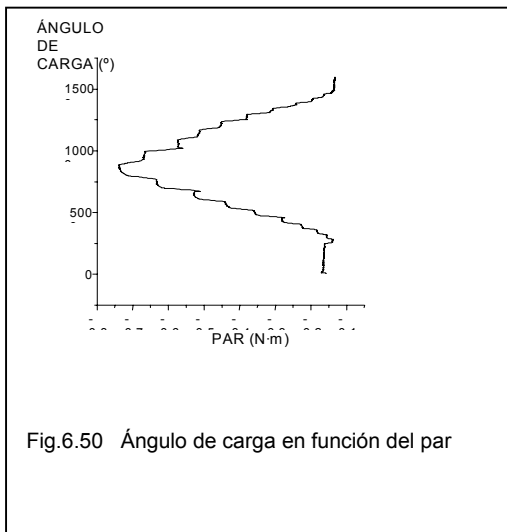
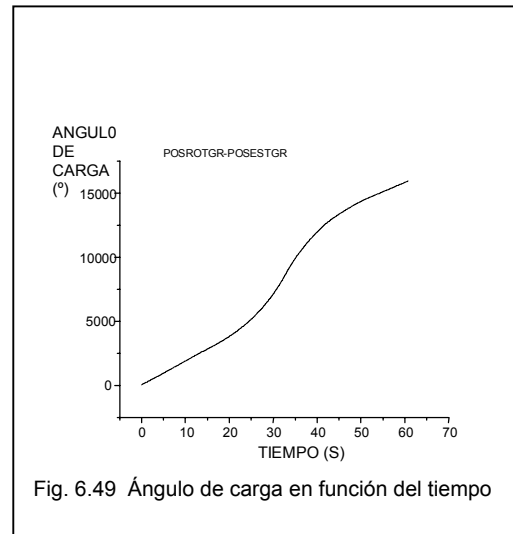
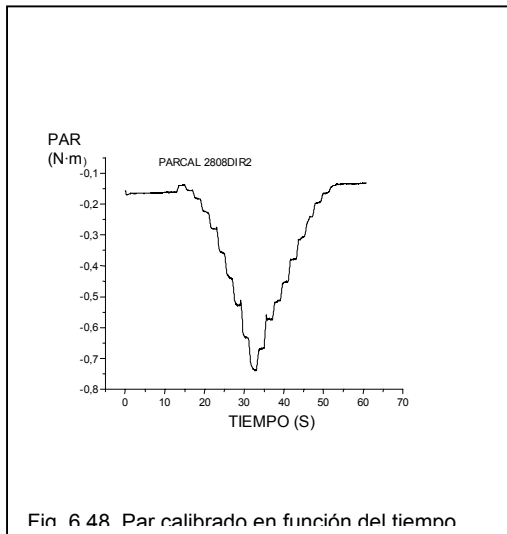
$$0,21053 \text{ (N·m/V)} * \text{Tensión en la célula (V)} = \text{PARCAL (N·m)}$$

Con estos criterios se han completado la tablas de datos. La siguiente tabla es una muestra de las primeras lecturas de un total de 64000 que se han realizado para cada prueba.

PAR	S500AA	POSROT	TIEMPOM	(i)	65535- col(B)	Col(posest)* 360/256	Col(posestgr)- Col(postrot)	(65449- col(C))*0.0327	Col(S500AA) *0.21053
				POSEST	POSROTGR	POSESTGR	ANGPAR	TIEMPO	PARCAL
-0.85693	-0.746	65518	65448	46	17	64.68	47.68	0.0327	-0.15718
-0.896	-0.747	65518	65448	47	17	66.09	49.09	0.0327	-0.15729
-0.9432	-0.747	65517	65448	48	18	67.5	49.5	0.0327	-0.15737
-0.954	-0.747	65516	65448	49	19	68.9	49.9	0.0327	-0.15774
-0.935	-0.747	65515	65448	50	21	70.31	50.31	0.0327	-0.15738
-0.874	-0.747	65514	65448	51	21	71.71	50.71	0.0327	-0.15733
-0.817	-0.747	65513	65448	52	22	73.12	51.12	0.0327	-0.15773
-0.781	-0.747	65512	65448	53	23	74.53	51.53	0.0327	-0.15736
-0.803	-0.748	65511	65448	54	24	75.93	51.93	0.0327	-0.15749
-0.844	-0.748	65510	65448	55	25	77.34	52.34	0.0327	-0.15767
-0.878	-0.749	65509	65448	56	26	78.75	52.75	0.0327	-0.15782
-0.898	-0.750	65508	65448	57	27	80.15	53.15	0.0327	-0.15792
-0.864	-0.750	65507	65447	58	28	81.56	53.56	0.0654	-0.15793
-0.788	-0.750	65506	65447	59	29	82.96	53.96	0.0654	-0.15792
-0.722	-0.750	65505	65447	60	30	84.37	54.37	0.0654	-0.15792
-0.698	-0.751	65504	65447	61	31	85.78	54.78	0.0654	-0.15899
-0.708	-0.752	65503	65447	62	32	87.18	55.18	0.0654	-0.15814
-0.751	-0.752	65502	65447	63	33	88.59	55.59	0.0654	-0.15833
-0.786	-0.753	65501	65447	64	34	90	56	0.0654	-0.15885
-0.786	-0.753	65500	65447	65	35	91.40	56.4	0.0654	-0.15861

Tabla 2: Muestra de los datos obtenidos para la caracterización dinámica.

GRÁFICOS DE LA PRUEBA DINÁMICA



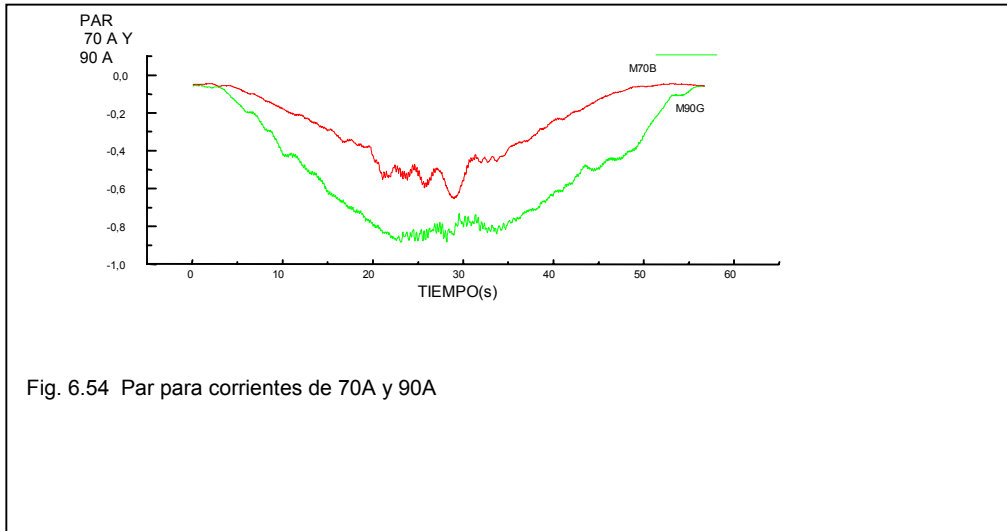


Fig. 6.54 Par para corrientes de 70A y 90A

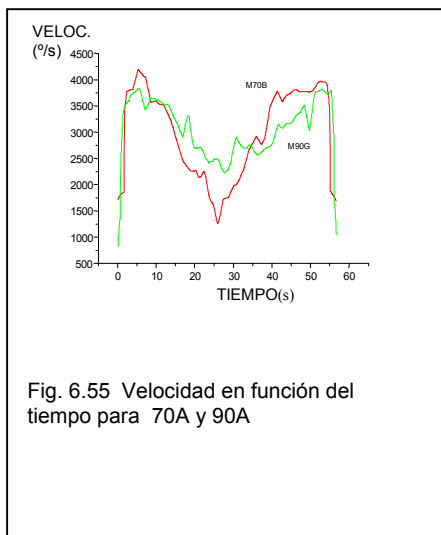


Fig. 6.55 Velocidad en función del tiempo para 70A y 90A

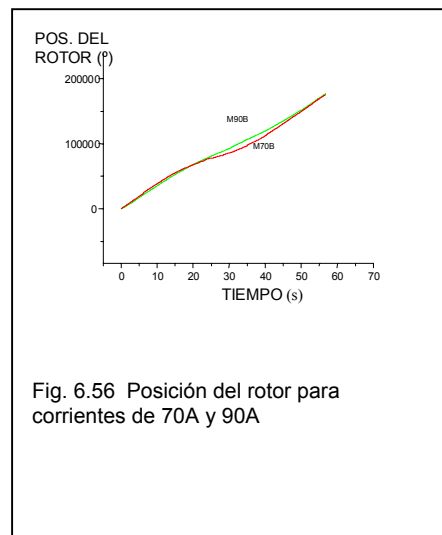


Fig. 6.56 Posición del rotor para corrientes de 70A y 90A

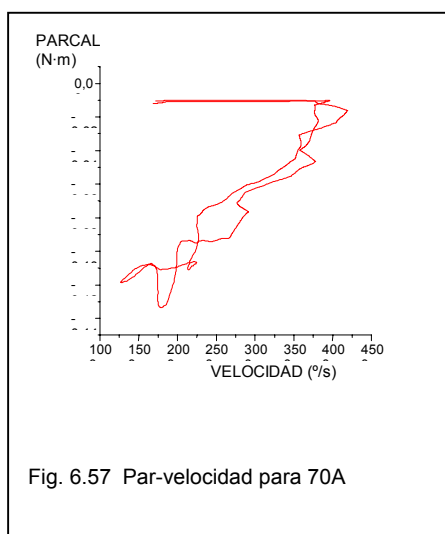


Fig. 6.57 Par-velocidad para 70A

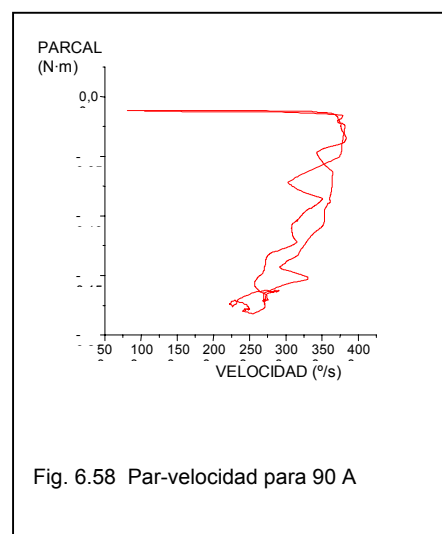


Fig. 6.58 Par-velocidad para 90 A

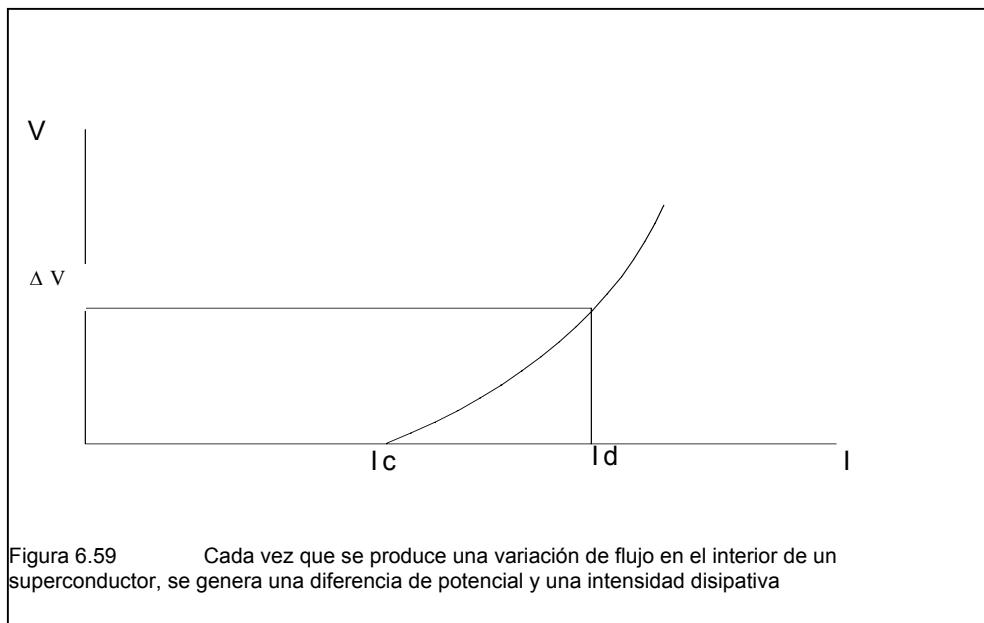
Las figuras 6.48 – 6.53 muestran los gràficos de la prueba dinàmica.

La figura 6.48 muestra la forma en que se ha aplicado el par de frenado. Se ha incrementado hasta conseguir el par màximo y luego se ha decrementado de forma escalonada cada 2 segundos.

La figura 6.50 muestra como el àngulo de carga se incrementa a medida que el par crece. Cada salto del par se traduce en un frenado del rotor y por lo tanto en un salto del àngulo de carga.

La figura 6.51 muestra la posición del estator (una recta) y del rotor en función del tiempo. Puede observarse la divergencia entre ambos en función del tiempo.

La figura 6.52 es la curva par-velocidad del motor ensayado. Para obtener la velocidad se ha derivado la función posición del rotor en grados (posrotgr) respecto al tiempo. Se tiene así la velocidad en grados por segundo. Se puede observar como disminuye la velocidad al incrementar el par de frenado y cierta histéresis entre la zona donde se incrementa el par y donde se decremента.



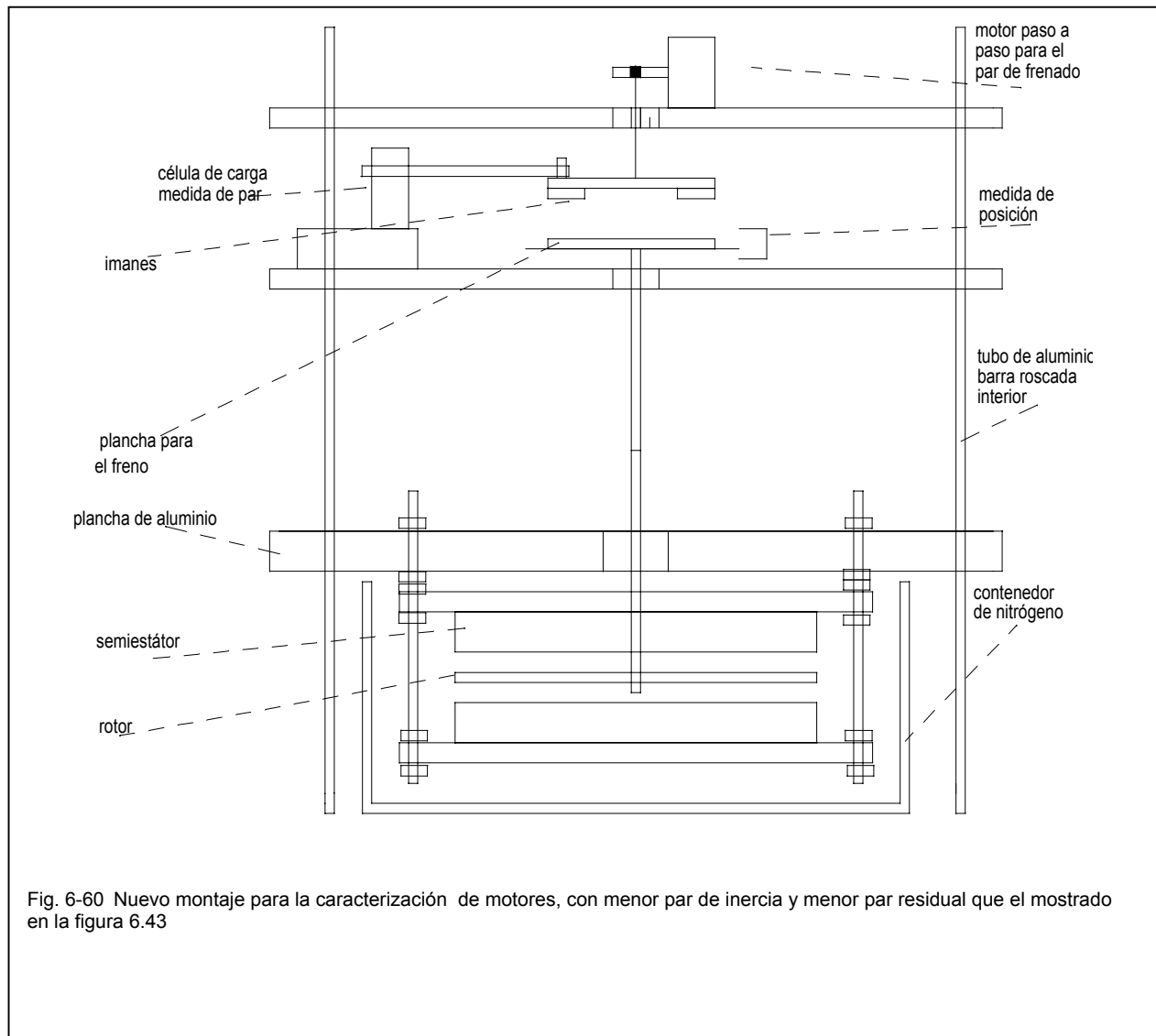
Cuando el motor funciona en régimen dinámico, cada vez que un bloque de superconductor transpasa la frontera de un polo, se produce una variación del flujo atrapado en el superconductor. Esta variación de flujo se convierte en una diferencia de potencial y por lo tanto, en la aparición de una intensidad disipativa, I_d , que produce pérdidas. Esta intensidad desaparece cuando el flujo atrapado vuelve a ser constante. Esta diferencia de comportamiento típica de los materiales superconductores hace que podamos tener una característica par-velocidad diferente de la de los motores de histéresis convencionales, cuyo par, que es la derivada de la energía consumida en los ciclos de histéresis respecto del ángulo girado, es independiente de la velocidad.

La figura 6.53 nos muestra como varía el deslizamiento en función del par. También aquí se observa el incremento del deslizamiento al incrementar el par y cierta histéresis entre el incremento y decremento del mismo.

Las figuras 6.54 a 6.58 muestran las diferencias entre los valores observados cuando se hace pasar por el motor una mayor intensidad. En este caso se han incluido medidas para 70 y 90 A. En general, a mayor intensidad le corresponde un par mayor y por lo tanto mayor velocidad para cada par de frenada aplicado.

La figura 6.49 muestra el ángulo de carga en función del tiempo. Se puede observar como se incrementa la pendiente del mismo a medida que incrementamos el par de carga. El hecho de que la pendiente no se anule, indica que no tenemos funcionamiento síncrono. Éste era el funcionamiento esperado en las zonas en las que el par aplicado fuera nulo o pequeño.

Este comportamiento inesperado puede ser debido a varios factores. En primer lugar ya dijimos que conocíamos el comportamiento superconductor de las pastillas y, aunque no habían sido caracterizadas, no esperábamos que fueran de gran calidad. En segundo lugar, hay que tener en cuenta la degradación que han sufrido, agrietándose varias veces a lo largo de los múltiples procesos de enfriamiento-calentamiento que han sufrido, con la consiguiente formación de hielo y posteriormente agua sobre las mismas. En tercer lugar tenemos un sistema de frenado de polvo de hierro con mucho



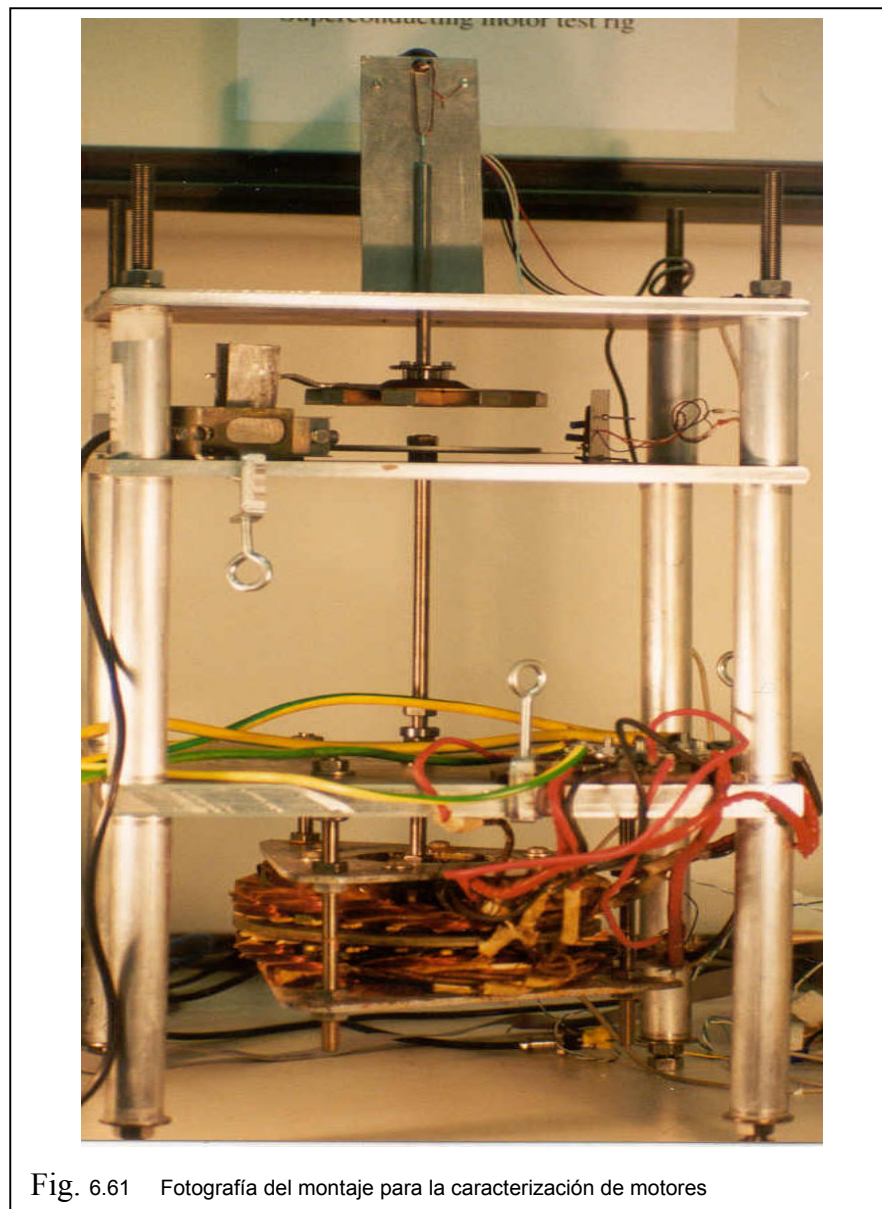
peso y gran par residual asociados. Todo ello ha creado unas condiciones que dificultan el funcionamiento síncrono del motor.

Para evitar estos inconvenientes parece apropiado construir un nuevo sistema de caracterización para nuevos motores. Éste debe tener menos inercia que el anterior y menor par residual. Por ello, se ha realizado una estructura nueva a base de plancha y tubos de aluminio. La posición del rotor se mide con un fotodiodo como en la prueba dinámica del motor de flujo axial.

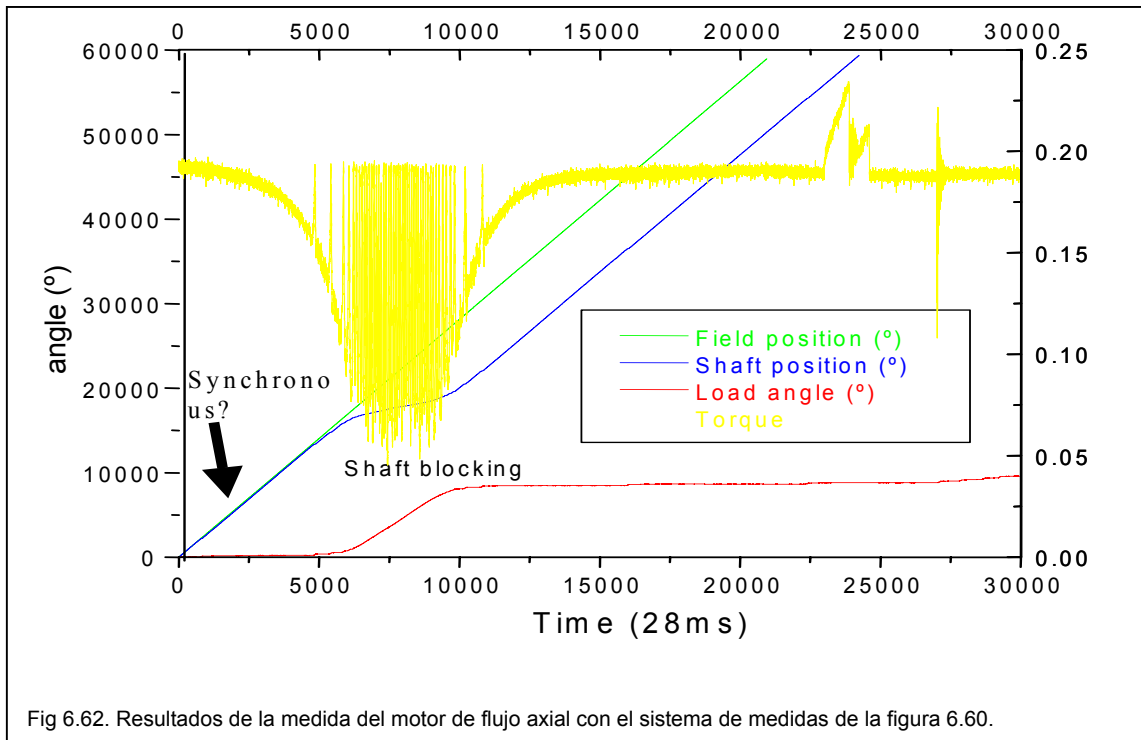
Para el frenado del motor se han usado ocho imanes de Nd Fe B adheridos a una plancha de acero que se mueve verticalmente con un motor paso a paso. La fuerza

ejercida por los imanes sobre esta plancha, se transmite a una célula de carga y la salida de la misma se introduce a la placa de adquisición de datos del ordenador.

Los imanes ejercen un par de frenado sobre otra plancha de aluminio que se ha adherido al eje del motor. Este par de frenado puede variarse modificando la distancia de los imanes a la misma.

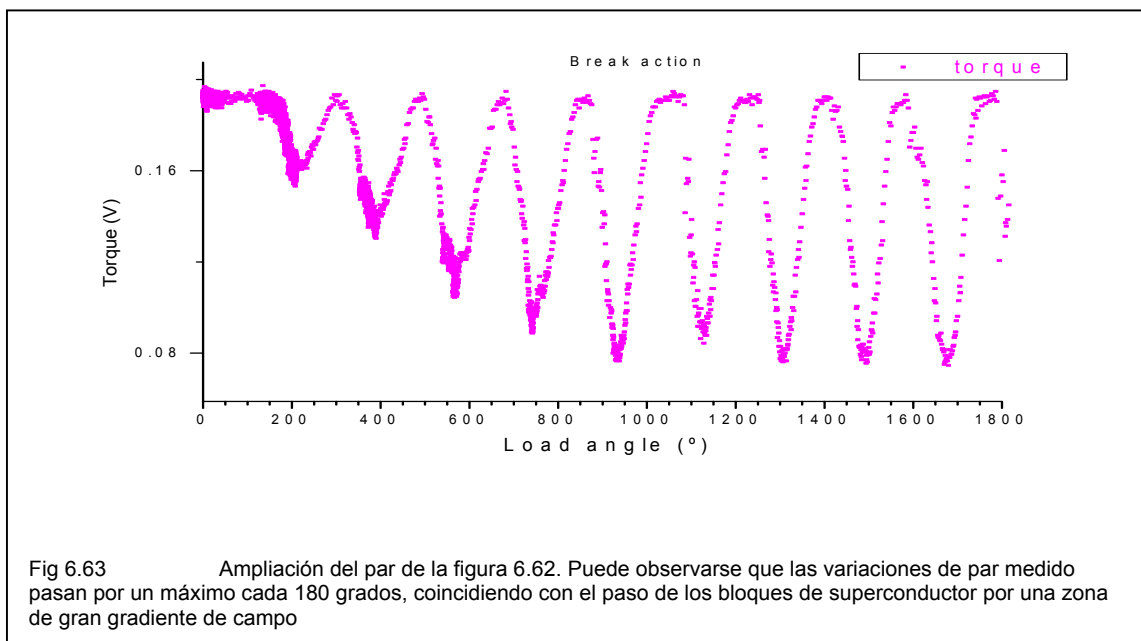


La lectura de la posición del rotor se efectúa con una hoja de poliéster con 360 divisiones y el par aplicado con una célula de carga de la misma forma que se hizo en el



anterior montaje de estructura de hierro ranurado y freno de polvo de hierro. En el anexo 2 se muestran los detalles del montaje efectuado.

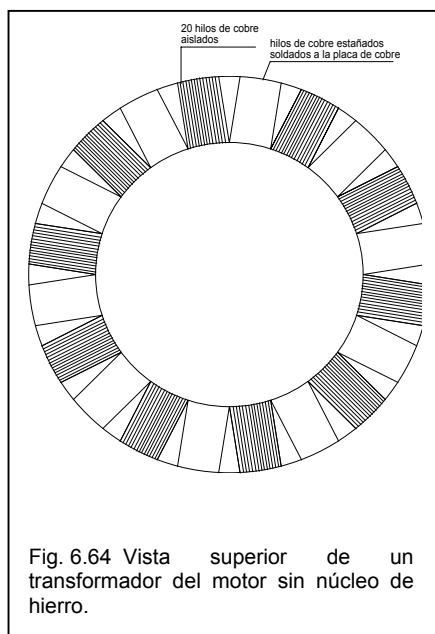
La figura 6.60 muestra la disposición de los elementos indicados y en la figura



6.61 se muestra una fotografía del mismo.

La figura 6.62 muestra los resultados obtenidos al caracterizar el motor de flujo axial con el nuevo sistema de medidas. Pueden observarse la evolución del campo del estator y el movimiento del rotor, que con poco par aplicado parecen mostrar un comportamiento síncrono del motor. La figura nos muestra la evolución del campo del estator y el rotor juntamente con el par aplicado. La diferencia entre ambos se mantiene prácticamente constante cuando el par aplicado es pequeño.

La figura 6.63 es una ampliación del par medido. Puede observarse la forma ondulada, y el paso por máximos y mínimos cada vez que el ángulo de deslizamiento sea múltiplo de 180 grados. Este comportamiento se corresponde con las previsiones teóricas y es el mismo que obtuvimos en la prueba estática, cuando comentábamos que un par máximo ocurre cuando el bloque de material superconductor pasa por un punto de máxima variación de flujo, o sea, por un cambio de polo.



6.4.3 Motor con transformador incorporado

En la configuración de autoelevitación, el campo magnético creado por la armadura del motor, es capaz de producir fuerzas axiales y radiales. Las primeras dan origen a la levitación y las segundas al par del motor^[Granados 4].

El motor puede trabajar en dos regímenes. En modo síncrono, donde el ángulo de par no puede exceder de cierto valor, y como motor de histéresis, cuando el ángulo de carga sobrepasa los 180 grados.

En este tipo de motor, la velocidad está limitada por las pérdidas en el hierro. Para evitar estas pérdidas es preciso usar armaduras sin hierro. El problema asociado a la ausencia de hierro es la gran densidad de corriente a usar para crear el campo magnético.

Para conseguir la corriente necesaria, hemos incluido en el diseño de la armadura, un transformador adaptador de impedancias cuyo primario se conectará a una fuente de alimentación estándar. En este caso el hierro actúa como núcleo del transformador, y al no incluir dientes, se puede usar chapas de menor espesor con la consiguiente disminución de las pérdidas de Foucault. La figura 6.64 muestra el esquema del transformador indicado y la figura 6.69 una fotografía del mismo.

En futuros diseños se puede sustituir por otros materiales magnéticos como ferritas, permitiendo funcionar el motor a mayor frecuencia, eliminado completamente el hierro del motor.

La armadura incorpora, por lo tanto, dos máquinas trabajando independientemente, un transformador de alta frecuencia y un motor.

Las características de los materiales son las siguientes:

- Núcleo magnético: láminas de “Lamerino”, de $\phi_{\text{externo}}=216\text{mm}$, $\phi_{\text{interno}}=142\text{mm}$ y altura=12mm

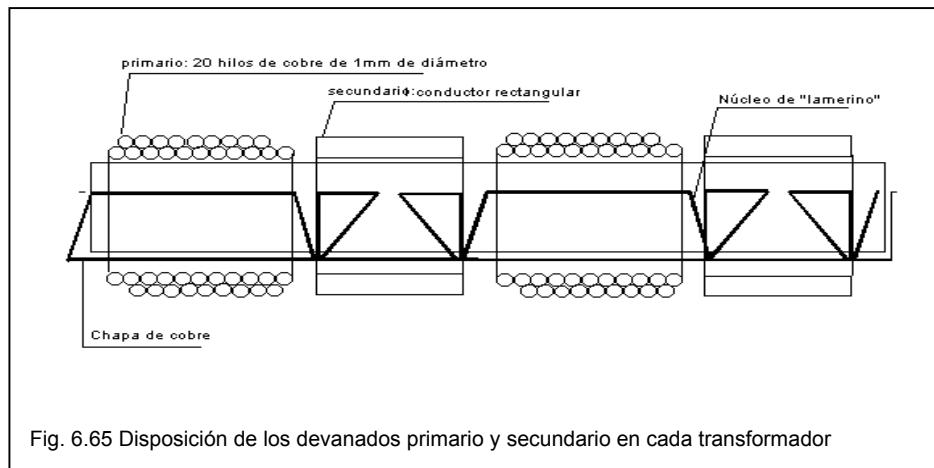
- Hilo esmaltado de 1mm de diámetro

- Plancha de cobre: 0,4mm de grueso

-Inductor primario: 20 barras de 20 espiras cada una

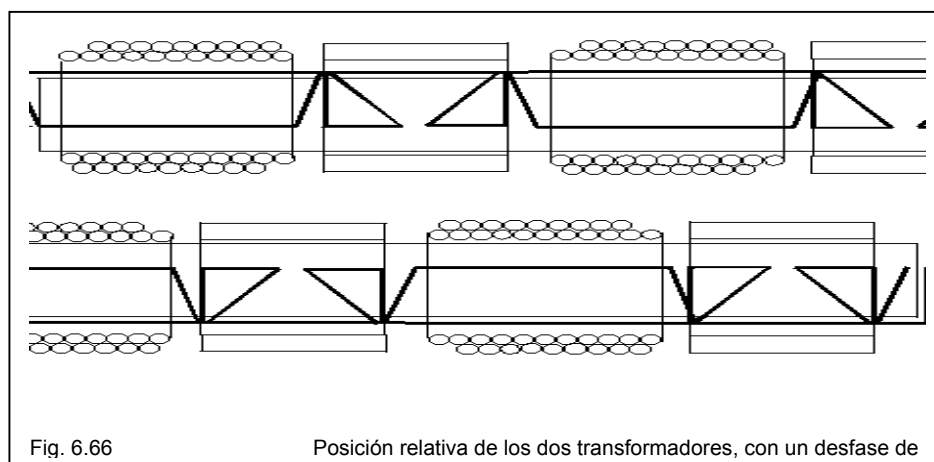
- Inductor secundario:20 barras de 17 espiras cada una estañadas entre si y soldadas a la plancha de cobre.

La figura 6.65 muestra la distribución de cada una de estos elementos como si el transformador toroidal se hubiera cortado por un punto y estirado hasta ponerlo plano. Para conseguir un campo magnético giratorio en el rotor se usan dos núcleos como el



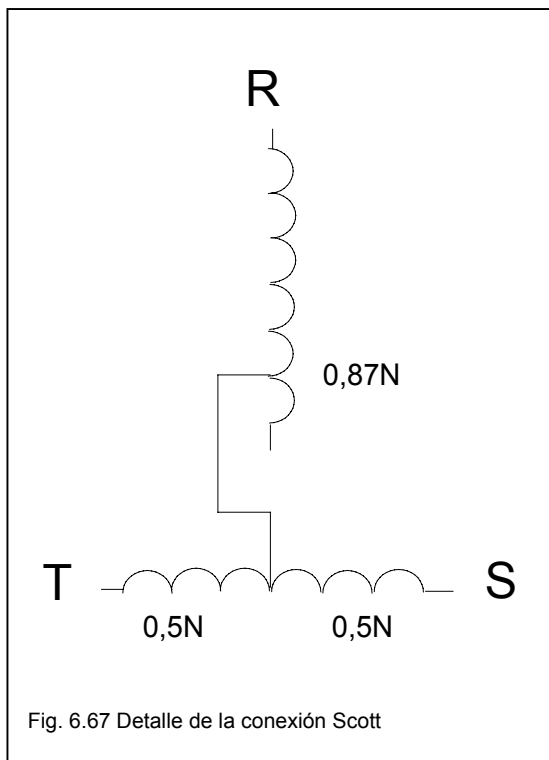
descrito y se sitúan uno frente al otro, con las planchas de cobre en la parte exterior y desplazados 90 grados eléctricos. La figura 6.66 muestra la posición relativa de ambos núcleos:

Como se ha indicado, el devanado primario es una bobina de 400 espiras (20



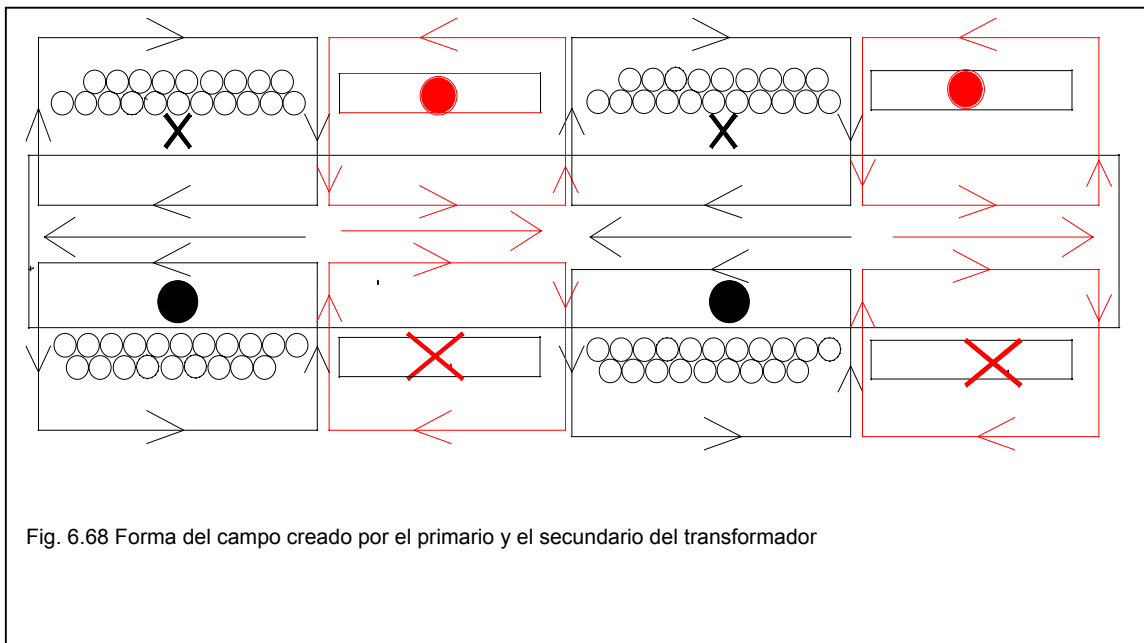
barras de 20 espiras cada una). Tenemos, por lo tanto, dos bobinas inductoras, una en cada núcleo. Para poder conectarlo a un sistema trifásico se ha realizado la conexión Scott, que esencialmente consiste en conectar dos bobinas, una de N espiras con toma intermedia y la otra de $0,87 \cdot N$ espiras. Se conectan entre sí como se muestra en la figura adjunta.

El sistema está previsto para funcionar con un sistema bifásico de corrientes



desfasadas 90 grados eléctricos usando el total del bobinado y con un sistema trifásico de corrientes desfasadas 120 grados eléctricos con la conexión Scott (figura 6.67).

La figura 6.68 muestra en color negro el campo magnético creado por el primario cuando es atravesado por una corriente. En el secundario en cortocircuito se generan corrientes como las indicadas en rojo. También se muestra el campo magnético generado por las mismas. Pueden verse las zonas donde sale (Norte) y donde entra (Sur) el campo magnético. Este será el flujo que interactuará con el superconductor y hará



girar y levitar el motor.

El flujo “principal” pasa por el núcleo del transformador toroidal y por lo tanto, el flujo que hace mover el motor es la parte del mismo que se cierra por el exterior del mismo, o sea, un flujo de fugas.

El conjunto indicado ha sido usado con un nuevo rotor con bloques de superconductor. En este caso se han usado 30 bloques de superconductor, cortado para cubrir toda la corona circular del rotor. Por lo tanto hay continuidad de superconductor y el rotor reproducirá el mismo número de polos que el estator.

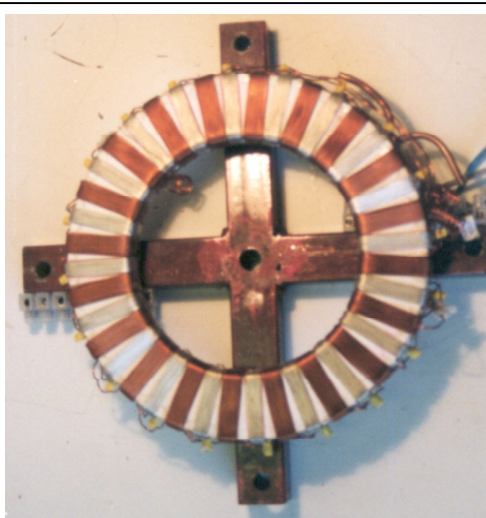


Fig. 6.69 Fotografía de un transformador.



Fig 6.70 Fotografía del rotor construido para el motor de la figura 6.68

Las figura 6.69 muestra uno de los transformadores usados y la figura 6.70 el rotor con superconductores con el que se ha probado. Puede observarse la disposición de los devanados con el secundario en cortocircuito y la disposición de los bloques de superconductor abarcando toda la superficie exterior del rotor. La figura 6.71 muestra el conjunto montado para su caracterización.

Representa un paso adelante en el camino del motor sin hierro. La principal función es aportar ideas base que pueden ser mejoradas en siguientes prototipos. Los resultados de la caracterización se muestran resumidos en la figura 6.72. En ella puede

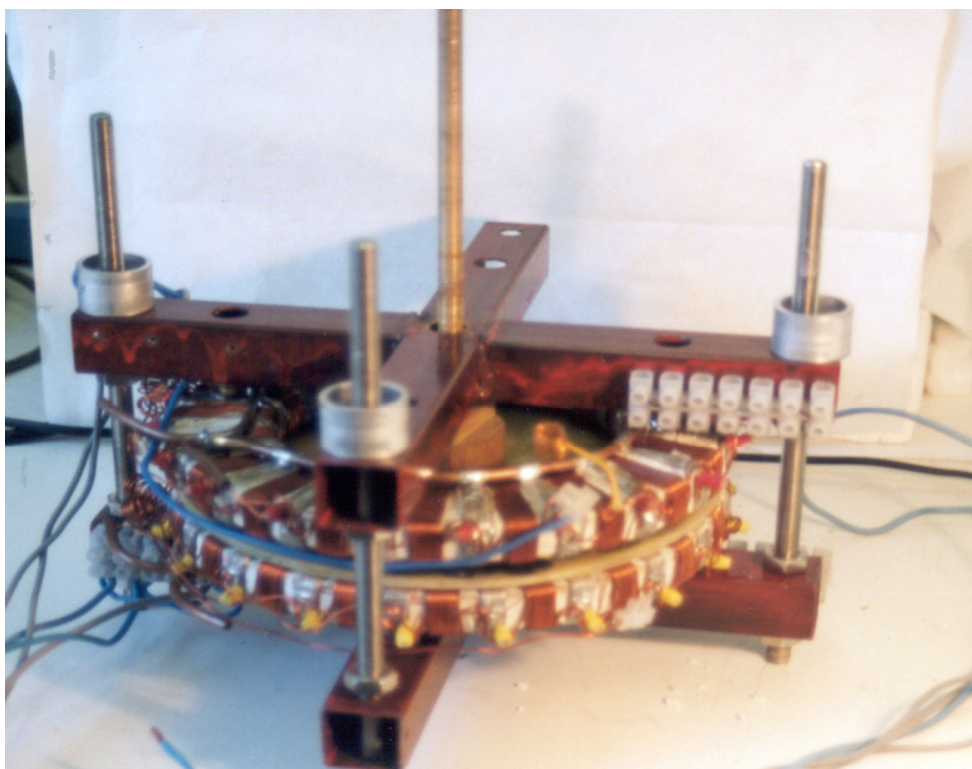
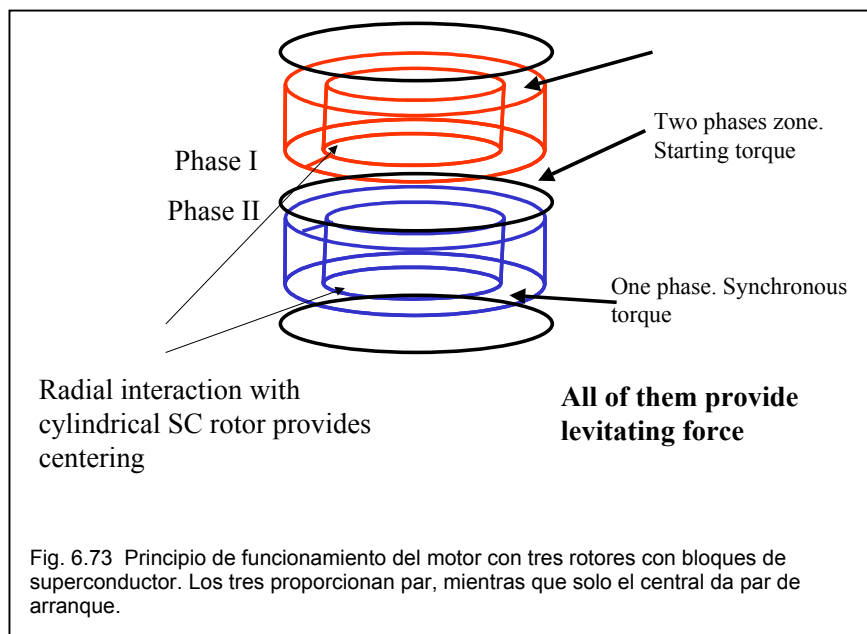
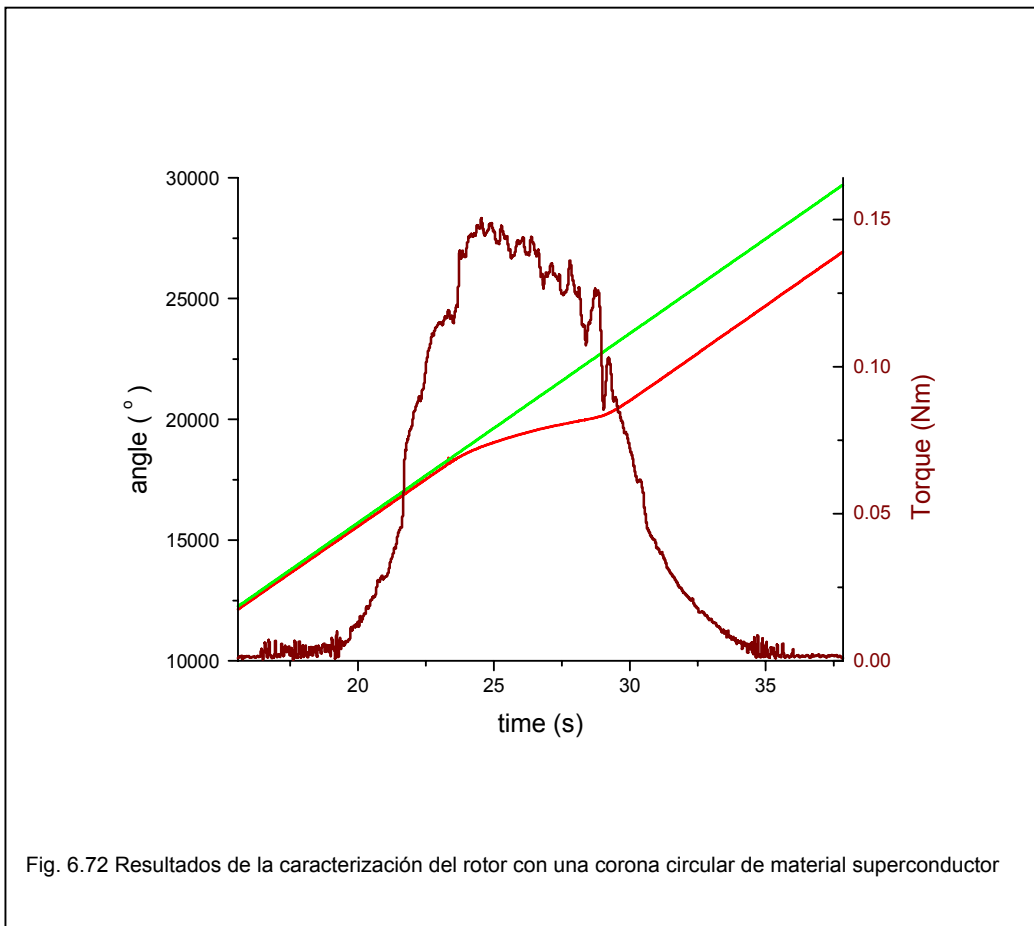


Fig. 6.71 Fotografía del motor montado para su caracterización

observarse el funcionamiento síncrono del rotor para pares bajos y la continuidad en el par generado. En este caso no se producen las oscilaciones de par mostradas en la figura 6.62 puesto que en aquel caso el rotor estaba formado por 8 bloques de material superconductor, mientras que ahora se tiene una distribución continua del mismo. Con ello se consigue una generación de par constante.



Una posible variación para este motor se muestra en la figura 6.73, donde se han adherido al eje tres rotores como el mostrado en la figura 6.69

En este caso, con los transformadores conectados como en el caso anterior, se produce un campo giratorio en el centro, mientras que en la parte superior y inferior se tiene un campo variable, pero no giratorio. El campo central produce par de arranque, mientras que en los dos extremos sólo se produce par en funcionamiento síncrono. Los tres producen fuerzas de centrado.

6.4.4 Conclusiones:

-Se ha simulado y ensayado el motor en régimen estático. Los resultados de ambas pruebas indican su validación mutua y corroboran el análisis teórico previo.

-Se ha analizado el comportamiento del motor y se han aportado ideas para futuros desarrollos.

-Se ha ensayado el motor en régimen y dinámico y se han obtenido resultados previstos teóricamente.

-Se ha comprobado que, para distribuciones discretas de material superconductor, el par motor es variable y pasa por máximos y mínimos cada vez que el ángulo de deslizamiento gira 180 grados .

-Para distribuciones continuas de material superconductor, el par máximo es constante.

-El motor empieza comportándose como síncrono hasta valores del par que dependen de la calidad y la geometría del material superconductor, así como del campo generado por la máquina,

-Al incrementarse el par, el funcionamiento deja de ser síncrono y pasa a ser de histéresis. Para los materiales de que se dispone actualmente, éste es el modo que proporciona mayor potencia.

-En todas las pruebas realizadas, el rotor levitó correctamente.

-Se ha introducido una variante en el diseño del estator que representa un acercamiento al motor sin núcleo de hierro.