

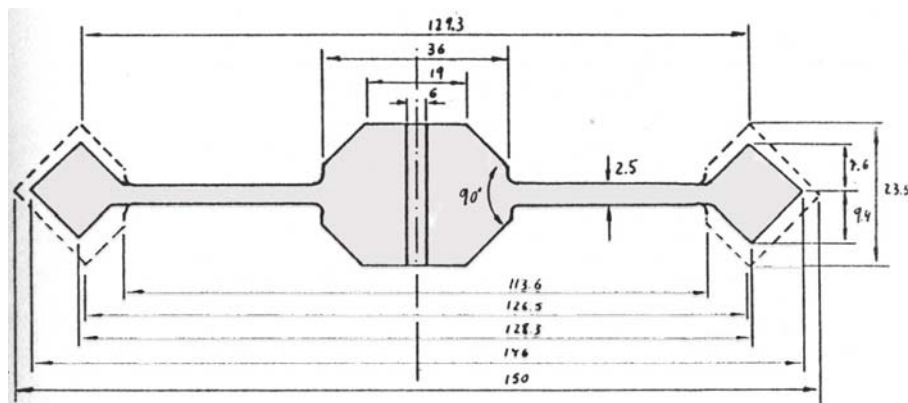
5.-HIPÓTESIS Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO P-1

5.1.- ANTECEDENTES PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO P-1

Se toman de base los resultados de los prototipos Bosch-3 [8] y Fenix [10].

Bosch-3 es un prototipo con un rotor plano, en forma de disco, de Aluminio que demuestra la levitación estable en 5 grados de libertad. En él se definen dos sistemas de magnetización imbricados en el mismo conjunto, el sistema tractor y el estabilizador.

El disco de aluminio tiene unas protuberancias tanto en la periferia como en la zona central, que actúan a modo de cabezas de bobina del rotor. Así permiten el retorno de las corrientes inducidas por el estator bilateral de flujo axial, haciendo trabajar toda la masa rotórica a densidad de corriente constante. Es decir, el campo magnético generado por los dos semiestatores que envuelven el rotor, es perpendicular al entrehierro que contiene el rotor de aluminio y paralelo al eje de simetría del conjunto.



Las aportaciones del prototipo Bosch-3 consisten en:

- 1.- La conexión en paralelo de las bobinas inductoras de las diferentes ramas de los semiestatores, permite un desequilibrio de corrientes, que reacciona a las variaciones de posición rotórica.
- 2.- El circuito estabilizador se magnetiza con la FMM de las cabezas de bobina estatóricas y rotóricas. Colabora muy activamente en la propia sustentación rotórica al desfazar 90° en retraso el campo resultante de las cabezas de bobina.
- 3.- El devanado en jaula de sombra del estabilizador proporciona la realimentación negativa de la posición y parte de la disipación necesaria para garantizar la estabilidad del sistema.
- 4.- El prototipo funciona satisfactoriamente a pesar de que su parte tractora es muy poco eficaz y magnéticamente mediocre. Es prioritario mejorar esta parte en trabajos posteriores antes de abordar el estudio a fondo de la levitación y su estabilización.
- 5.- El núcleo magnético del estabilizador puede ser de hierro en las fases más primitivas de los diseños, en lugar de utilizar plancha magnética. Los pulsos de corriente pueden ser de corta duración, el flujo magnético no es elevado y la simplificación constructiva es notable. Esto es extrapolable en primera instancia a las partes tractoras de otros prototipos con formas complejas.

El Fénix [10] es un prototipo bastante primitivo, posterior al Bosch-3, que permite definir con bastante exactitud la corriente alcanzable en bobinas de cobre refrigeradas con agua por su interior.

Con posterioridad a la lectura de la tesis doctoral de R. Bosch, se construyen los prototipos Bosch-4 y Bosch-5, ambos con el rotor sobre cojinetes para poder frenar el rotor y estudiar el comportamiento electromagnético. Ambos prototipos estaban inéditos y sin ensayar exhaustivamente al principio de este trabajo.

El prototipo Bosch-4 permite definir la conexión Dahlander de sus bobinas, que posibilita el cambio de número de polos. Es de interés en estudios de variación de frecuencia para acumuladores cinéticos de energía, por ejemplo, aunque están fuera del alcance del presente estudio.

El prototipo Bosch-5 mejora magnéticamente a su antecesor al utilizar estatores comerciales empleados en los motores Mavilor MA-55 dotándolos de una carcasa de aluminio. Sin repasar las prestaciones magnéticas, se asume que es el mejor de todos y se ensaya con rotor de aluminio con los criterios de diseño del Bosch-3, como se ha visto en el apartado 4.5 del presente texto.

La idea inicial del prototipo P-1 es un rotor lo más similar *física y magnéticamente* (en cuanto a número de polos) al Bosch-5, utilizando el tipo de conductores del Fénix, núcleo macizo de hierro, con un conductor por ranura y fase. Así se pretende disminuir las inductancias producidas por el flujo de dispersión en las ranuras.

Se construye todo lo posible en cobre para después intentar diseñar y montar los estabilizadores y jaulas de sombra al igual que en el Bosch-3, utilizando como fuente de corriente el TS, tal y como se hizo en su día con el Fénix.

5.2.- DEFINICIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO P-1

La idea inicial era la de construir un prototipo que reuniera las conclusiones positivas de los trabajos anteriores del equipo de investigación. Para ello se intenta que las dimensiones físicas sean lo mas parecidas a las del Bosch-5 y ver si se puede soportar un rotor conductor idéntico o similar al definido en el capítulo 4 (dibujo 4.2)

El prototipo será una máquina de inducción de flujo axial con un rotor conductor de aluminio. Se desea obtener una utilidad de la cabeza de bobina. La intensidad que circule por ella debería tener un efecto equilibrador sobre el rotor.

5.2.1.- CIRCUITO ELÉCTRICO

En los estátores se inyectará la máxima densidad de corriente admisible por los conductores, llegando a refrigerar directamente con agua si fuese preciso. La voluntad de obtener densidades de corriente muy elevadas no es un capricho, sino la necesidad de obtener un efecto magnético importante. La levitación por autoestabilización en el rotor se consigue por un lado, debido a los conductores del motor, y por otro, el efecto de la cabeza de bobina. Si la simetría del conjunto, una vez construido, es aceptable, se podrían observar efectos de levitación del rotor.

Para conseguir la máxima densidad de corriente, se toma la decisión de colocar un único conductor por polo y por fase (en cada ranura habrá solo un conductor). La sección debe ser importante, así la resistencia disminuye respecto a la que tenían las bobinas de los estatores del Bosch-5. Esto permite reducir la profundidad de las ranuras respecto al Bosch-5.

Se escoge la refrigeración directa del cobre por agua circulante a presión por los conductos tubulares como en Fénix [10]. El aislamiento eléctrico se realiza en la periferia.

Las intensidades de corriente que pasarán por los conductores de cada ranura se establecerán sobre un nominal de 800 A, ya que se toma el mismo tubo de cobre que en el Fénix, y ese era su valor nominal. Dicho valor puede incrementarse porque la longitud de las bobinas es mucho menor que en caso del Fénix, y ello permite tanto disminuir la resistencia efectiva de las espiras como mejorar el circuito de refrigeración por agua.

El conductor escogido para las espiras es cobre tubular hueco de $\Phi_e = 5.0$ mm y $\Phi_i = 3.0$ mm. Sin tener en cuenta los efectos peliculares, la superficie útil de conducción es:

$$S_U = \pi \cdot \left(\frac{\Phi_e^2}{4} - \frac{\Phi_i^2}{4} \right) = 12.57 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 12.57 \text{ mm}^2$$

La densidad de corriente en los conductores citados será de 63.7 A/mm². La geometría tubular atenúa el efecto pelicular, pero podrían aparecer asimetrías en la distribución de corriente debidas al efecto de proximidad. Esta comprobación es una de las razones para construir el prototipo en el que se analizarán tanto las problemáticas constructivas como toda esta serie de detalles eléctricos

Los estátores MA-55 que forman el prototipo Bosch-5 tienen 25 ranuras, cada uno, para configurar 4 pares de polos. Una ranura queda vacía de devanado porque originariamente el motor presenta un rotor de ocho imanes permanentes y así se disminuye el cosido magnético entre los imanes del rotor y las ranuras del estator. Al ser un motor trifásico, las bobinas activas por cada semiestátor son 8*3=24.

Las bobinas de los estatores del MA-55 se utilizaron porque están bastante optimizadas magnéticamente, aunque no para rotor de aluminio, y por la disponibilidad en el laboratorio de varios estatores gracias a la colaboración de Mavilor, que cedió, sin cargo, material estándar.

En nuestro caso, uno de los requisitos más importantes es la simetría y por ello el prototipo a realizar debería tener 24 ranuras. Tantas como conductores activos. Se recuerda que el rotor será un disco de aluminio, sin ningún elemento de hierro. Así no debemos preocuparnos de problemas de cosido magnético.

El estátor Mavilor MA-55 está bobinado en cruz de malta, lo que origina una cabeza de bobina, inadecuada para efectos de levitación, ya que cubre la periferia a tramos intermitentes. Ésto queda amortiguado al ser el bobinado de doble capa.

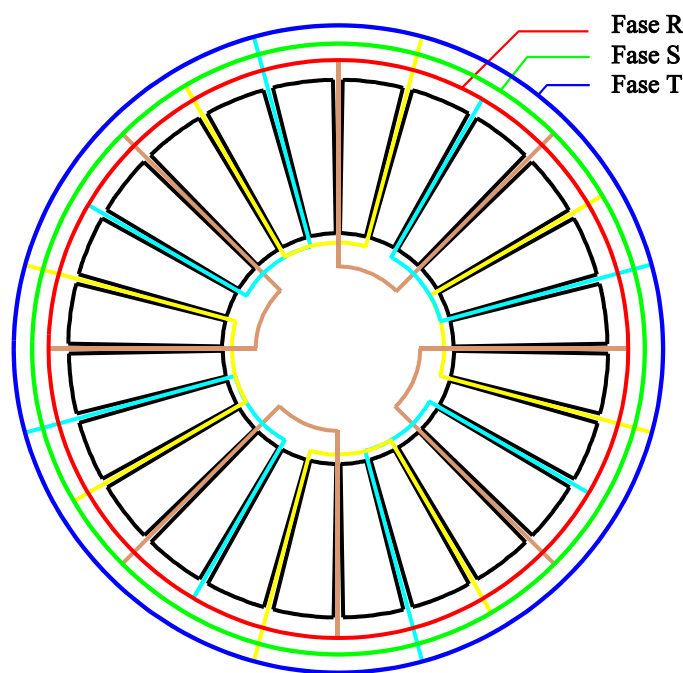


Figura 5.1: Esquema de las espiras que conformarán el estator

Para conseguir la máxima simetría y uniformidad, se plantea una cabeza de bobina por la periferia que sea el distribuidor de agua y corriente. Recuérdese que las bobinas pasan a ser de una espira y elevada corriente.

La conexión en triángulo parece ser mas adecuada para aplicaciones de levitación que la conexión en estrella, ya que permite mejor la circulación de corrientes de desequilibrio por fase originadas por la variación de posición rotórica.

Así tendremos, por estator, doce espiras independientes con dos caras activas, cada una magnetizando un par de polos. Parten de una fase en la periferia y llegan a la siguiente fase, habiendo cambiado de ranura en el extremo interior del paquete magnético (4 pares de polos * 3 fases = 12 espiras). La cabeza de bobina así formada es especialmente adecuada para soportar grandes intensidades, ya que se refrigera independientemente por cada bobina. No hay que olvidar que es el punto más difícil de refrigerar en este tipo de motores, ya que ahí se suele concentrar el calor.

Interesa construir esta parte interior con mucho cuidado ya que es genuina de este trabajo y permitirá hacer estudios sobre las cabezas de bobina interiores. Estos estudios no se pudieron hacer con anterioridad, con los prototipos Bosch por ejemplo, debido a las dimensiones de los prototipos, con un diámetro interior demasiado pequeño.

Lo anterior junto a la rigidez de los tubos tomados como conductores, aconseja usar técnicas de taller mecánico que son más precisas que las habituales de bobinado.

Se plantea el problema de la distribución de las espiras de los estatores. Para tener una idea bastante real de lo que se supone, se hace un molde de escayola con la forma estimada del paquete magnético en el que se pueden alojar conductores con la forma de las espiras. Nótese que las dificultades constructivas son importantes dada la rigidez mecánica de los conductores escogidos.

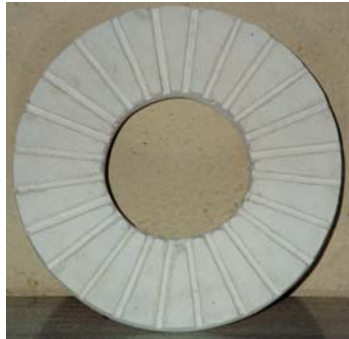


Foto 12: Molde de yeso que se utiliza para realizar la primera prueba de distribución de espiras.

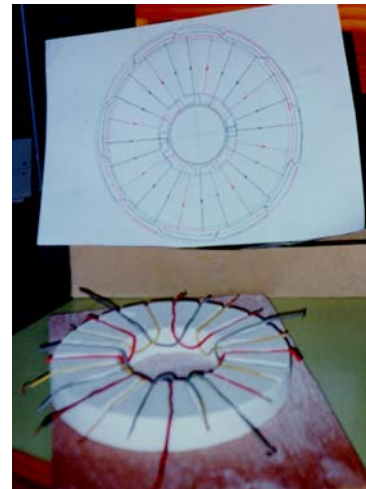
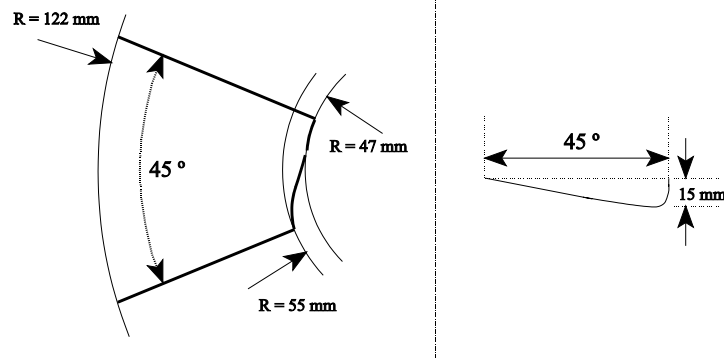


Foto 13: Esquema teórico de un semiestátor.

El proceso de construcción de las espiras se realizó en los pasos siguientes:

- 1.- Definición teórica: Radios de curvatura, longitud de los lados, definición en tres dimensiones de las espiras necesarias para formar el conjunto.
Los valores de los radios internos (55 mm y 47 mm) así como el radio externo (122 mm) vienen determinados por las dimensiones físicas de los estatores del motor Mavilor MA-55, ya que se pretende que el prototipo a realizar sea lo más parecido posible, físicamente y magnéticamente hablando, a éste último.
No hay, a priori, motivos de peso para pensar que estas dimensiones sean infalibles a la hora de obtener una máquina optimizada. Sólo se pretende poder realizar una comparación con el prototipo Bosch-5.



2.- Construcción de un molde en el centro CIM para garantizar la precisión dimensional entre las diferentes espiras. Mediante técnicas de CAD-CAM, se hace un negativo de las espiras sobre un molde de aluminio. Es necesario un negativo diferente para cada estator, ya que uno ha de ser la imagen óptica del otro:



Foto 14: negativo de las espiras de cada semiestator sobre aluminio. El mecanizado se realizó en el Centre CIM de la UPC.

3.- Conformado del tubo de cobre con una maza de plástico sobre cada molde.

4.- Soldadura de las doce bobinas por estator a las cabezas de bobina, para formar el conjunto de devanado. Esta última operación conllevó dificultades constructivas demasiado elevadas que coartarán las posteriores posibilidades funcionales del prototipo como se verá.

5.2.2.- CIRCUITO HIDRÁULICO

El circuito hidráulico está formado por los propios conductores eléctricos. A continuación obtendremos el caudal necesario para poder refrigerar los conductores:

El punto más crítico en cuanto a la refrigeración son los conductores que forman las espiras, conductores tubulares de 5.0 y 3.0 mm de diámetro externo e interno respectivamente.

Por cada una de las espiras circulará una intensidad de corriente de unos 800 A y hay que garantizar que la disipación de calor será absorbida por el agua que circulará por los conductores.

La longitud de una espira es de unos 220 mm. Como la sección efectiva de la espira es de 12.6 mm², la resistencia teórica es:

$$R = \rho_{Cu} \frac{l}{S} = 1.7 \cdot 10^{88} \cdot \frac{0.22}{12.6 \cdot 10^{86}} = 0.3 \text{ m}\Omega$$

La potencia disipada por efecto Joule en cada espira cuando pasen 800 A será:

$$P = R \cdot I^2 = 200 \text{ W}$$

Hay que tener en cuenta que esa potencia disipada calienta el propio conductor y aumenta su temperatura, aumentando paralelamente la resistencia de la espira, produciéndose mayores pérdidas por efecto Joule.

Se supone que la temperatura máxima a la que podrán llegar los conductores y continuar refrigerándose con agua es de 95 °C.

La resistencia de la espira a esta temperatura es

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

$$R(95) = 0.3 \cdot 10^{83} \cdot (1 + 3.9 \cdot 10^{83} \cdot (95 - 20))$$

$$R(95) = 0.39 \text{ m}\Omega$$

En estas condiciones límite, la potencia disipada sería P = 250 W

El equilibrio entre las pérdidas de calor del conductor y el calor absorbido por el agua será:

$$R \cdot I^2 = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$$

tomando c= 4180 J/(kg °C) y Δt = 75 °C, se halla \dot{m} :

$$\dot{m} = 797 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s} = 2.87 \text{ l/h (por espira)}$$

Si hay dos semiestátors y cada uno de ellos tiene 12 espiras, el caudal total es de 68.8 l/h, caudal más que asumible, ya que a pesar del pequeño diámetro del conductor, no se generan sobrepresiones que puedan dañar el prototipo.

Se han supuesto condiciones estacionarias, soldaduras perfectas y que los conductores no disminuyen su sección de paso interior al ser moldeadas las espiras. Estas suposiciones a posteriori se verifican que son demasiado ideales, o audaces, y deben revisarse con más detalle.

La ventaja de tener tramos tan cortos es que, en caso de sobrecarga, se genera vapor de agua en el interior de los conductores. Si la bomba es eficaz, el vapor genera una pequeña sobrepresión que no origina problemas al ser cortos los tramos y estar en paralelo.

Este cambio de fase, termodinámicamente es muy eficaz, ya que absorbe una gran cantidad de calor en forma de calor latente de vaporización. Esto es una reserva de capacidad refrigeradora muy importante, siempre útil en el ensayo de prototipos.

5.2.3.- FINALIZACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Una vez construidas las espiras, se fabrica un molde de poliuretano donde colocarlas y comprobar así que son adecuadas para la construcción del semiestátor (observar las fotografías 15 y 16).

El soporte de poliuretano también sirve de soporte para realizar las soldaduras entre conductores y su fijación mediante fibra de vidrio y poliéster entre sí.



Foto 15: Molde de poliuretano para controlar la segura disposición de las espiras.

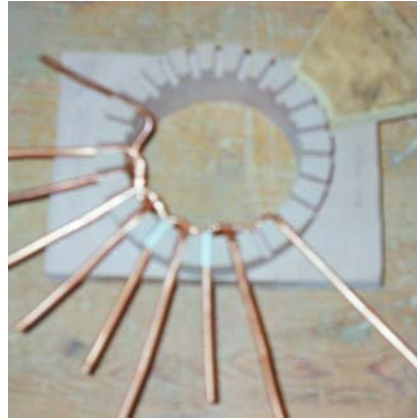


Foto 16: Prueba de colocación de las espiras.

El paso siguiente a las espiras es la cabeza de bobina exterior, parte muy delicada de los estátores, ya que se pretende aprovechar el conductor para observar efectos de repulsión o autocentrado.

Las cabezas de bobina externa serían tres conductores tubulares de diámetro superior al de las espiras, ya que por éstas ha de pasar la suma de las intensidades de corriente que hay en cada espira. Actúan también de colectores hidráulicos del agua de refrigeración de las espiras.

Ya se ha visto que, para conseguir la autoelevitación rotórica, es necesario que puedan desequilibrarse las corrientes del estátor, entre los semiestátores e incluso entre los polos. Esto sólo puede conseguirse conectando las diferentes espiras en paralelo a través de la cabeza de bobina externa.

Es necesaria una tolerancia dimensional tan estricta como en el caso de la cabeza de bobina interna. Recuérdese del apartado 4.5 que variaciones de 0.1 mm en la posición rotórica originaban variaciones del orden del 10% en parámetros eléctricos como son tensiones y corrientes inducidas.

Se intenta un diseño de cabeza de bobina útil para autoelevar que resultará inviable por su complejidad constructiva y de cálculo, al acumular una serie exagerada de condicionantes de diseño.

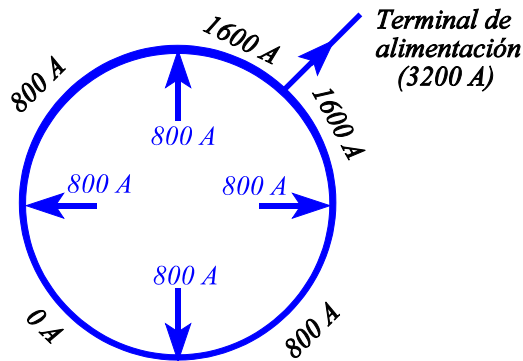
La cabeza de bobina o incluso todo el bobinado ha de construirse en adelante empleando técnicas de mecanizado con control numérico, o bien de inyección de aluminio fundido.

5.2.3.1.- Condicionantes eléctricos

Para igualar la corriente que retorna por la cabeza de bobina, en ambos sentidos y de diferentes tubos conductores, ésta ha de ser circular, cerrada sobre si misma e independiente para cada fase.

Las soldaduras de cada tubo conductor a la cabeza de bobina externa, han de ser lo más buenas e iguales posibles, para que no supongan un impedancia serie con la bobina que conectan. Ello supondría un reparto inhomogéneo de las corrientes de excitación estática de cada fase. Se buscan estas inhomogeneidades, pero causadas por la posición rotórica, no debidas a la soldadura. La solución adoptada es la de soldar los tubos de cobre con estaño, para permitir el aislamiento entre barras con la fibra de vidrio. La experimentación posterior evidencia que no es adecuada, ya que algunos tubos rompieron la soldadura llegando a originar fugas de agua.

La sección necesaria vendrá dada por la estructura magnética de cuatro pares de polos que configura el reparto de corrientes como indica la figura 5.2, deducida de la figura 5.1.



Dibujo 5.2: Distribución de corrientes en una de las cabezas de bobina.

La sección de la cabeza de bobina ha de ser el doble que la de las barras de las bobinas. El terminal ha de ser cuatro veces superior que la sección de las barras. Con esta estructura, son necesarios seis anillos colectores por semiestátor, tres para las entradas y otros tres para las salidas.

5.2.3.2.- Condicionantes magnéticos

Los seis anillos colectores citados, deben recoger la corriente de las bobinas, según la secuencia de éstas y sobre un plano paralelo al rotor y lo más cercano posible a él. Como las tres fases están imbricadas, la única solución posible es retorcer la cabeza de bobina en hélice. Ésta debería estar formada por una especie de cuerda de seis tubos, aislados entre si que forman las tres entradas y las tres salidas, que se retuercen dando cuatro vueltas sobre el eje de la cuerda. La cuerda se cierra sobre si misma empalmando extremos homólogos a los terminales de salida, para formar los seis círculos que forman las cabezas de bobina.

Aunque se intentó, la estructura en espiral necesaria es demasiado compleja de construir y se abandonó. Esto replantea la necesidad del sistema trifásico, (esta cabeza de bobina se simplificaría si fuese bifásico).

En la figura 5.2 se ve una asimetría de alimentación originada por el hecho de tener un terminal de alimentación externo y trabajar con una sola espira por ranura y fase. Este efecto por si solo aborta la posibilidad de autolevitación, como se comprobó en la parte experimental, por esto ni se intentó construir un rotor específico para este prototipo.

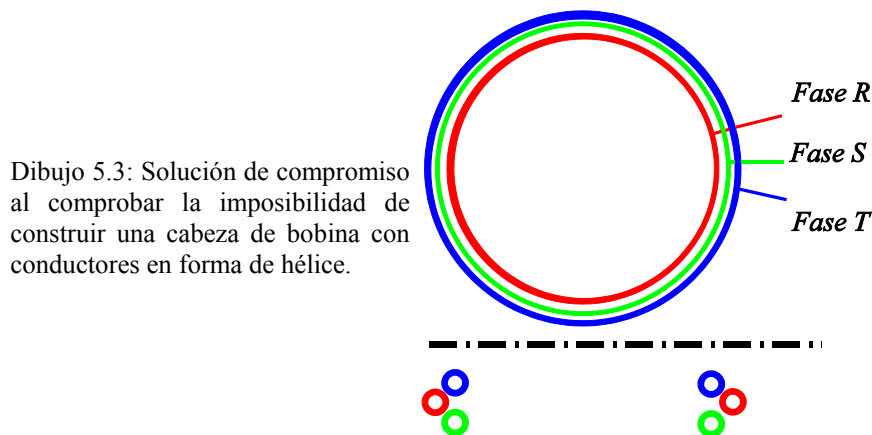
En este punto se replantea el hecho de disponer de terminales de alimentación, se simplificaría mucho si se pudieran inducir estas corrientes con núcleos toroidales, por ejemplo, además de estudiar nuevas geometrías.

No obstante lo anterior, se pudieron contrastar muchos detalles constructivos buenos por otros aspectos, que justificaban sobradamente dicha construcción:

Cada uno de los semiinductores tiene una distribución diferente de los terminales, uno los tiene concentrados en el arco de un polo -ver foto 20-, el otro tiene los tres terminales distribuidos en el arco de tres polos, esto ha permitido estudiar la casuística asociada a este tipo de bornes en dos configuraciones diferentes.

Como solución de compromiso a los anteriores condicionantes y debido al hecho de que ha de ir conectado en triángulo, se adopta la solución de tres anillos que formen el triángulo y paralelos (ver dibujo 5.3). Con esta configuración se renuncia a ver los fenómenos magnéticos de la cabeza de bobina externa, aunque se intentará observar los de la cabeza de bobina interna y todos los condicionantes dieléctricos, mecánicos, térmicos e hidráulicos.

El estator está formado por doce espiras, con dos lados activos, por las que pasarán 800 A, por lo tanto por cada uno de los conductores de la cabeza de bobina pasarán del orden de los 3200 A. Los diámetros de los conductores de la cabeza de bobina serán de $\phi_e = 22$ mm y $\phi_i = 18$ mm



En estas condiciones se inicia el proceso de construcción de los semiestátors:

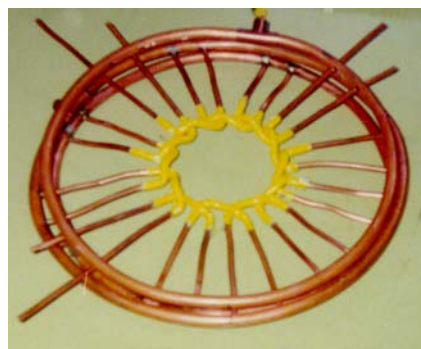


Foto 17: Semiéstator 1 a punto para la soldadura de las espiras.

En la foto 17 se observa que las espiras están aisladas entre sí en la zona interior del estator. Esta zona es la única en la que las espiras pueden entrar en contacto, y de hecho, una vez construido, el contacto mecánico era muy fuerte.

Para evitar cortocircuitos, se aíslan las espiras entre sí, aunque el mayor cuidado no es la tensión eléctrica, la tensión de trabajo es de pocos voltios (<5 V), sino el calentamiento que sufrirían los conductores al pasar por ellos corrientes muy elevadas.



Foto 18: Semiestátor con aislantes de fibra de vidrio y silicona.

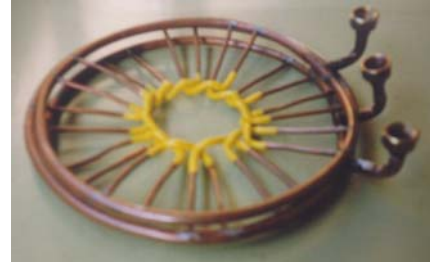
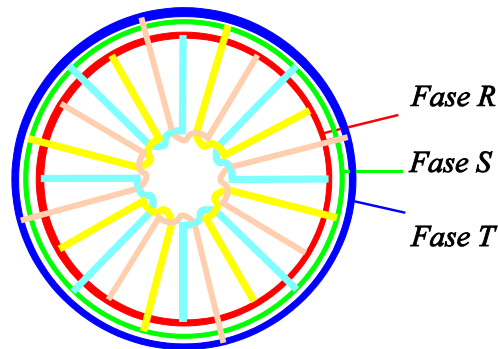


Foto 19: Semiestátor en el que se observa la entrada hidráulico - eléctrica común.

El esquema del semiestátor una vez las espiras estén soldadas es el siguiente:



Dibujo 5.4: Esquema de fases en el semiestátor

Antes de iniciar el proceso de soldadura, había que escoger la posición en la que se colocarían las entradas eléctricas e hidráulicas. Por deformación mental (entiéndase profesional) se optó dar una entrada de agua por fase que coincidiera con la entrada eléctrica. Esta elección dio lugar a problemas que serán comentados en apartados posteriores.

5.2.3.3.- Condicionantes dieléctricos

En trabajos anteriores [10], se vio la ventaja de trabajar con fibra de vidrio y poliéster, por su excelente comportamiento ante sobrecargas e incluso accidentes térmicos. El calor de soldadura que este prototipo ha de soportar, exigirá mas prestaciones. En este prototipo se ha adoptado la forma de tubo trenzado de fibra de vidrio que es una solución excelente. El tubo evita el encintado de las zonas mas críticas, minimizando así el espesor del dieléctrico. También se ha empleado el tubo de fibra de vidrio impregnado en silicona (ver fotos 17 a 20, identificable por su color amarillo).

Además de la simplificación de aplicación y prestaciones térmicas y dieléctricas, permite absorber las dilataciones de las barras en la zona de la cabeza de bobina interna. Resiste la soldadura de estaño, pero no la de acero plata, que exige el uso de soplete y es demasiado crítica en una estructura tan compleja.

5.2.3.4.- Condicionantes mecánicos

Unos son de tipo geométrico, como la enorme dificultad de mecanizado y soldadura de las espiras a la cabeza de bobina externa, de hecho, algunas espiras tenían localizado el orificio de soldadura en zonas prácticamente inaccesibles.

La fijación entre ambos semiestatores no se llega a realizar, y será motivo de una tesis doctoral, actualmente en marcha, (está estudiando el comportamiento electromecánico del conjunto como generador, dotado de un rotor de imanes permanentes de SmCo con 8 polos).

La colocación de las espiras al núcleo magnético se realiza con poliéster, y resulta suficiente. Este sistema es especialmente adecuado para cerrar las grietas que aparecen durante la inserción del bobinado en el núcleo magnético, dada la rudeza del método empleado.

No se ha podido mantener el plano de bobinas paralelo al rotor. Cada fase toma planos diferentes condicionados por el anillo de la cabeza de bobina externa. Esta diferencia es superior al grueso del tubo de bobina. El efecto se podrá compensar en la zona de la cabeza de bobina interior que se dotará de un núcleo de hierro macizo y ranurado, con un diámetro exterior de menos de la mitad de lo previsto inicialmente, y que reduce la superficie útil del entrehierro a la quinta parte del prototipo de referencia B-5.

Así se intenta observar efectos de rotación y levitación en esta zona. Los efectos debidos a las dilataciones de soldadura son absorbidos por los anclajes en su conjunto, pero no entre soldaduras vecinas u opuestas. Estos esfuerzos han dificultado enormemente la soldadura y han afectado muy negativamente en la calidad del resultado final. Hay que prever zonas flexibles para las dilataciones o no soldar, con una solución como la inyección de aluminio, para ello habría que simplificar drásticamente la geometría.

5.2.3.5.- Condicionantes térmicos

Los aislantes condicionarán la temperatura de soldaduras, ya se ha comentado que se adopta la solución de soldar con estaño. Esta soldadura necesita grandes superficies de contacto, entre las dos partes de cobre a soldar. El procedimiento de mecanizado de los agujeros en la cabeza de bobina exterior, no permite estas grandes superficies (los orificios se realizaron con broca).

El diseño de la unión de cada bobina a su correspondiente cabeza de bobina, además de tener poca superficie de soldadura, no descarga los esfuerzos mecánicos debidos a la dilatación de las bobinas en el trabajo normal del prototipo.

Lo anterior supone una exigencia excesiva de cada soldadura. Al circular la corriente de 800 A, se acaba incrementando su resistencia eléctrica, y por lo tanto su disipación por efecto Joule, que ha sido la principal fuente de problemas durante los ensayos.

Para evitar que los tubos de las cabezas de bobina se abrieran durante la soldadura de las espiras, se cerraron con una T, que se utilizó como terminal de conexión eléctrica e hidráulica. La T sí que fue soldada con acero plata, que tiene un punto de fusión notablemente superior al del estaño. El escalonamiento de puntos de fusión en los materiales de soldadura, es un buen sistema para la construcción de los prototipos futuros, siempre que la geometría permita su aplicación.

La soldadura de las bobinas contiguas a la cabeza de bobina externa se dificultó en extremo, al usar estaño. Generalmente quedaban afectadas las soldaduras vecinas, aunque se protegieran refrigerándolas con trozos

de fieltro empapados en agua.

Las bobinas trabajan muy bien con la densidad de corriente propuesta. Se trataba de ver las obstrucciones internas que se producirían en las deformaciones de la cabeza de bobina interna. Se vio que la deformación es excesiva y acaba obstruyéndose.

Del análisis de la sección de cobre de la cabeza de bobina estática externa, se puede apreciar que es claramente insuficiente. Se trabaja a densidades de corriente superiores a las de la bobina. No se ha considerado crítico debido a la gran cantidad de agua circulante por las cabezas de bobina diseñadas con doble terminal cada una.

Las pruebas se han realizado en todo momento en régimen adiabático, jugando siempre con la inercia térmica del sistema.

La principal razón de no poner la sección suficiente, ha sido geométrica. El diámetro de tubo necesario deformaría todavía más la parte activa de las bobinas. Incluso con el diámetro utilizado ya se provoca una ondulación entre bobinas de fases diferentes según el plano rotórico, exagerada e inadmisibles desde el punto de vista magnético.

Los problemas térmicos durante los ensayos se han agravado por las asimetrías en el circuito hidráulico.

5.2.3.6.- Condicionantes hidráulicos

Al final se construyeron sólo tres terminales R, S, T por semiestátor conectado en triángulo, pues los medios empleados no permitieron más, en el compromiso de renuncias necesario para todo diseño.

El número impar de terminales hidráulicos (3), obliga a diseñar circuitos de refrigeración asimétricos con todos sus inconvenientes.

El terminal hidráulico y eléctrico mostrado en la foto 19 resulta eficaz en este tipo de prototipos, y mucho más sencillo que los utilizados en [10] para corrientes similares.

El resultado final de los dos semiestatores se presenta a continuación:



Foto 20: Semiestatores en los que se pueden observar los aislantes entre espiras, los refuerzos para equilibrar la tensión mecánica, y la entrada eléctrica e hidráulica apiñada en una zona concreta.

5.3.- ENSAYOS DEL PROTOTIPO P-1

Ya se ha comentado durante la explicación del proceso constructivo, que sus dificultades han truncado

muchas de las posibilidades de ensayo, por ello es importante definir el procedimiento seguido para obtener la máxima información posible.

Se sabe por cálculo y dimensiones definitivas que las prestaciones magnéticas de levitación están muy disminuidas. Quedan, no obstante, cinco puntos de vista más: eléctrico, dieléctrico, mecánico, térmico e hidráulico, imprescindibles para el correcto funcionamiento del conjunto definitivo y que se han de comprobar.

El control de la calidad de las soldaduras es muy difícil de realizar, aunque sea crítico. Después de la comprobación visual de las soldaduras, se ha intentado medir su resistencia. La baja impedancia del conjunto y de la propia soldadura a medir, ha evidenciado que los instrumentos utilizados, puentes de Wheastone y de Thomson, no resultan ser lo fiables que se desea.

Parece que el sistema correcto sería alguno que tenga en cuenta la inductancia del tramo a medir o bien una estructura de puente más compleja. Para hacer este control, se ha visto que lo mejor es inyectar una corriente cercana a la nominal directamente al inductor y analizar las caídas de tensión en cada punto. Se usará la fuente de corriente (TS) de la foto 21.

TS es un banco de tres transformadores monofásicos de los empleados en soldaduras por puntos. Están conectados en estrella y sus características nominales principales son primario 380 V, 80 kVA, corriente secundaria 8 kA. La alimentación trifásica, se regula variando la tensión de entrada al primario del TS, con un conjunto de transformadores variables TG que no se detalla.

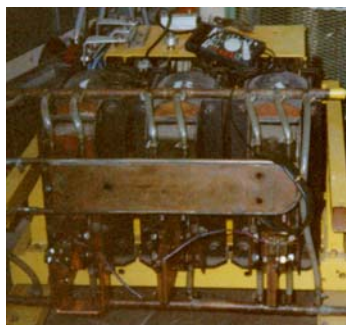


Foto 21: (TS) Transformador de intensidad utilizado en ensayos de elevadas corrientes.

No se puede hacer circular una corriente importante sin antes aislar y ligar las bobinas mecánicamente entre sí, dada la debilidad mecánica del conjunto ante los gruesos cables y tubos de conexión al TS necesarios.

El aislante utilizado permite mucha flexibilidad para la medida de tensiones. El aislante se puede eliminar puntualmente con una lima y es fácil de reponer después otra capa de poliéster y fibra de vidrio.

Para medir corrientes, el prototipo es especialmente adecuado, ya que entre las barras cabe perfectamente una pinza amperimétrica o una sonda Rogowsky.

Esta facilidad de medida y el sentido común necesario han definido el procedimiento de ensayo siguiente:

- 1.- Se realiza la prueba de estanqueidad hidráulica, como mínimo a dos atmósferas, anotando las incidencias y evaluando las posibilidades de continuación.
Durante el proceso de soldadura ya se han hecho pruebas eléctricas e hidráulicas parciales, pero

la manipulación y conexión siempre puede afectar a las soldaduras.

2.- Se hacen todas las conexiones eléctricas e hidráulicas como para hacer el ensayo a corriente nominal.

3.- Se hace circular el agua de refrigeración, se determina el comportamiento nominal hidráulico: presiones, caudales, distribución de estos. También se han de evaluar las incidencias que puedan afectar al resto de los ensayos.

4.- Comprobar los aislamientos a masa y entre espiras, dada la dificultad del segundo es observar las caídas de tensión y los posibles arcos al circular corriente.

5.- Se empieza a inyectar corriente sin superar el 10% de la admisible por barra. Aquí es muy importante analizar el reparto de corrientes por las diferentes barras y cabezas de bobina. Este reparto de corrientes es la prueba más significativa, pues no solo está influida por la calidad de las soldaduras, sino que requiere un acertado diseño de impedancias internas y distribución de tensiones de alimentación. Controlar las incidencias.

6.- Con la corriente circulando y la refrigeración activa, analizar la distribución de temperaturas en las barras, cabezas de bobina, cables de alimentación y salidas de agua de refrigeración.

7.- Controlando todos los parámetros citados, aumentar la corriente hasta la nominal.

8.- Colocar el rotor y observar su comportamiento.

9.- Para verificar el comportamiento rotórico y evaluar los efectos de posibles espiras de sombra, repetir el ensayo invirtiendo dos fases para provocar la rotación en sentido inverso controlando V , I , ω , y si es posible la potencia activa y el factor de potencia ($\cos \phi$).

El procedimiento anterior es aplicado a los semiestatores separados o trabajando conjuntamente. Esta segunda prueba no se ha realizado por dificultades constructivas.

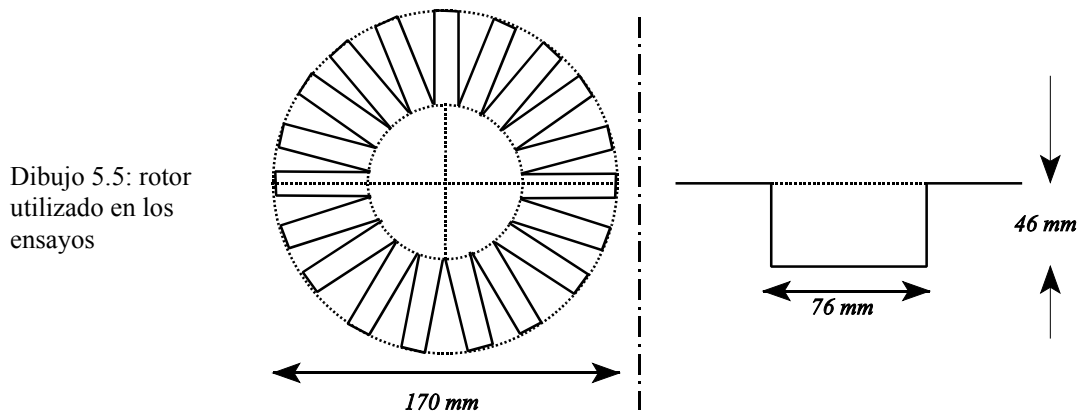
Se han preparado cuatro r6tores muy f6cilmente intercambiables durante el funcionamiento y con caracter6sticas diferentes.

Hay que notar que en aplicaciones de rotores levitados no puede existir hierro en el r6tor, que ha de ser continuo y de material conductor. As6 todos los esfuerzos electromagn6ticos entre rotor y est6tor son de repulsi6n, incluidos los que provocan el par de rotaci6n.

Al realizar s6lo las pruebas con ambos semiestatores por separado, queda libre el espacio para intercambiar los r6tores con mucha rapidez.

La zona a probar es la de cabeza de bobina interior y los primeros 20 mil6metros de las barras tractoras.

El primer rotor se obtiene a partir de un envase de aluminio (envase de l6quidos a presi6n) al que se le ha adaptado la forma quedando en forma de sombrero de copa (tal y como se quer6a). Su esquema, que se muestra en el dibujo 5.5, es poco adecuado en la parte del ala por dificultar la circulaci6n de corrientes tractoras, aunque presenta una buena forma para ver el comportamiento de la cabeza de bobina interna del semiest6tor.



Los cortes radiales del rotor hacen las veces de una elevada impedancia, limitan o impiden la circulación de corrientes inducidas en el ala del rotor. El efecto de los cortes sobre la generación de corrientes inducidas en el ala del rotor es una verdadera incógnita y de esta forma solo se debe tener en cuenta el efecto de la cabeza de bobina interna con la parte cilíndrica del rotor.

En el ensayo tenemos en cuenta que el rozamiento no es en absoluto despreciable y por ello se deberá buscar la intención del rotor a moverse, o bien utilizar otro recurso que disminuya la fricción.

El segundo rotor probado es la cáscara esférica de latón de 1.5 mm de altura, 60 mm de radio y 1.0 mm de espesor, citada en [8]. Aunque con una forma favorable para la levitación, resulta demasiado pesada y poco conductora, adaptándose poco a la forma del inductor. No se levantó ni se observó movimiento de rotación alguno.

Un tercer rotor, se construyó con papel de aluminio de 0.05 mm de espesor. Su forma se adoptó al inductor, en forma de sombrero de copa. Así se consiguió una ligereza extrema, pero la resistencia eléctrica presentada era exagerada y no se podían establecer unas corrientes rotóricas suficientes para detectar movimientos.

El cuarto rotor es de papel de aluminio de 0.2 mm de espesor. Parece adecuado porque levita fácilmente a 5 kHz en una prueba previa realizada en el horno de inducción del departamento, de 15 kVA.

5.3.1.- SEMIESTÁTOR 1

Al introducir agua a presión por el semiestátor, hay un punto en el que se produce una fuga de agua apreciable. Este punto es una unión entre una espira y uno de los tres conductores de la cabeza de bobina externa. El escape de agua no afecta al rotor. La soldadura está rota y representa una discontinuidad eléctrica. A pesar de ello decidimos realizar un ensayo de medidas para ver el funcionamiento del inductor.

Tablas de valores:

Las medidas se realizan en períodos cortos de tiempo (entre 2 y 3 segundos) para evitar que el aumento de temperatura deteriore el prototipo por las uniones de soldadura. Las soldaduras resultan muy precarias al estar realizadas con estaño y sin un solape suficiente, como se ha indicado anteriormente.

Tabla 5.1:

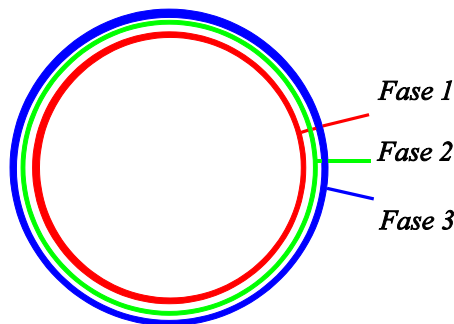
(Hay desequilibrio)

$I_{\text{fase 1}}$ (A)	$I_{\text{fase 2}}$ (A)	$\Delta V_{\text{entre fases}}$ (V)	n (rpm)
1600	1600	1.8	0
1760	1760	1.9	0
2800	2800	2.0	- 80

En las dos primeras medidas no se aprecia intención de moverse al rotor. En la tercera se comprueba que el rotor gira -en sentido antihorario-, pero nos vemos obligados a parar enseguida porque el calor desprendido, por efecto joule en el estator, provoca la generación de vapor del agua que se utiliza como refrigeración.

Volvemos a intentar de nuevo la medida para comprobar que efectivamente el rotor gira. El rotor no se mueve, ya que se han deteriorado diversas soldaduras tanto por el calor desprendido por efecto joule como por los esfuerzos mecánicos a los que están sometidas las espiras por las elevadas corrientes que por ellas pasan.

Durante el proceso, vamos comprobando como evoluciona la temperatura en las espiras, y se comprueba que el calor no se distribuye uniformemente por todas las ranuras, se calientan mucho más aquellas espiras próximas a las entradas de corriente que las diametralmente opuestas:



Dibujo 5.6: Esquema de las entradas de corriente en los semiestátores.

En el dibujo 5.6 se tiene el esquema de alimentación del semiestátor, presentando únicamente las cabezas de bobina externas, que luego distribuyen a su vez la corriente por las espiras interiores. Este esquema es el típico esquema de conexión como fuente de tensión.

La colocación de las tres fases próximas entre sí fue tomada por motivos de comodidad mecánica a la hora de montar las conexiones del motor -eléctricas e hidráulicas-:



Foto 22: Conexiones hidráulicas y eléctricas coincidentes.



Foto 23: Otra vista de la proximidad de las conexiones.

La causa del calentamiento no uniforme de las espiras es porque la intensidad no se distribuye equitativamente por todas las espiras. Una estimación posterior de las inductancias de las diferentes barras, ha indicado grandes diferencias debidas a las asimetrías en los diversos recorridos posibles de las barras conectadas en paralelo. La intensidad I de cada fase del motor se divide entre caminos de impedancia muy diferentes, esto hace que la intensidad de corriente circule preferentemente por las espiras próximas a las entradas.

5.3.2.- SEMIESTÁTOR 2

Con el semiestátor 2 se realiza la misma prueba. Las pruebas se realizan en intervalos de unos 2 o 3 segundos, para evitar desperfectos por calentamiento excesivo en las soldaduras. Se obtiene la tabla de valores:

Tabla 5.2:

$I_{\text{fase 1}}$ (A)	$I_{\text{fase 2}}$ (A)	$\Delta V_{\text{entre fases}}$ (V)	n (rpm)
800	800	1.08	0
1000	1000	1.4	0
1200	1200	2.6	0
1600	1600	1.8	0
2560	2500	2.0	Intención de giro, sentido horario
3200	3200	2.4	- 60

La alimentación con la misma secuencia de fases que con el semiestator 1, evidencia el hecho de que los semiestátors están contruidos como “imagen óptica” uno del otro, por ello giran en sentidos opuestos.

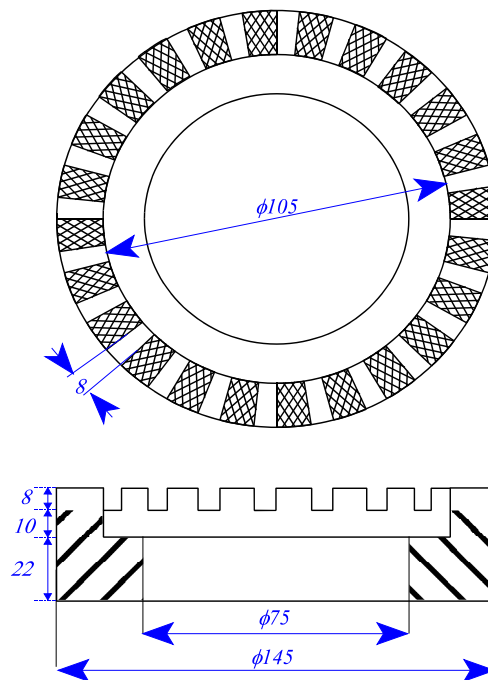
Se comprueba asimismo una diferencia de calentamiento entre las espiras, debido a las diferentes inductancias presentadas. Las resistencias de las soldaduras tampoco son iguales, pero en comparación con el desequilibrio de las reactancias inductivas, su influencia se puede obviar.

5.3.3.- INCLUSIÓN DE NÚCLEO DE HIERRO

En las dos tablas anteriores (5.1 y 5.2) se obtiene un efecto de rotación, débil, sobre el rotor conductor débil. Queda la duda de que éste efecto pueda ser magnificado por la presencia de un circuito magnético más estándar. Un bloque de forma cilíndrica de hierro macizo puede hacer las veces de circuito magnético y de esta forma observar mejoras en las respuestas del rotor metálico.

Sobre cada semiestátor se coloca una pieza de hierro macizo que no alberga la longitud de las espiras en su totalidad. Sobre la esta pieza, se realizan los huecos a forma de ranura, para que se alojen los conductores. Todas estas operaciones se realizan en el taller mecánico de la UPC dada las dificultades mecánicas de esta operación.

El bloque de hierro tiene las dimensiones que se indican en el esquema adjunto (dibujo 5.7):



Dibujo 5.7: Soporte de hierro que se añade a los semiestatores

El proceso de colocación del bloque metálico consta de las etapas:

a.- introducción de los conductores de cada estátor en el bloque metálico por medio de proceso de prensado:



Foto 24: Proceso de prensado. Se utilizan dos maderas y un espárrago roscado.

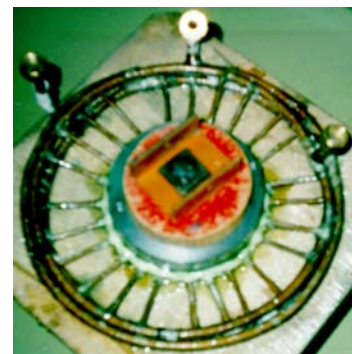


Foto 25: Vista superior del proceso de prensado.

HIPÓTESIS Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO P-1

Este proceso es muy delicado ya que, al prensar, las soldaduras podían sufrir esfuerzos mecánicos excesivos y deteriorarse o romperse.

b.- Sujeción de los conductores para mantener su posición y aliviar los esfuerzos mecánicos:

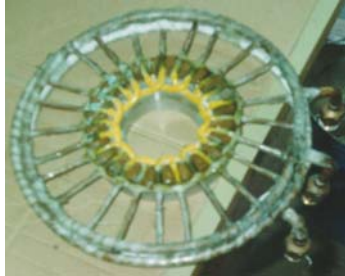


Foto 26: resultado definitivo del prensado en el semiestátor 1



Foto 27: resultado definitivo del prensado en el semiestátor 2



Foto 28: vista posterior del núcleo de hierro una vez colocado.

c.- Resultado final en uno de los semiestator y muestras de algunos de los elementos utilizados como rótores:



Foto 29: Resultado final y elementos de prueba.

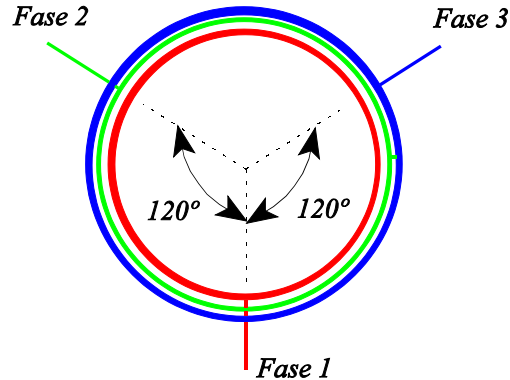
Tras colocar estos bloques de hierro, se repiten las pruebas que dieron lugar a las tablas anteriores, y no se obtiene ningún tipo de mejora apreciable.

Los semiestatores se han probado primero sin hierro para poder ver su efecto y sobre todo, porque la debilidad de las soldaduras así lo aconsejó.

En efecto, los esfuerzos mecánicos de montaje del devanado al introducirlo en el núcleo magnético han sido excesivos, eliminando la función de varias barras. De esta forma, el núcleo magnético consigue mejorar el circuito magnético, pero el circuito eléctrico se deteriora hasta el punto de haber anulado algún polo. Ésta es la explicación a la aparente falta de mejora al montar el núcleo de hierro.

5.4.- CONCLUSIONES

- Los semiestatores deben presentar una distribución de entradas de corriente como la siguiente:



Dibujo 5.8: Propuesta de colocación de las entradas eléctricas en un semiestátor alimentado por corriente.

- Las asimetrías en las cabezas de bobina presentan mayores impedancias que los propios devanados de ranura al estar éstos en paralelo y ser de una espira.
- Las soldaduras son demasiado críticas, es mejor un proceso como la inyección de aluminio.
- La refrigeración de las bobinas ha de tener circuitos cortos y simétricos entre si.
- La sección de cobre en las cabezas de bobina está infradimensionada, como ya se sabía por cálculo.
- En éste tipo de máquinas, de una espira por ranura y con varias barras en paralelo, es más importante el cómo se inyectan las fuertes corrientes necesarias que la propia máquina. La extraordinaria simetría necesaria es prácticamente imposible de obtener con conexiones flexibles y atornilladas.
- Mínimas variaciones en la longitud o disposición de los conductores origina fuertes desequilibrios en el reparto de corriente de fases o entre bobinas en paralelo.
- La alimentación debe ser adaptada a la máquina. Ésta debe tener una estructura lo más parecida a la de una jaula de ardilla, aunque estemos hablando del estator.
- La cabeza de bobina interna tiene unas deformaciones internas que acaban originando obstrucciones internas en el circuito hidráulico, produciendo calentamientos.
- La cabeza de bobina externa se simplificaría en el caso de ser bifásica en lugar de trifásica, y en el límite de simplificación, si pudiera ser, monofásica.

El diseño de la fuente de corriente, debe estar integrado en el de la máquina excitada por corriente. Seguramente por ello no han proliferado los diseños de estas máquinas.

En este punto se abandona el estudio de este prototipo. Se plantea que en un futuro se reconstruya como un generador, con un rotor de SmCo, para alimentar otros prototipos, modificando drásticamente e irreversiblemente sus cabezas de bobina externas y la filosofía de funcionamiento de la máquina.