

## 12.- PROTOTIPO P-7 DE DOBLE INDUCTOR DE FLUJO AXIAL. TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD DE ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS

---

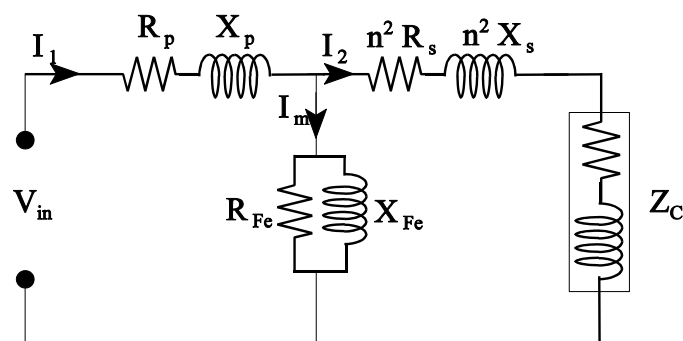
---

### 12.1.- DEFINICIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Tras los resultados obtenidos con los prototipos con transformadores de intensidad tanto en monofásico como en bifásico, se han ido constatando los siguientes puntos:

El flujo de dispersión no genera un desfase en el campo magnético generado por la corriente inducida. Una de las causas es que la resistencia del secundario es aún muy elevada y de esta forma, el toroidal se encuentra en saturación.

Esquema de un transformador reducido al primario:



donde  $n$  es la relación entre espiras:

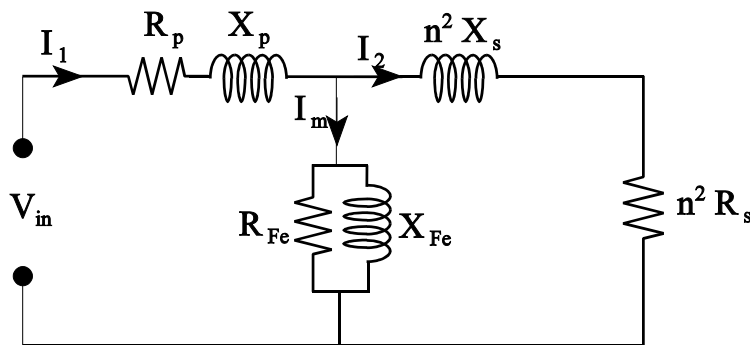
$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

Si el secundario se encuentra en cortocircuito,  $Z_c = 0$ , la corriente que pasa por el primario,  $I_1$ , se desdobra en dos componentes:

$I_m$  = corriente de pérdidas.

$I_2$  = corriente de secundario.

Si el transformador está en saturación,  $I_1 \gg I_2$ .



Los transformadores utilizados se encuentran con un recubrimiento de cobre, en el que mediante cortes se definirán los polos magnéticos de la máquina rotativa. Este recubrimiento se entiende como un cortocircuito. En nuestro caso, el número de espiras en el secundario es 1, por lo tanto la relación de transformación es:

$$n = N_1$$

Este resultado es importante, ya que tanto la resistencia, como la inductancia del secundario, en el circuito equivalente reducido al primario, presentan un factor de multiplicación  $n^2$ . Así, según la última ecuación, el factor de multiplicación será  $N_1^2$ .

Los transformadores utilizados, son transformadores toroidales comerciales con dos devanados, el de baja y el de alta. La relación entre los devanados de cualquier transformador es:

	Nº de espiras	Tensión	Intensidad
Devanado de alta	$N_{alta}$	Tensión más elevada (220V)	Intensidad más baja 0.27 A
Devanado de baja	$N_{baja}$	Tensión más baja (20 V)	Intensidad más alta 3 A

donde:

$$N_{alta} > N_{baja}$$

En el prototipo de trabajo, a la hora de aplicar tensión se podría escoger indiferentemente cualquiera de los dos devanados según la fuente de alimentación disponible. Ahora bien, la relación de transformación no sería la misma. Si el secundario es el recubrimiento de cobre en cortocircuito y el primario puede ser cualquiera de los dos devanados que el transformador posee, el valor de  $n$  será:

Utilizando como primario el devanado de baja	Utilizando como primario el devanado de alta
$n' N_{alta}$	$n' N_{baja}$

La relación de transformación es mayor si se utiliza el devanado de alta, y por lo tanto la resistencia del secundario, que, referida al primario, va con el cuadrado de la relación de transformación, será más elevada.

Por lo tanto el devanado que debe utilizarse para alimentar los prototipos de trabajo, debe ser el devanado de baja tensión, ya que va mejor como transformador de intensidad de adaptación de impedancias, que es la función del inductor primario.

### 12..1.1.- DISCO INDUCTOR SECUNDARIO

De todas las pruebas que se han ido realizando hasta el momento, se han utilizado transformadores de intensidad en monofásico, y sólo en una ocasión se ha hecho servir más de un transformador para ensayar sistemas polifásicos.

Las pruebas de transformadores en solitario han ido dando resultados similares. A pesar de utilizar diferentes caminos de corriente sobre los recubrimientos de cobre, no se observa la generación de un campo magnético rotatorio.

Únicamente en el caso del prototipo P-6 formado por dos transformadores se observa esta generación de campo magnético rotatorio, tanto en la conexión en monofásico como en bifásico, pero sobre todo en bifásico.

El diseño del conjunto monofásico era demasiado arriesgado. Al diseñar a la vez la parte de adaptación de impedancia a la red (inductor primario-inductor secundario) y el conjunto tractor del rotor (disco inductor secundario-rotor), se han abordado demasiadas variables que no se pueden dominar sin tener experiencia previa.

El conseguir el efecto de espira de sombra sobre las placas inductoras secundarias, requiere más experiencia. Justifican un trabajo específico y monográfico.

Se tomará un sistema de corrientes bifásico, que genere un campo magnético rotativo para simplificar el diseño sin entrar en el efecto de espira de sombra.

La utilización del sistema trifásico exigiría la utilización de tres transformadores de intensidad, lo que complicaría la geometría.

La conexión en bifásico permite un transformador de intensidad a cada lado del rotor (plano). Los discos inductores secundarios quedan con las ranuras junto al rotor para inducir mejor las intensidades en el rotor. Las barras están geoméricamente desfasadas al “tresbolillo” entre sí y sus inductores primarios se alimentan conectados a dos sistemas de tensión o corriente desfasados 90° eléctricos.

Cada barra, al ser atravesada por una corriente, origina un par de polos magnéticos. La interacción de ambos inductores sobre el mismo rotor ha de originar una rotación del rotor a una velocidad de sincronismo de 250 Hz.

El prototipo en estudio será formado por dos transformadores toroidales, cada uno con su propio inductor secundario. Cada inductor secundario tendrá una cara circular con los mismos caminos de corriente y producirá unas corrientes que generarán un flujo axial. Este flujo axial se aplicará sobre un rotor plano conductor con geometría circular:



Foto 47: Rotor conductor de cobre utilizado en el P-7

Los inductores secundarios de los dos transformadores estarán unidos eléctricamente por su eje, equivalente a un centro de estrella:

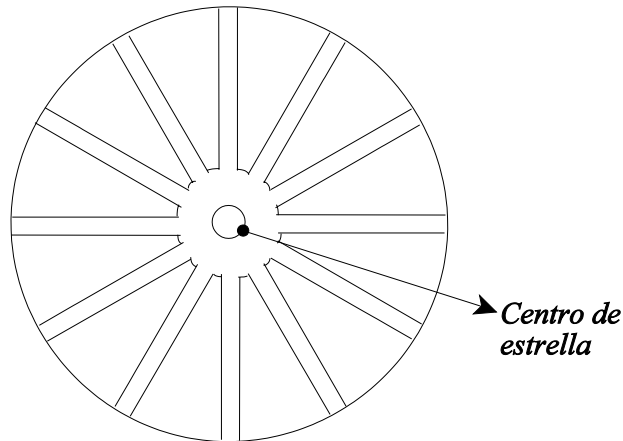


Figura 12.3: Distribución de las corrientes en la cara circular del inductor secundario. El centro es el eje del prototipo, y será el punto eléctrico común a los dos elementos.

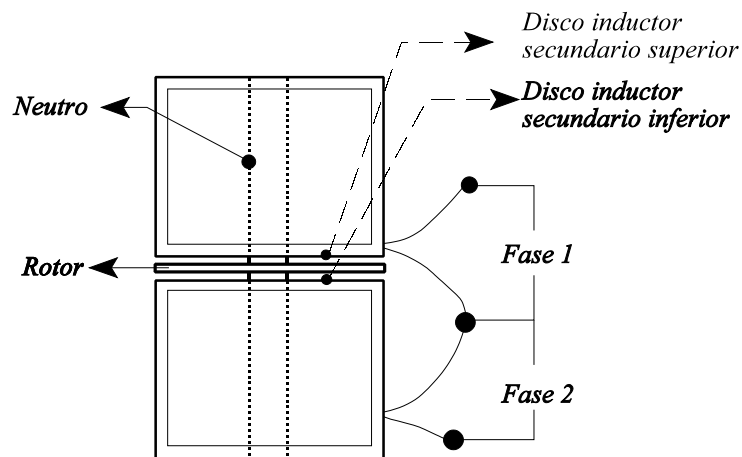


Figura 12.4: Esquema del conjunto del P-7

## PROTOTIPO P-7 DE DOBLE INDUCTOR DE FLUJO AXIAL

El proceso de construcción de las dos partes en que se divide el prototipo se muestra en las siguientes fotografías:



Foto 48: Proceso de soldadura de los diferentes componentes del P-7



Foto 49: Despiece de los componentes del prototipo P-7

El prototipo se construye de forma totalmente artesanal. A partir de una plancha de cobre, y para cada uno de los dos bloques que conformarán el prototipo final, se corta una pieza rectangular y dos circulares. A partir de la pieza rectangular se fabrica el recubrimiento exterior en forma de cilindro, y de las piezas circulares salen la base del bloque y la cara sobre la que se definirán los caminos de corriente. El resultado final se muestra en las fotos siguientes:



Foto 50: Despiece definitivo del P-7. Vista lateral.

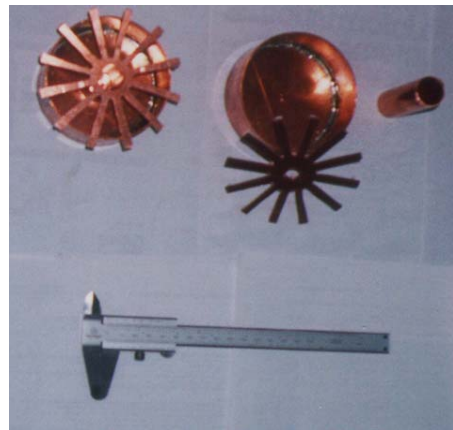


Foto 51: Despiece definitivo del P-7. Vista frontal.

En las fotos 50 y 51 se observa un tubo de cobre. Este tubo de cobre es el que unirá eléctricamente los dos elementos de que consta este prototipo. Ha de tener la misma sección de cobre que la cubierta externa para que todo el conjunto trabaje a densidad de corriente constante.

La parte más crítica de estos prototipos es la resistencia del conjunto del inductor secundario, en cortocircuito. Los puntos débiles de estos bloques son:

- Los elementos que conforman los caminos de corriente, ya que es la parte en la que la sección del conductor es más pequeña, con el consecuente aumento de resistencia.
- Las soldaduras. Hay que tener en cuenta que cada una de las cuatro partes de las que se compone cada bloque, van unidas entre sí por medio de cuatro conjuntos de soldaduras de estaño. Estas soldaduras, han quedado de color mate por lo que pueden considerarse soldaduras frías. A pesar de que la superficie y cantidad de estaño utilizado en cada una de ellas es considerable, la resistencia equivalente de cada soldadura es impredecible.

Los transformadores se cubren con cinta de fibra de vidrio, para evitar que el calor que se desprende por efecto joule en el recubrimiento de cobre dañe los devanados. Las partes de que consta el prototipo son:

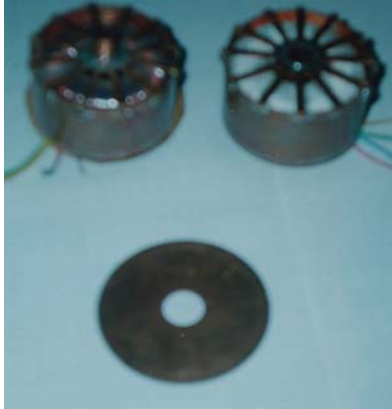
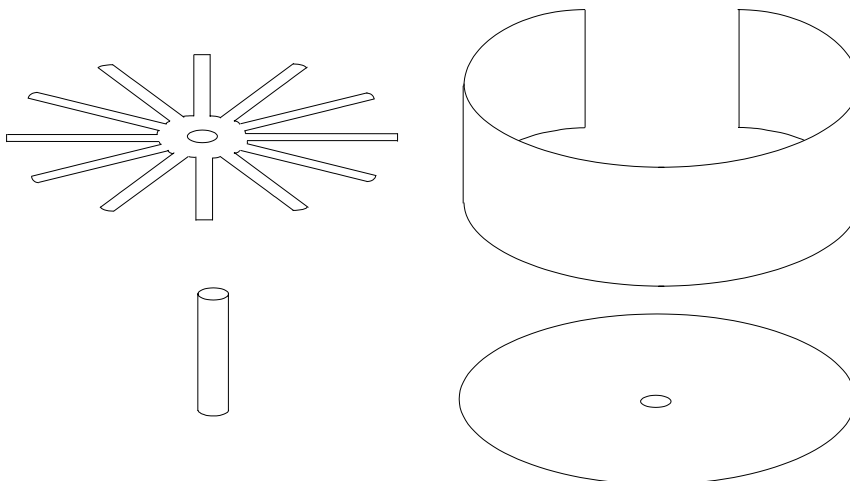


Foto 52: Semiestatores y rotor



Foto 53: Conjunto acoplado

La resistencia teórica de uno de los recubrimientos metálicos se puede reducir a las siguientes partes:

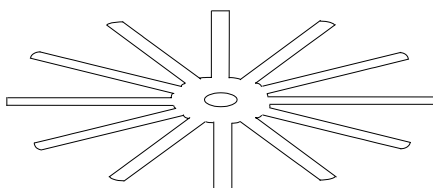


Dibujo 12.5: Despiece de un semiestator para el cálculo teórico de resistencia.

### 12.1.2 CÁLCULO TEÓRICO DE LAS RESISTENCIAS

No se tienen en cuenta la resistencia de las soldaduras

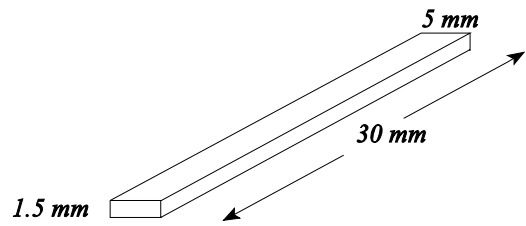
i) Disco inductor secundario con forma de estrella:



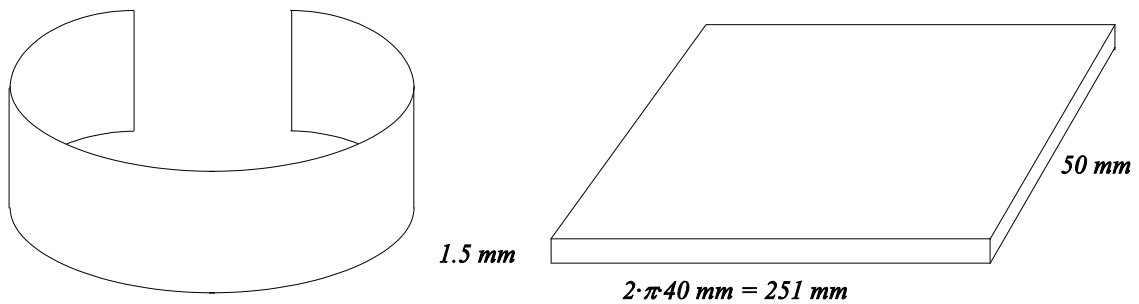
La resistencia del disco inductor secundario se reduce al paralelo de 12 tramos rectos:

$$R_{\text{tramo}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot 30 \cdot 10^{-3} / 7.5 \cdot 10^{-6} = 6.8 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$R_{\text{estrella}} = R_{\text{tramo}} / 12 = 5.7 \cdot 10^{-6} \Omega$$



ii) Cierre del circuito inductor secundario externo con forma de cilindro:



$$R_{\text{Cilindro}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot 50 \cdot 10^{-3} / 377 \cdot 10^{-6} = 2.25 \cdot 10^{-6} \Omega$$

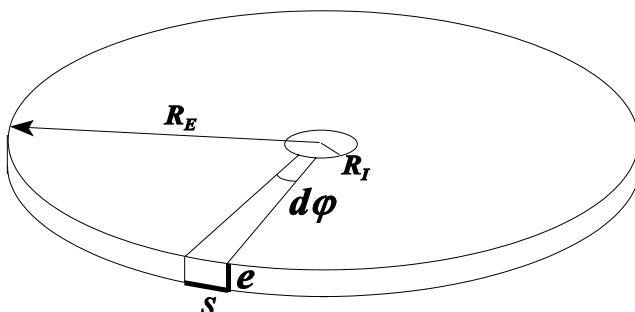
iii) Cilindro hueco interior:

De forma análoga al caso ii);



$$R_{\text{Cilindro hueco}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot 50 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 12 \cdot 3) \cdot 10^{-6} = 7.5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

iv) Círculo posterior:



Se calcula la resistencia de un tramo y posteriormente se extrapola a todo el círculo como resistencias en paralelo:

$$dR_i = \rho \cdot \frac{dr}{e \cdot s} = \rho \cdot \frac{dr}{e \cdot r \cdot d\phi}$$

$$R_i = \rho \int_{R_I}^{R_E} \frac{dr}{e \cdot r \cdot d\phi} = \frac{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_E}{R_I}\right)}{e \cdot d\phi}$$

La resistencia total será:

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = m \frac{1}{R_i} = \frac{2 \pi}{\rho} \frac{e \cdot d n}{\ln\left(\frac{R_E}{R_I}\right)} = \frac{2 \pi \cdot e}{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_E}{R_I}\right)}$$

$$R_{TOTAL} = \frac{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_E}{R_I}\right)}{2 \pi \cdot e}$$

Teniendo en cuenta que  $e=1.5$  mm,  $R_E = 40$  mm y que  $R_I = 8$  mm:

$$R_{TOTAL} = \frac{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_E}{R_I}\right)}{2 \pi \cdot e} = 3.0 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Así la resistencia total del conjunto sin tener en cuenta las soldaduras es:

$$R_{TOTAL} = 5.7 \cdot 10^{-6} \Omega + 2.25 \cdot 10^{-6} \Omega + 7.5 \cdot 10^{-6} \Omega + 3.0 \cdot 10^{-6} \Omega = 1.88 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$R_{TOTAL} = 18.8 \mu\Omega$$

### 12.1.3 MEDIDAS DE AUTOINDUCCIÓN

Esquema del prototipo P-7:

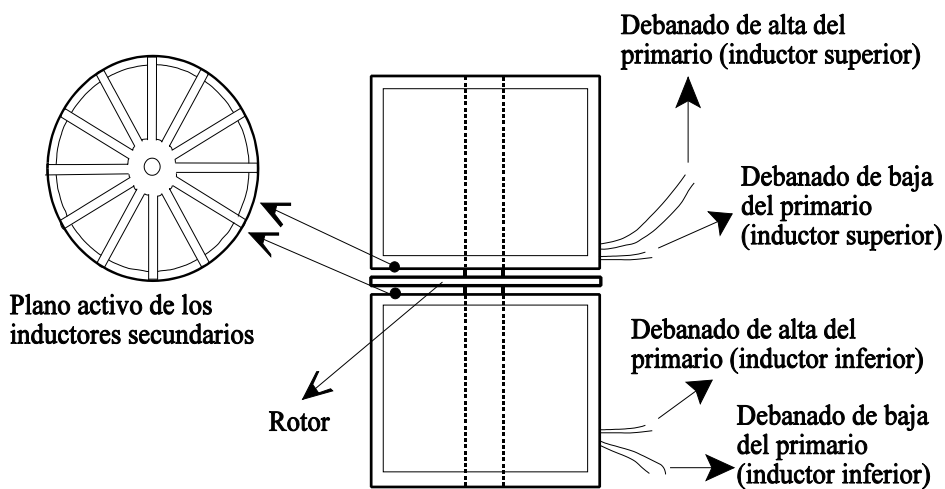


Figura 12.7: Desglose del P-7

Se han medido las autoinducciones a dos frecuencias: 120 Hz y 1.0 kHz.

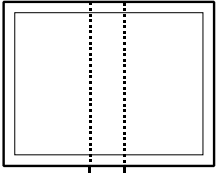
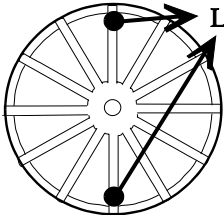
Las medidas se realizan para cada inductor (superior e inferior) por separado. En cada inductor se mide la inducción tanto del primario como del secundario y, como que el primario de cada inductor es un transformador, se puede utilizar tanto su devanado de alta como el devanado de baja.

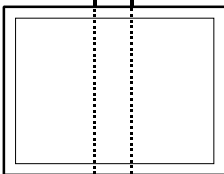
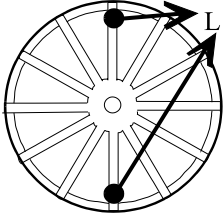
Se han realizado medidas posteriores con el rotor próximo a los inductores para comprobar si había



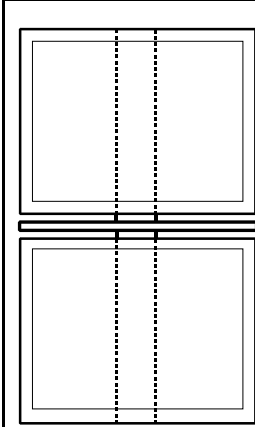
PROTOTIPO P-7 DE DOBLE INDUCTOR DE FLUJO AXIAL

cambios sustanciales:

		f = 120 Hz	f = 1.0 kHz
<b>INDUCTOR SUPERIOR:</b> 	debanado de alta ( <i>sin</i> rotor en posición)	48 mH	43.4 mH
	debanado de alta ( <i>con</i> rotor en posición)	47.8 mH	43.3 mH
	debanado de baja ( <i>sin</i> rotor en posición)	0.50 mH	370 $\mu$ H
	debanado de baja ( <i>con</i> rotor en posición)	0.48 mH	370 $\mu$ H
	-	2.5 $\mu$ H	4.0 $\mu$ H

		f = 120 Hz	f = 1.0 kHz
<b>INDUCTOR INFERIOR:</b> 	debanado de alta ( <i>sin</i> rotor en posición)	47.3 mH	43.3 mH
	debanado de alta ( <i>con</i> rotor en posición)	47.5 mH	43.2 mH
	debanado de baja ( <i>sin</i> rotor en posición)	0.46 mH	360 $\mu$ H
	debanado de baja ( <i>con</i> rotor en posición)	0.47 mH	360 $\mu$ H
	-	2.5 $\mu$ H	4.0 $\mu$ H

Para el P-7 en conjunto;

		f = 120 Hz	f = 1.0 kHz
	debanado de alta (con rotor en posición)	48.1 mH	43.4 mH
	debanado de baja (con rotor en posición)	0.50 mH	371 μH

## 12.2.- PRUEBA EN NITRÓGENO LÍQUIDO

El prototipo en cuestión se prueba a la temperatura del nitrógeno líquido (77 K) el martes 9 de diciembre de 1997. La temperatura del nitrógeno líquido hace que la resistencia del cobre disminuya a una quinta parte de su valor a temperatura ambiente. Por lo tanto:

$$R_{TOTAL (77 K)} = 3.8 \mu\Omega$$

El baño de nitrógeno introduce un serio problema, ya que se debe utilizar un recipiente en el que se pueda introducir totalmente el prototipo 7 y que no sea excesivamente grande, porque habría demasiadas, e innecesarias, pérdidas de nitrógeno de refrigeración. El recipiente además debe ser transparente para de esta forma observar la evolución del prototipo, si el rotor gira mucho, poco, o no gira al alimentar el prototipo.

Es interesante observar el sentido de giro y comprobar el cambio en el sentido de giro al cambiar las fases de la alimentación del P-7.

Se recurre en un principio a un elemento de poliestireno expandido (porexpan) del utilizado en embalajes. El bloque de porexpán tiene forma de paralelepípedo de base cuadrada de 30 cm de lado y 10 cm de altura. Esta altura no es suficiente para introducir en su totalidad el P-7, pero como se desea que el recipiente permita ver el P-7, se piensa en colocar cuatro trozos de metacrilato desde la base del porexpán, sujetos a éste y entre ellos con silicona.

A la hora de empezar a preparar el recipiente, se presentan dudas sobre el comportamiento de la silicona a la temperatura del baño de nitrógeno líquido. Se estima más seguro utilizar un recipiente transparente que no tenga que construirse a trozos.

De esta forma se consigue prestado del laboratorio de Física de la EUETIB un vaso de precipitados, de pyrex, de un litro de volumen. El recipiente es ideal porque permite tener sumergido completamente el P-7 y porque el material del que está compuesto tiene un bajísimo coeficiente de dilatación y no se quebrará al bajar la temperatura hasta los 77 K.

El diámetro del vaso de precipitados deja una holgura de 1.5 cm del P-7 a la superficie del vaso. La holgura es suficiente para introducir el P-7 sin miedo a golpear y romper el vaso. El volumen que ocupa el P-7 hace que no sea necesaria una cantidad exagerada de nitrógeno en el recipiente. El porexpán se utiliza para aislar el vaso de precipitados de su entorno.



Foto 54: Recipiente en el que se sumerge el P-7.



Foto 55: P-7 introducido en el vaso de precipitados. El diámetro del recipiente es ideal para la prueba.

Durante el proceso de enfriamiento se observa perfectamente como va disminuyendo el nivel de nitrógeno y en el momento en que se estabiliza, se está en condiciones de iniciar los ensayos. El volumen de nitrógeno líquido utilizado fue de unos 25 litros.

Para evitar problemas de condensación en la superficie exterior del vaso de precipitados que impida observar el interior del mismo, se toma una superficie de plástico transparente que rodee el vaso y lo proteja levemente. Si se crea una película de hielo en la cara exterior del vaso de precipitados, sería difícil observar nada de lo que ocurre con el P-7.

Hay que pensar que el vaso de pyrex soporta en esas condiciones un gradiente de temperatura de 220 °C/mm aproximadamente.

Una vez finalizado el proceso de enfriamiento, que dura unos 15 minutos, se está en condiciones de iniciar los ensayos.

En el rotor metálico de ha pintado una marca en el borde del disco, para de esta forma observar mejor cualquier movimiento. El prototipo se conecta al varivolt del laboratorio de grandes corrientes permitiendo una entrada máxima de 7 A por el devanado de alta de los transformadores toroidales.



Foto 56: Recipiente con el P-7 en proceso de enfriamiento. Se observa el plástico de protección.



Foto 57: Banco de ensayo del P-7. Se mide la intensidad de los devanados de alimentación de cada toroidal.

No se observa movimiento alguno del rotor. Se saca el prototipo del baño en el nitrógeno y se observa que el rotor está bloqueado. La causa es la siguiente: para evitar que el rotor metálico conectase eléctricamente con los bloques del prototipo, se colocó un elemento de teflón, en forma de arandela, para que actuara como aislante. Este teflón a temperatura ambiente tiene un coeficiente de fricción cinético de valor 0.04 (como hielo), pero a 77 K, el teflón tiene un rozamiento mucho mayor e impide el movimiento libre del rotor.

Se rebaja ligeramente el elemento de teflón y se realiza de nuevo la prueba. En esta ocasión, la alimentación se producirá a través de los devanados de baja de los dos transformadores toroidales, para conseguir que la resistencia efectiva del recubrimiento de cobre sea lo más pequeña posible.

En la prueba se observa tendencia al movimiento, pero hay que tener en cuenta la dificultad de la medida, ya que el recipiente en el que se realiza el baño, se cubre de escarcha, dificultando la visión.

Viendo el posible éxito del experimento, se decide elevar la corriente de alimentación, y se utiliza el transformador de grandes corrientes. Con una intensidad de alimentación de 40 A, el disco gira a una velocidad próxima a la de sincronismo de 250 rpm. La experiencia no puede mantenerse mucho tiempo ya que la temperatura en el recubrimiento de cobre producida por la corriente inducida hace hervir el nitrógeno líquido, que sale proyectado a borbotones.

Se consigue por lo tanto con una conexión en bifásico el desplazamiento de un rotor conductor sin ningún elemento ferromagnético. El desplazamiento es generado por la repulsión (o atracción) entre las corrientes inducidas en los discos inductores secundarios y las corrientes generadas en el rotor conductor.

Los efectos de las corrientes inducidas son suficientemente elevados como para generar el desplazamiento del rotor. La levitación es el paso siguiente. Con la prueba realizada no se puede realizar ningún tipo de medida que permita comprobar efectos de repulsión o atracción en sentido axial, aunque queda la puerta abierta para hacer experiencias en ese sentido.

Una prueba que se propone realizar es el de cambiar el rotor de disco conductor por otro con material superconductor. El superconductor magnifica los efectos obtenidos con el rotor conductor y es susceptible de estudiar con este nuevo rotor el efecto de levitación. El nuevo rotor de material superconductor puede ser suministrado por el ICMAB. Esto queda fuera del alcance de esta tesis, quedando su estudio para un trabajo posterior, posiblemente Joan Pallarés que desde 1996 trabaja en esta dirección en el propio ICMAB.