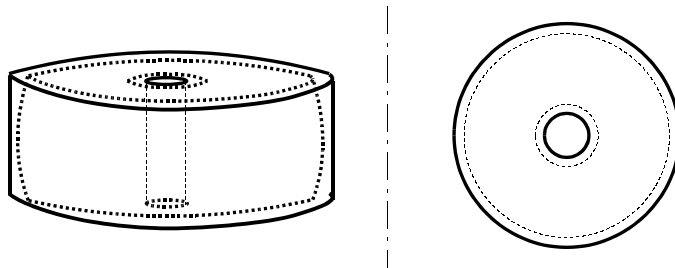


9.- PROTOTIPO P-4

9.1.- PROPUESTA N° 3 DE CAMINO DE CORRIENTE

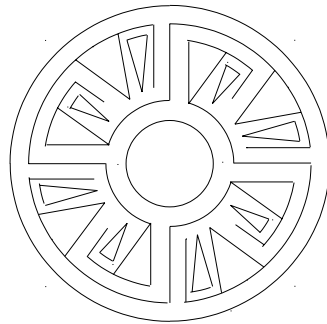
En el transformador toroidal utilizado como inductor se propone un 3^{er} plano activo.

Para optimizar el efecto de estas corrientes inducidas, se han realizado hasta el momento dos propuestas de camino de corriente, que ya han sido discutidas. De cualquier forma la finalidad de estas propuestas es observar y obtener el efecto de espira de sombra.



La primera propuesta presenta un problema de exceso de conductor en el plano en el que se inducen las corrientes. La segunda pretende evitar el exceso de conductor y presenta ventanas, dejando el conductor suficiente como para que la resistencia efectiva no sea muy alta.

De la experiencia de las dos propuestas anteriores se estudia un tercer caso en el que se hace incapié en el diseño de los caminos de corriente. Se definen unos subcircuitos cerrados cuya finalidad es la de favorecer la recirculación de corriente, en una espira cerrada, para presentar el efecto de espira de sombra:



Dibujo 9.1: Nueva propuesta de plano activo

Fotografías del transformador con el nuevo plano activo:

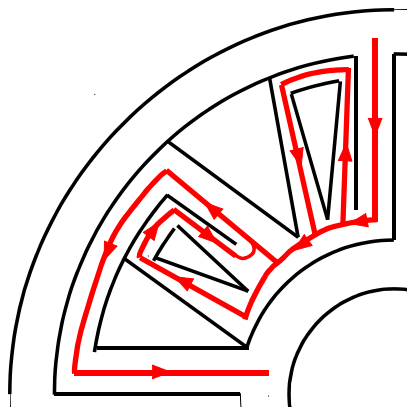


Foto 41: Plano activo n° 3. Se observan unos huecos grandes (ventanas) y otros más pequeños, que corresponden a las espiras de sombra

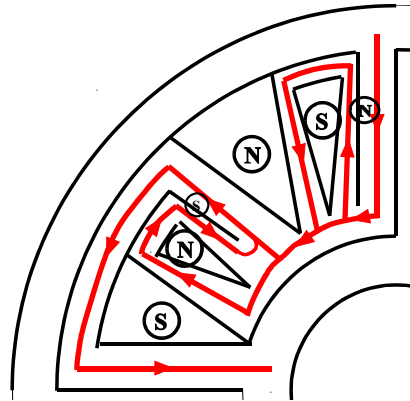


Foto 42: Transformador de corriente con la 3ª propuesta de plano activo. Se puede tener una idea relativa de su tamaño.

Camino conductor:



El proceso constructivo del nuevo inductor es complicado. La plancha circular consta de cuatro partes iguales que ocupan cada una de ellas 90 grados. En cada uno de estos cuadrantes se generan varios pares de polos magnéticos en función de la intensidad que se haya inducido en el conductor:



La necesidad de que el nuevo inductor tenga cuatro pares iguales, es debido a que cuatro es el mínimo número de circuitos eléctricos en paralelo para conseguir la autoelevitación rotórica.

9.2.- ESPIRAS EXPLORADORAS. BÚSQUEDA DE POLOS MAGNÉTICOS

El transformador recubierto con la espira metálica en cortocircuito es alimentado con la tensión de red. Un variavolt permite regular la tensión de alimentación. De esta forma es posible ir aumentando la corriente de alimentación y obtener una mayor corriente inducida sobre la espira exterior.

Sobre la superficie circular del conductor de cobre que recubre el transformador, se coloca una bobina circular de 20 espiras y 1.0 cm de diámetro, por lo tanto de 0.78 cm² de superficie. Esta espira exploradora se localiza en una posición concreta, a una distancia D del eje del plano activo.

El campo magnético creado por el flujo de dispersión del toro y el que genera la corriente inducida sobre el conductor que recubre el transformador, será un campo variable con el tiempo, ya que es generado por la tensión de red. Este campo inducirá una f.e.m. sobre la espira exploradora que permitirá obtener un orden de magnitud del campo magnético inducido.

La espira exploradora es coplanaria con la superficie circular del transformador y se desplaza 1 mm por encima de esta última, que sería el lugar ocupado por el rotor.

Por el devanado de alta del transformador, se hace pasar una corriente, ligeramente inferior a la intensidad nominal, de 0.8 A. Con esa intensidad de corriente se hacen diversas medidas con la espira exploradora para medidas orientativas de campo magnético:

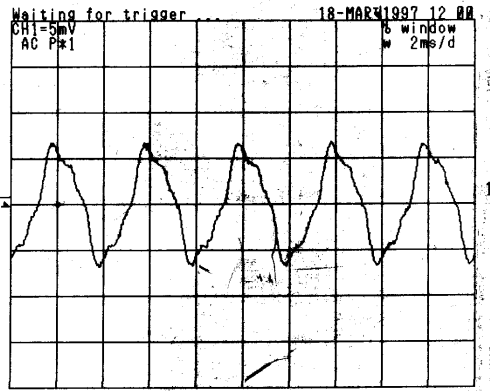
La tensión inducida en la bobina exploradora es producida por la variación de flujo magnético a través de la misma. La superficie de la bobina es paralela a la placa conductora, por lo tanto el campo magnético que detectará será el campo magnético perpendicular a la placa conductora:

$$\mathbf{B} = B_0(t) \mathbf{k}$$

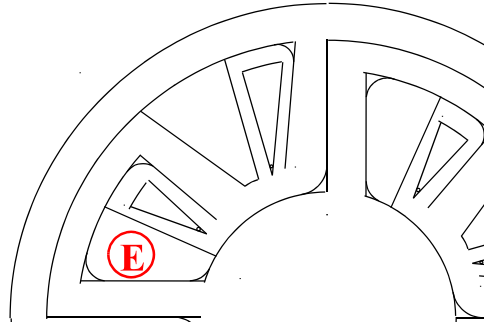
9.2.1.- DESPLAZAMIENTO RADIAL

El desplazamiento radial se realiza hacia el exterior, partiendo desde una ventana del plano activo.

9.2.1.1.-f.e.m. inducida en la espira exploradora situada sobre uno de los huecos.



Oscilograma 9.1. f.e.m. inducida



Posición correspondiente al oscilograma 9.1

Se calcula el campo magnético en este orificio. Se supondrá que el campo magnético de dispersión del toroidal es despreciable en comparación con el campo magnético generado por las intensidades inducidas en la placa. En el oscilograma 9.1 se observa que $V_{pp} = 14 \text{ mV}$, $V_{ef} = 5.0 \text{ mV}$.

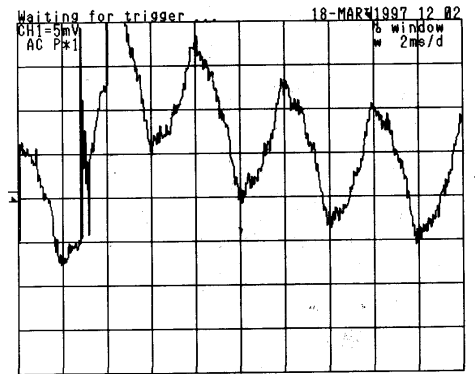
Aplicando la ley de Lenz:

$$g(t) = \frac{d(B \cdot S)}{dt} = \frac{d(B_{max} \cdot S \cdot N \cdot \cos(\omega t))}{dt} = B_{max} \cdot S \cdot N \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

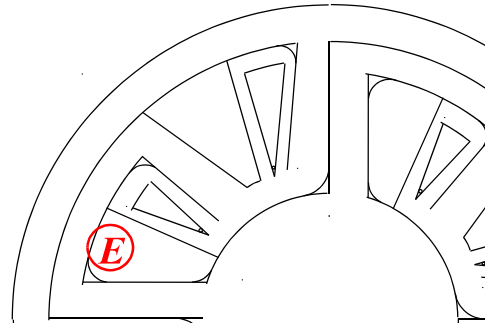
$$g_{ef} = \frac{B_{max} \cdot S \cdot N \cdot \omega}{\sqrt{2}} = \frac{B_{max} \cdot S \cdot N \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \cdot B_{max} \cdot S \cdot N \cdot \pi \cdot f$$

Por lo tanto, $B_{max} = \frac{g_{ef}}{\sqrt{2} \cdot S \cdot N \cdot \pi \cdot f} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 0.78 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot \pi \cdot 50} = 14.4 \text{ mT}$

9.2.1.2.- f.e.m. inducida en la espira exploradora al realizar un desplazamiento radial hacia el exterior desde la posición del apartado 9.2.1.1.



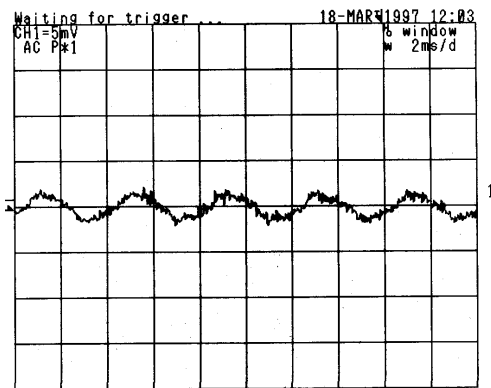
Oscilograma 9.2. f.e.m. inducida



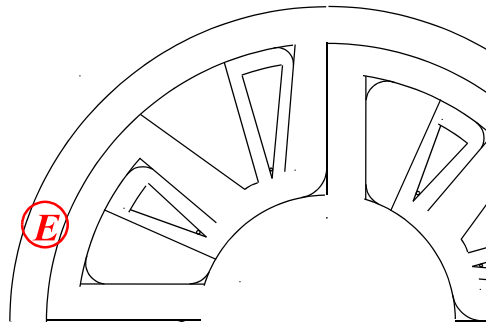
Posición correspondiente al oscilograma 9.2

En este punto, $V_{pp} = 15 \text{ mV}$, $V_{ef} = 5.3 \text{ mV}$. El valor del campo magnético generado es similar al del apartado 9.2.1.1; $B_{max} = 14.4 \text{ mT}$.

9.2.1.3.- f.e.m. inducida en la espira exploradora al realizar un desplazamiento radial en la posición más exterior del toroidal.



Oscilograma 9.3. f.e.m. inducida

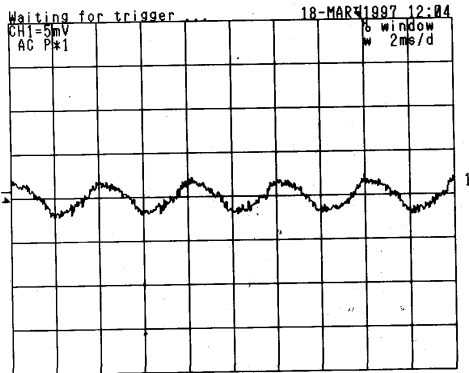


Posición correspondiente al oscilograma 9.3

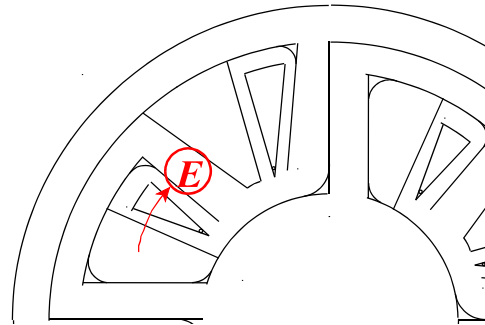
El valor de la tensión inducida en esta posición ($V_{pp} = 4.0 \text{ mV}$, $V_{ef} = 1.4 \text{ mV}$) ha decrecido ostensiblemente respecto a los casos 9.2.1.1 y 9.2.1.2. El motivo es que, aquí, el campo magnético es tangente a la superficie de las espiras que componen la bobina y la variación de flujo a su través es prácticamente nula. La componente del campo magnético perpendicular a la placa conductora, tiene un valor de 4.0 mT .

9.2.2.- DESPLAZAMIENTO CIRCULAR A RADIO CONSTANTE

El desplazamiento se inicia desde una ventana del plano activo, la misma posición que en caso 9.2.1.1. Se observa de nuevo que la señal de tensión inducida se atenúa al colocarse la espira sobre un tramo conductor:



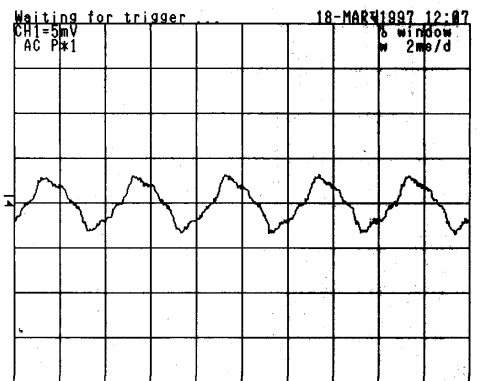
Oscilograma 9.4. f.e.m. inducida



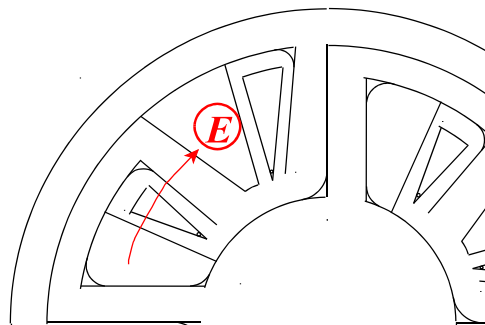
Posición correspondiente al oscilograma 9.4

La componente del campo magnético perpendicular a la placa conductora, tiene un valor de 4.0 mT.

f.e.m. inducida en la espira exploradora, continuando el desplazamiento a radio constante, en otro de los huecos sin conductor:



Oscilograma 9.5. f.e.m. inducida



Posición correspondiente al oscilograma 9.5

La f.e.m. inducida eficaz es de 2.12 mV, y le corresponde un valor de campo magnético perpendicular a la placa conductora de 6.0 mT.

Conclusiones:

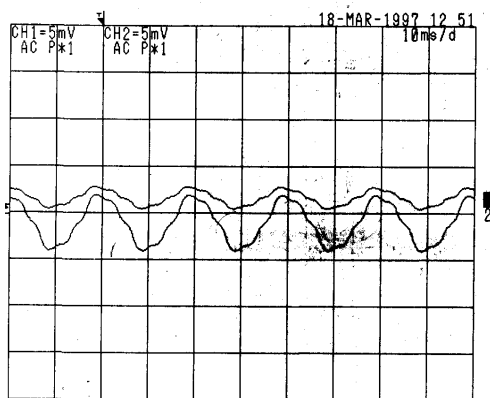
Se comprueba que las dos ventanas son las posiciones en las que las componentes perpendiculares del campo magnético tienen su valor máximo, en la ventana de partida con un valor mayor que en la otra. El mínimo de campo magnético se produce sobre los tramos conductores.

9.3.- BÚSQUEDA DE DESFASES

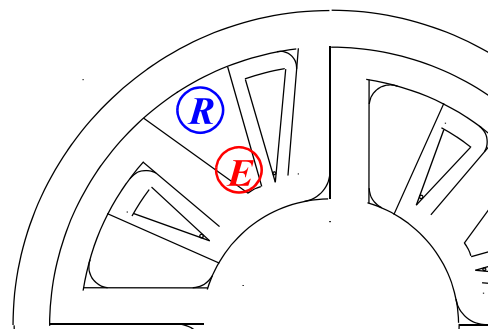
A partir de ahora, se utiliza una espira de referencia para observar la localización de diferentes polos magnéticos. Esto es, se buscan desfases entre la espira de referencia y la exploradora. La espira de referencia es idéntica a la exploradora, así la relación entre ellas es 1 / 1. En las figuras, la posición de la espira de referencia se especifica con una R.

Como sólo se buscan desfases relativos, la posición de la espira de referencia es indiferente y, de entre todas las posiciones posibles, se elige una en la que la lectura de la tensión de referencia sea apreciable.

Relación de las f.e.m. inducidas en las espiras exploradora (canal 1) y de referencia (canal 2). Se puede comprobar que ambas tensiones *se encuentran en fase*.

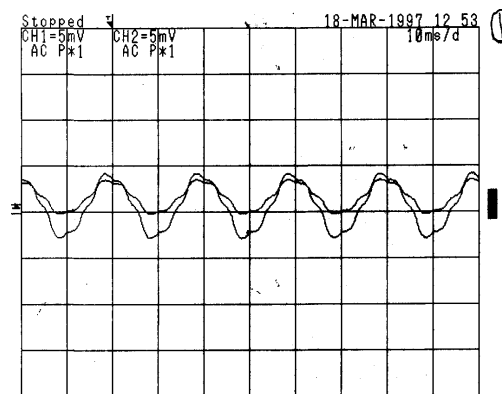


Oscilograma 9.6. Relación de tensiones entre las espiras exploradoras y de referencia.

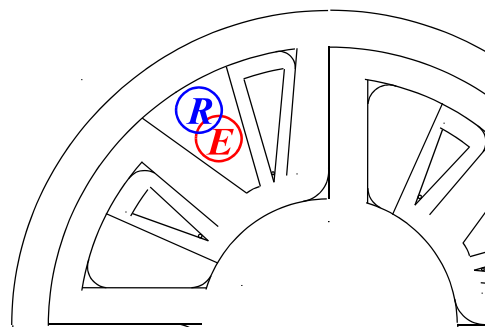


Posiciones de las espiras de referencia y exploradora en el oscilograma 9.6

Relación de las f.e.m. inducidas en las espiras exploradora (menor tensión pico a pico) y de referencia. Se puede comprobar que ambas tensiones se encuentran en fase.



Oscilograma 9.7. Relación de tensiones entre las espiras de referencia y exploradora.

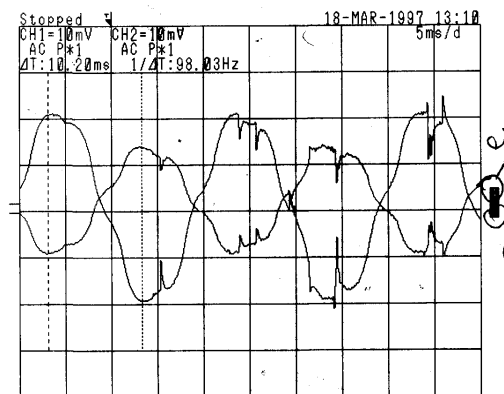


Posiciones de las espiras de referencia y exploradora en el oscilograma 9.7

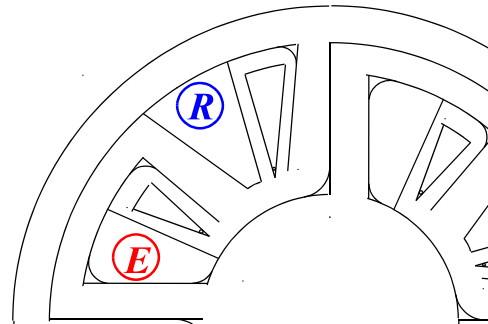
A continuación se eleva la corriente del transformador hasta 1.75 A por el devanado de alta. De esta forma es posible realizar mediciones mas fiables con las espiras exploradoras.

Relación de las f.e.m. inducidas en las espiras exploradora (menor tensión pico a pico) y de referencia.

En esta ocasión las tensiones se encuentran con un desfase de 180°.



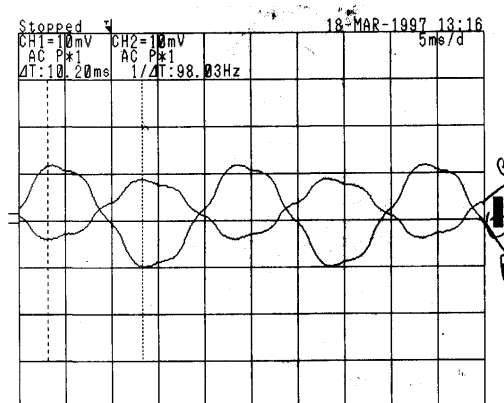
Oscilograma 9.8: relación de tensiones entre las espiras exploradoras y de referencia



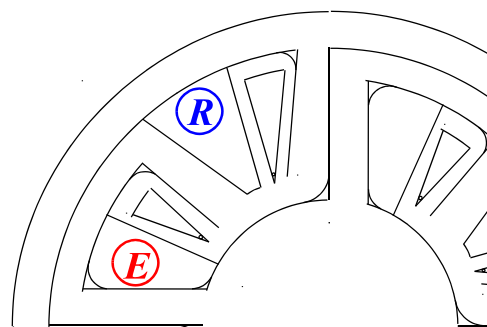
Posiciones de las espiras de referencia y exploradora en el oscilograma 9.8

Se da la vuelta al toro de forma que la placa conductora con los tramos conductores sea la base del toroidal. En esta posición, el transformador toroidal descende reduciendo la distancia con la placa conductora:

Relación de las f.e.m. inducidas en las espiras exploradora (menor tensión pico a pico) y de referencia. Las tensiones siguen teniendo un desfase de 180°.



Oscilograma 9.9: relación de tensiones entre las espiras exploradora y de referencia.



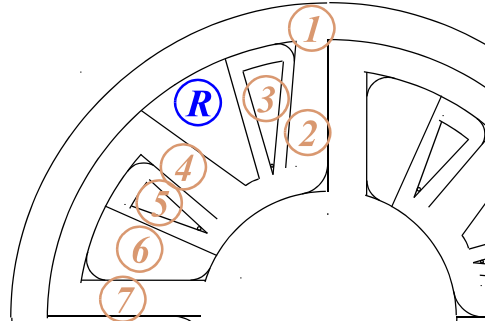
Posiciones de las espiras de referencia y exploradora en el oscilograma 9.9

La disminución de la separación del toroidal con la placa conductora no produce cambios significativos. Esto da a pensar que la dispersión del transformador no es importante en comparación con los efectos magnéticos de las intensidades inducidas.

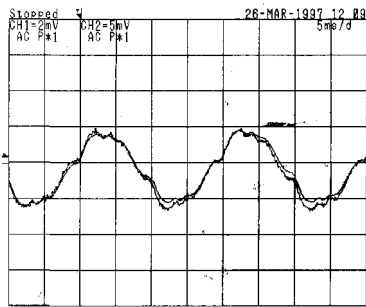
En el oscilograma anterior se observan los puntos de corte entre las tensiones de cada canal. Al realizar un barrido en un cuarto de la superficie circular del transformador, se observa como la tensión inducida pasa de máximo a mínimo sin cambiar la localización de estos puntos de corte.

Esto indica que no hay posibilidad de desfases diferentes de 0 o 180°, que a efectos de campo magnético, señala que sólo es posible obtener dos polos, Norte y Sur, que se encuentran fijos en posiciones concretas y no generan un campo magnético giratorio.

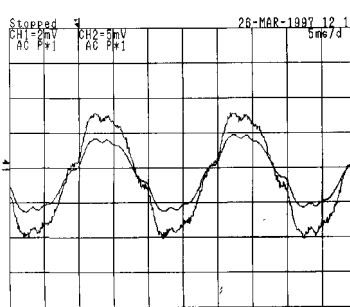
A continuación se muestra una figura de la cara circular y en ella se señalan las posiciones de la espira de referencia, con una R, y, con números, las diferentes posiciones en las que se hacen medidas de f.e.m. inducidas. Cada número corresponde a un oscilograma que a continuación presenta la tensión inducida respecto a la referencia:



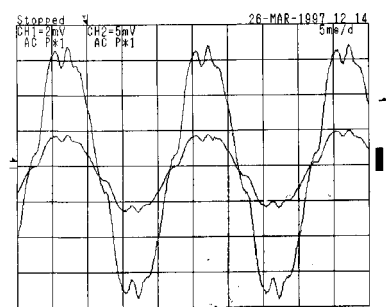
Esquema de diversas posiciones de la espira exploradora respecto a la de referencia.



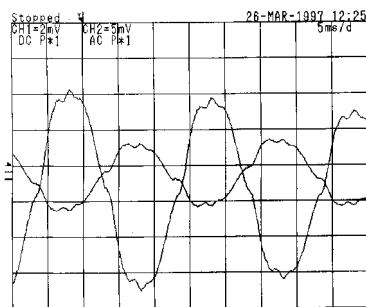
Oscilograma 9.10: Posición 1. Lecturas de la referencia y de la exploradora.



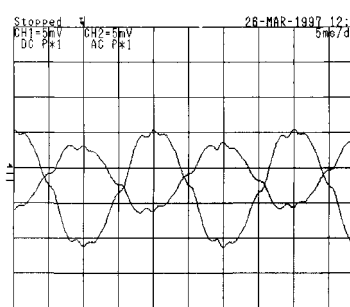
Oscilograma 9.11: Posición 2. Lecturas de la referencia y de la exploradora.



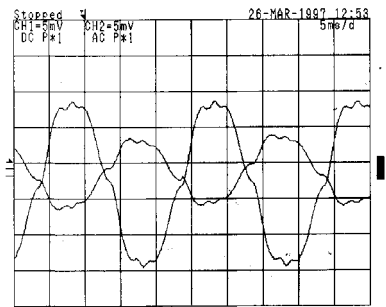
Oscilograma 9.12: Posición 3. Lecturas de la referencia y de la exploradora.



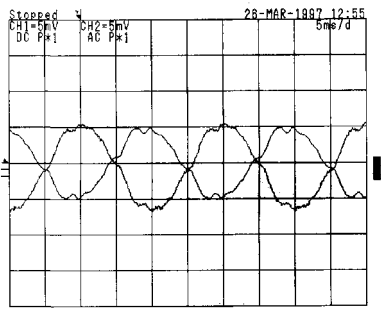
Oscilograma 9.13: Posición 4. Lecturas de referencia y de la exploradora.



Oscilograma 9.14: Posición 5. Lecturas de referencia y de la exploradora.



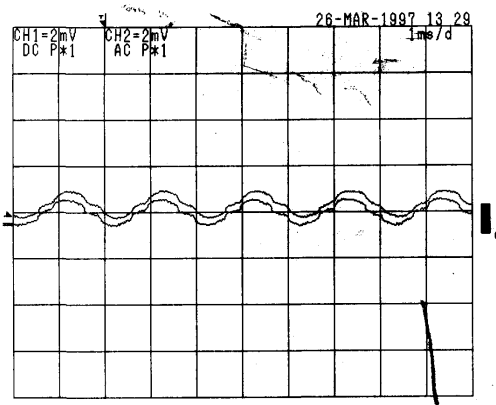
Oscilograma 9.15: Posición 6. Lecturas de referencia y de la exploradora.



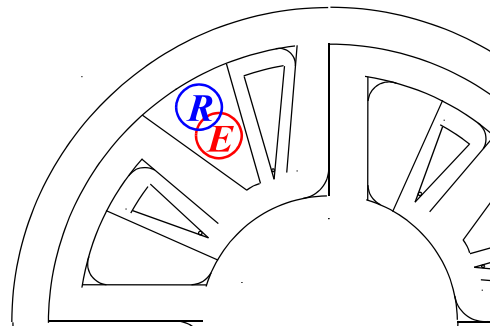
Oscilograma 9.16: Posición 7.
Lecturas de referencia y de la exploradora.

9.4.- PRUEBA DE FRECUENCIA

Se utiliza un generador de funciones para ver el efecto del aumento de la frecuencia en un factor 10. La intensidad de alimentación es muy baja, del orden de 10 mA. La bobina de referencia no cambia de posición respecto al punto 3. La bobina exploradora se encuentra junto a la de referencia en la misma ventana. Se observa un mínimo desfase, $\Delta\phi \cdot 18^\circ$, entre las dos lecturas:



Oscilograma 9.17: fuente con $f = 500 \text{ Hz}$



Posiciones de las espiras de referencia y exploradora en el oscilograma 9.17

Ante los resultados obtenidos hay que tener en cuenta que el diámetro de la espira exploradora puede ser demasiado grande, perdiendo así definición. Quizás sea necesaria la utilización de un aparato de medida más preciso que permita la medida en zonas de escasa superficie.

9.5.- MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE SONDA HALL

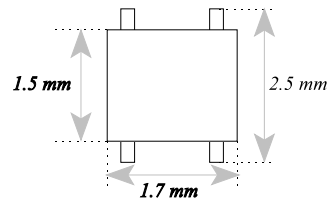
Los ensayos con el prototipo P-4 no resultaron ser todo lo satisfactorios que se esperaba. Las medidas de las espiras exploradoras no clarifican lo que ocurre en el plano activo del inductor secundario.

Para ver cómo actuaba este plano activo, se necesitan medidas más fiables y precisas. Estas medidas se podían obtener en el “Institut de Ciències de Materials de Barcelona” (ICMAB) en el que se dispone de un equipo de laboratorio adecuado para realizar mediciones de campos magnéticos estáticos axiales en todo un plano.

La necesidad de medir con precisión el módulo del campo magnético axial generado por superconductores llevó a la construcción por parte del ICMAB de este equipo. En esta ocasión el campo magnético a medir será el del prototipo P-4, aunque la técnica a seguir es similar a la utilizada con los superconductores¹.

Descripción del equipo de medición [12]: El equipo consta de una parte electrónica y otra mecánica.

En la parte electrónica destaca una sonda Hall THS118 de Toshiba de dimensiones 1.7*1.5 mm² de superficie, 0.6 mm de espesor y 0.0047 g de masa. Esta sonda permite una gran precisión para la localización espacial de la medida de campo magnético axial.



La sonda suministra una respuesta en tensión que depende de la temperatura. Se calibró para que se pudiera conocer el valor del campo magnético tanto a temperaturas próximas al ambiente como a temperaturas de nitrógeno líquido.

Características de la sonda:

	V_{offset} (mV)	Sensibilidad (V/T)
T = 273 K	2.2	0.81
T = 77 K	0.47	1.23



Foto 43: equipo de medición de campos magnéticos axiales. El equipo pertenece al ICMAB.

El campo mínimo medible es de 9.76 Gauss (a temperatura ambiente). El campo de offset nominal es $B_{\text{offset}} = 32.5$ Gauss.

¹ El Departament d'Enginyeria Elèctrica y el Institut de Ciències de Materials colaboran científicamente desde el año 1996 en que les fue concedida una ayuda por la CICYT, en un proyecto coordinado para el desarrollo de dispositivos para aplicaciones electrotécnicas de la superconductividad -ref. MAT 96-1052-c04-03-. Esta tesis se encuadra en estos trabajos.

La respuesta en tensión se gestiona por un sistema informático consistente en un ordenador con una placa de adquisición de datos. En cada posición en la que se quiere medir el campo magnético, se obtienen 800 medidas (en tan solo 40 ms) que posteriormente se tratarán de forma adecuada.

Mediante programación, la placa de adquisición de datos gobierna un pequeño motor (paso a paso) que permitirá variar la posición de la sonda Hall. El movimiento del motor produce una rotación de la sonda Hall alrededor de un eje, dando lugar a la obtención de las medidas de campo magnético en una vuelta completa, a una distancia concreta y constante del eje del sistema.

La distancia al eje puede variarse de una medición a otra, pero permanece fija en un proceso de adquisición durante la vuelta y media que realiza.

El movimiento de rotación está definido de forma que se dé vuelta y media, realizando lecturas en 436 posiciones supuestamente equiespaciadas. Por lo tanto se realiza una lectura cada $3\pi/436 = 0.0216$ radianes = 1.2° . La separación entre puntos es suficientemente pequeña como para permitir interpolar posteriormente los puntos intermedios.



La parte mecánica consta, a parte de los soportes rígidos que sustentan el sistema, de dos nonius perpendiculares entre sí definiendo un plano paralelo al plano activo. Los nonius permiten colocar el eje de giro en la posición deseada con una precisión de décima de milímetro.

En el eje mecánico hay un potenciómetro que transmite una señal de tensión, a la placa de adquisición, en función del ángulo descrito por el eje del sistema. El potenciómetro tiene una variación lineal al ir girando el eje, y por lo tanto la señal de tensión que suministra también varía linealmente. Este registro permite tener localizada perfectamente la sonda Hall, por si hubiera algún tipo de rozamiento o deslizamiento que descolocara la sonda de la posición que le correspondería. Para tener siempre perfectamente localizada la sonda, se toma también vía ordenador la lectura del potenciómetro en cada uno de los 436 puntos que se toman.

También hay una rosca que posibilitará el movimiento axial del eje para adecuarse a la altura del elemento que se pone a medir.

Foto 44: prototipo preparado para realizar la toma de datos con el equipo de medición.

La parte más complicada de la medición es el ajuste de la sonda para compensar los tres efectos siguientes:

- 1.- la separación entre la sonda y el plano activo sea uniforme en todo el proceso de medida.
- 2.- la separación entre sonda y plano sea la mínima posible, ya que el valor del campo magnético depende fuertemente de la separación.
- 3.- El calor desprendido por la lámina conductora no deteriore la sonda ni entorpezca el proceso de medición a causa de las dilataciones producidas.

Una vez el sistema se ha ajustado, se realizarán medidas a diferentes temperaturas.

9.5.1.- MEDIDAS REALIZADAS

Con el prototipo, se querían obtener, no solo valores de campo magnético axial, sino también posibles desfases entre diferentes posiciones del plano activo. Y ésta era la parte más complicada. Es preciso tener una referencia respecto a la cual poder evaluar estos desfases.

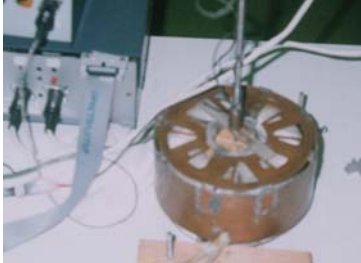


Foto 45: Colocación del prototipo sobre el equipo de medida.

La idea básica consiste en medir en cada posición concreta, de las 436 que tiene un recorrido, la tensión inducida en la sonda Hall por la variación del valor del campo magnético axial.

Recordaremos que sobre el inductor secundario circulan corrientes generadas por la variación del flujo magnético que atraviesa el transformador toroidal. Las corrientes tendrán la misma frecuencia que el campo que las genera, y a su vez, el campo magnético creado por estas corrientes inducidas, también tendrá la misma frecuencia.

Anteriormente se ha indicado que en cada una de las posiciones en las que se realiza lectura, se toman 800 medidas de tensión en unos 40 ms, esta rapidez en la toma de datos permite seguir la forma de la curva de tensión, que será prácticamente senoidal.

Volviendo al problema de la referencia para medir desfases, se entendió que bastaba con tomar una señal de referencia de la propia red (transformada a 5 V) e intercalar con cada una de las 800 medidas, una medida de la tensión de red. Cada uno de los 436 puntos de medida generarían 800 datos del campo a medir, 800 datos de la referencia, y un dato de la posición.

Esta práctica permite obtener la curva de la señal de red en cada punto de medida. Comparar las curvas de red y la curva en el punto a medir, e identificar los desfases. De esta forma, cada posición en la que se tomaba un dato de campo magnético, llevaría asociada un desfase con la señal de referencia.

La intensidad de corriente que alimenta el transformador toroidal es de 5.5 A

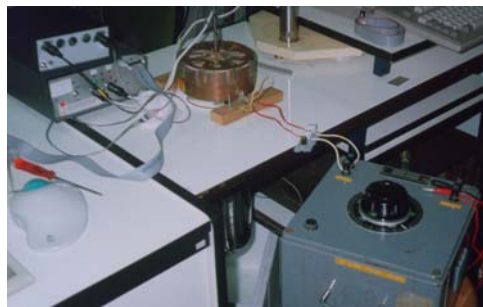


Foto 46: Sistema de alimentación del P-4 mientras se realiza la toma de datos.

9.5.1.1.- Temperatura ambiente

Se ajusta el sistema y se coloca la sonda a una distancia del eje de giro. Se realiza una tanda de medidas que consiste en dar una vuelta y media alrededor del eje, obteniéndose datos de 436 puntos.

A continuación se muestra un ejemplo de trayectoria que realizó la sonda Hall.

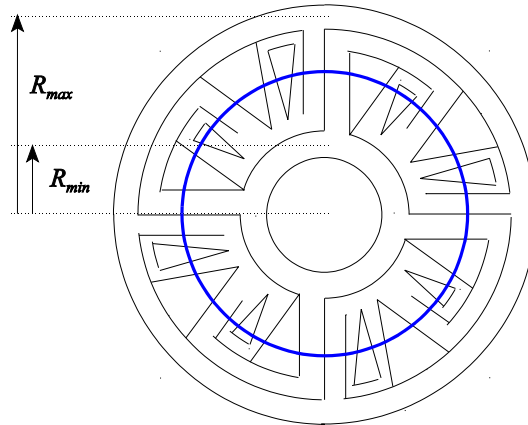


Figura 9.1: Muestra del recorrido que realiza la sonda sobre el plano activo en una tanda de medidas.

Los datos obtenidos se trataron con un programa comercial de tratamiento matemático con grandes posibilidades gráficas (MATLAB).

Ejemplo de lectura de la sonda en un punto de medida:

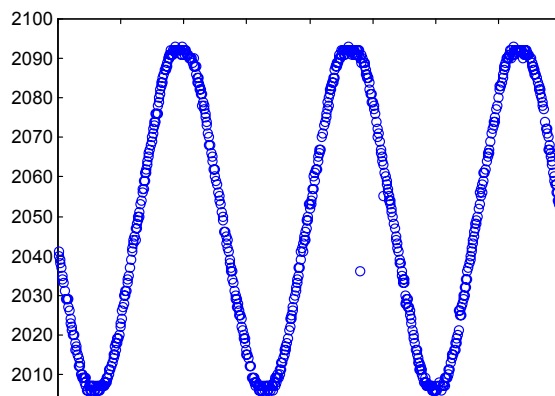


Figura 9.2

En el eje horizontal se representa de 0 a 800 el orden de la medida que se realiza.

El eje vertical debería mostrar el valor de la componente axial del campo magnético pero todavía no se han realizado los factores de conversión.

El primer tratamiento que se realiza es eliminar el off-set de cada representación. A continuación se halla la amplitud de la curva.

Ejemplo de lectura de la referencia en este mismo punto:

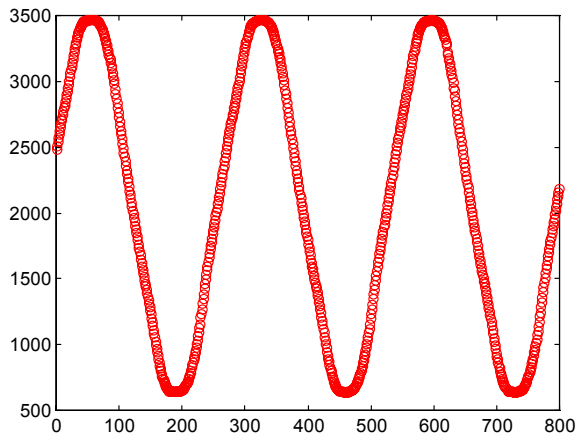


Figura 9.3

Se puede comprobar la diferencia de fase entre esta representación y la anterior. Sin embargo, lo que interesará comprobar es si esta diferencia de fase es diferente o no en otros puntos de medida.

En el eje vertical tampoco se ha realizado factor de conversión alguno, aunque en realidad la magnitud de esta gráfica no tendrá ningún interés.

Así, para cada posición, se obtiene la evolución de la señal de campo magnético axial y, simultáneamente, la señal de referencia. Con el mismo programa que se utilizó para realizar la representación

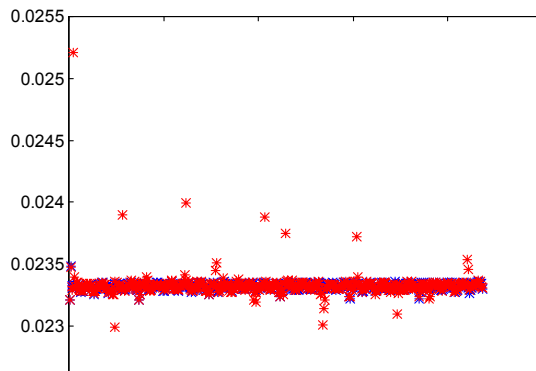
gráfica, se usa una opción de ajuste de puntos experimentales a una curva matemática.

Vista la forma de los puntos experimentales, se ajustan los puntos experimentales a una curva del estilo:

- $B(t) = B_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$ - para la sonda Hall -.
- $V = V_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$ - para la señal de referencia -.

Los valores a ajustar en cada caso son dos: la frecuencia angular y la constante de fase.

Los resultados deberían ser congruentes, ya que la frecuencia angular debería ser la misma, o muy próxima, en todos los casos. El resultado fue esperanzador, ya que efectivamente no hubo dispersión en los valores de la frecuencia angular.



En la figura 9.4 se representan los valores de ω obtenidos en los 436 puntos, tanto para la medida (rojo) como para la referencia (azul).

La coincidencia de los valores hace que los datos -alrededor del valor 0.02335- se superpongan. Por ello casi no se ven los datos de la referencia.

Figura 9.4: representación de los valores resultantes del ajuste de la variable ω .

Una vez realizado el ajuste, el desfase (δ) entre la medida y la referencia será:

$$\delta = \varphi - \phi$$

El valor de este desfase dará la importante información del sentido de la línea de campo magnético, de si es ascendente o descendente.

Las dos gráficas siguientes muestran el desfase (δ) y el coseno del desfase ($\cos \delta$) respectivamente,

siempre en función del punto de medida.

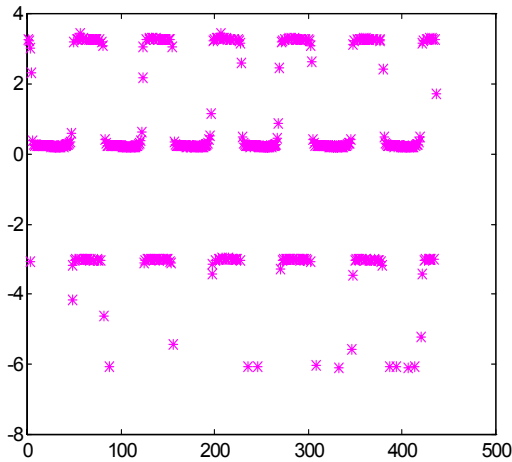


Figura 9.5: representación del desfase entre la medida y referencia.

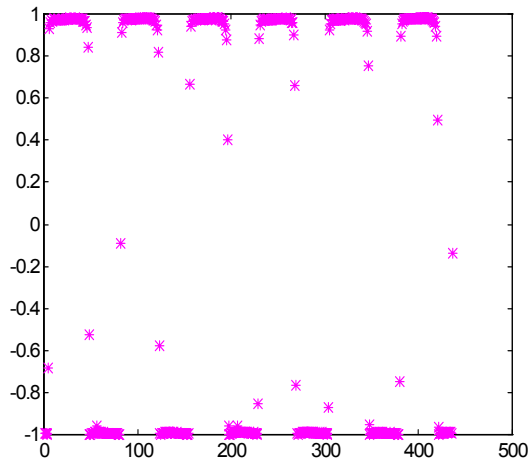


Figura 9.6: representación del coseno del desfase, $\cos(\delta)$.

En la figura 9.5, se observa que la diferencia de fase tiene básicamente tres valores: cero, π , ó $-\pi$.

Que el desfase dé un resultado de π positivo o negativo es debido al proceso de ajuste. Para solventar este imprevisto, basta con realizar la representación del coseno del desfase, y se observa que la gran mayoría de valores están comprendidos en 0 o 1 (fig. 9.6).

Si se tiene entonces en cuenta el desfase, y la magnitud del campo magnético medido, se obtiene la siguiente gráfica:

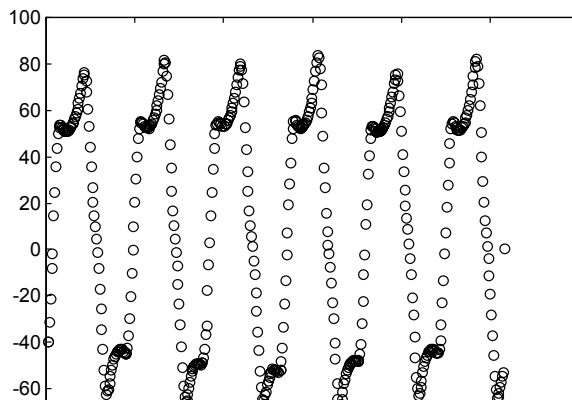


Figura 9.7: Resultado estándar del barrido de la sonda en un recorrido. Este barrido corresponde a un radio $R=38$ mm.

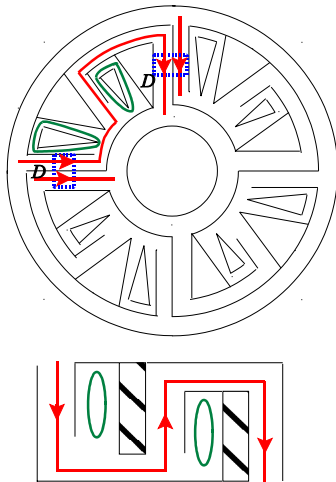
La igualdad de los picos de campo indican la gran simetría lograda en el proceso de construcción y por lo tanto la igualdad de corrientes inducidas que pasan por cada uno de los bloques, prueba del gran trabajo realizado en el proceso de construcción por parte del señor Santiago Pardos.

En la figura 9.7 se representan 512 puntos, cuando en un principio sólo se han tomado 436 datos. La causa

es una interpolación hasta 512 puntos, por si fuese necesario realizar alguna transformada de Fourier.

Con esta estructura se ha conseguido eliminar la problemática de las conexiones evidenciada en la primera parte de este trabajo (P-1), incluso con una elaboración artesanal.

Interpretación de la gráfica:



Como se puede observar en la figura 9.8, el plano activo está formado por cuatro cuadrantes idénticos. Cada uno de estos cuadrantes cubre 90°. En color rojo se señala el camino seguido por la intensidad. En color verde se indica la circulación de corriente esperada del apartado destinado a espira de sombra.

Cuando la sonda en su recorrido circular de vuelta y media pasa por encima de un tramo conductor. Recordamos que la corriente de un conductor crea líneas cerradas de campo, que se pueden aproximar a circunferencias centradas en el conductor.

En el instante en que la sonda se encuentra justo encima del conductor, la componente axial del campo, es nula. Y a partir de esa posición, al alejarse, el valor del campo empieza a aumentar, en valor absoluto, hasta un valor máximo, que correspondería a una posición de la sonda intermedia entre dos conductores con corrientes opuestas en sentido.

Figura 9.8

Cada uno de los bloques presenta un pico de campo magnético positivo y otro negativo. En la figura 9.7 hay seis picos positivos y seis negativos. Ello es a causa de que la sonda hall hace un recorrido de vuelta y media, barriendo seis cuadrantes como el anteriormente definido.

A la hora del estudio, basta con quedarse con cuatro parejas de picos consecutivas.

Al pasar de un máximo a un mínimo o de un mínimo a un máximo, se hace de forma lineal pero con pendientes, prescindiendo del signo, diferentes. En valor absoluto, la pendiente de subida es mayor que la de bajada.

Esto indica que el proceso de bajada, que es mas largo, es aquel en el que la sonda hall pasará por el tramo de conductor mas ancho (zona D en la figura 9.8).

La deformación en los picos (máximo o mínimo) es por el efecto de circulación de corriente en los bucles cerrados, pero parece que no es el mismo fenómeno que la espira de sombra.

Los bucles realizados al efecto de actuar como espira de sombra, o bien son muy resistivos y la intensidad que por ellos circula es muy baja, o bien la inductancia del apartado es nula. Es un efecto que cabe estudiar con más detalle en trabajos posteriores.

9.5.1.1.1.- Mapas de campo magnético del plano activo

Con los datos obtenidos se realiza un tratamiento de datos que permita visualizarlos todos a la vez. Ello es un problema bastante grande, ya que la posición inicial de cada recorrido no tenía por que coincidir con el resto de medidas, y de hecho el final del recorrido cada vez era diferente.

Este problema conjuntamente con un pequeño desajuste del potenciómetro, hizo sopesar la posibilidad de no presentar las gráficas que se mostrarán mas tarde.

Fue necesaria alguna interpolación para obtener una tabla en la que cada fila correspondiera a los datos obtenidos en un radio concreto. El gran problema fue pasar de esta tabla (cartesiana), a otra (radial) en la que la representación permitiera visualizar el campo generado por el plano activo:

En la figura 9.9, los diferentes colores indican la intensidad del campo magnético.

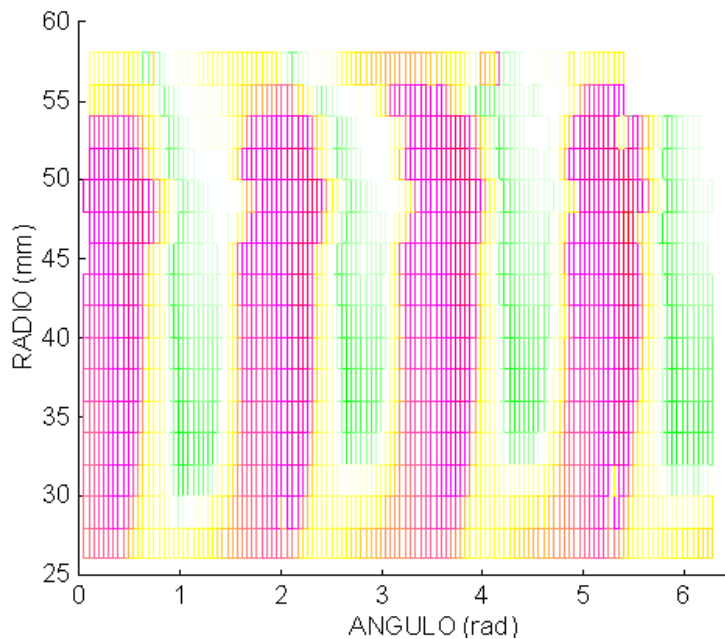


Figura 9.9: Distribución del campo magnético en función del radio y del ángulo.

Los colores indican la variación del valor del campo magnético. En verde los valores más negativos, en blanco los valores próximos a cero, aumentando a valores positivos con amarillo y rojo en el máximo.

Los tramos en blanco, que indican valor de campo magnético cero, señalan los tramos conductores por los que circula la corriente.

Esta representación muestra efectivamente la existencia de cuatro pares de polos, que corresponden a los cuatro cuadrantes idénticos que conforman el plano activo.

Pero esta no es la representación más acertada desde el punto de vista demostrativo, ya que se debe hacer un esfuerzo para ver, en este dibujo, el plano activo circular.

Para solventar este contratiempo, se transforma la tabla de valores a partir de la cual se obtiene la figura 9.9 en otra que permita visualizar los resultados tal y como corresponden a su posición física real.

Una vez realizadas las transformaciones pertinentes, se está en disposición de representar un mapa de contorno de curvas de valor de campo magnético constante. Son las curvas de isocampo. El resultado es la figura 9.10, en ella cada color indica un valor de campo magnético concreto:

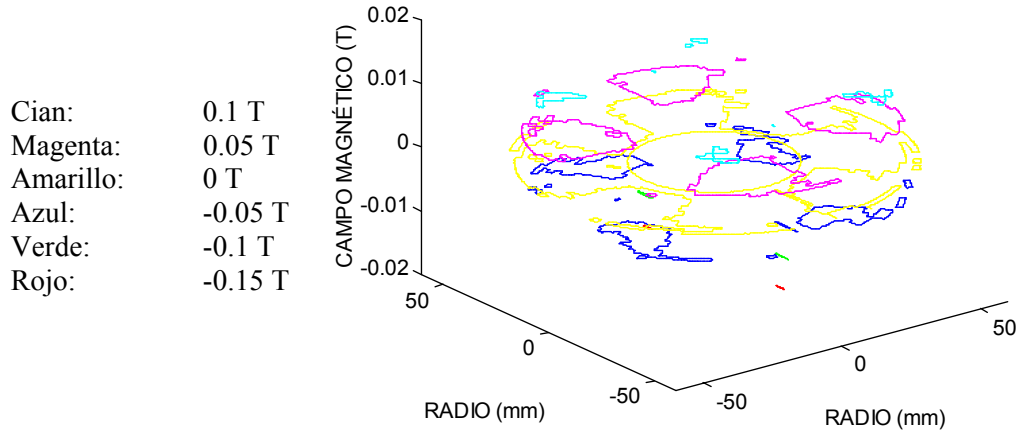


Figura 9.10: Líneas de contorno con valor de campo constante.

Si se realiza una vista axial de la figura 9.10, los contornos que generan las líneas de isocampo dan como resultado un dibujo que se puede comparar con el croquis del plano activo en el que se reconocen todas las zonas del mismo. El resultado se muestra en la figura 9.11:

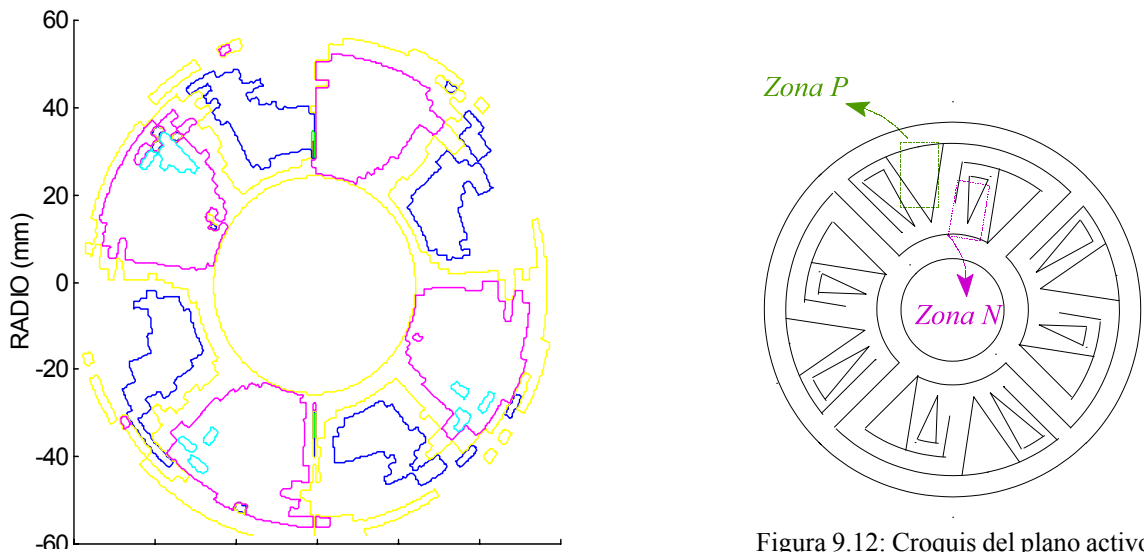


Figura 9.12: Croquis del plano activo

Figura 9.11: vista axial de las líneas de isocampo.

Se debe señalar que en las figuras 9.10 y 9.11, por limitaciones gráficas del programa utilizado, los colores no corresponden a lo que se explicó en la gráfica 9.9.

De las figuras 9.11 y 9.12 se puede comprobar que en amarillo (campo nulo), se muestran los caminos de corriente. La forma que tiene la figura 9.11 corresponde a la que tiene el croquis de la figura 9.12, donde se puede observar el espaciado de las ventanas que el plano activo tiene.

No obstante, se puede hacer una representación espacial del campo magnético donde se corrobore que el mapa de campo magnético presenta una correspondencia indiscutible con el croquis del plano activo:

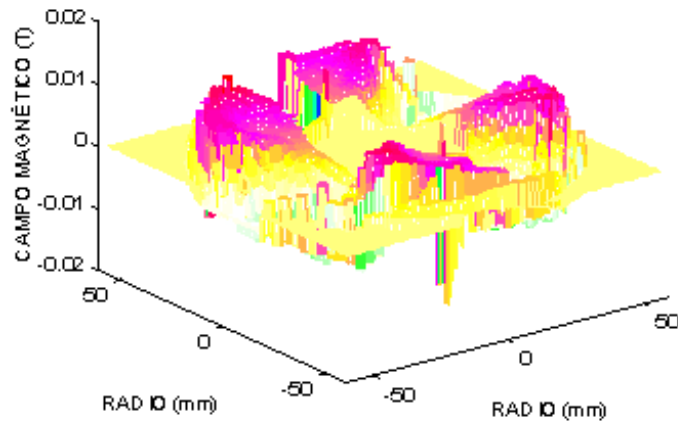


Figura 9.13: Desfases del campo magnético. El dibujo espacial muestra los dos polos magnéticos, unos emergentes y otros hundidos.

La figura 9.13 visualiza la distribución espacial de los polos magnéticos. Se intuyen ocho polos. Cuatro polos son emergentes, en rojo en la figura, y los cuatro restantes, en verde, están hundidos al estar desfasados 180° respecto a los anteriores.

A partir de la figura 9.10 y 9.13 se puede constatar que los valores de campo magnético obtenidos en el apartado 9.2 con las espiras exploradoras son del mismo orden de magnitud que los obtenidos con la sonda hall.

Una visualización axial de la figura 9.13, permite comprobar la alternancia de los polos magnéticos y la bondad del sistema de medida utilizado para observar los efectos de las espiras en cortocircuito o caminos de corriente que presenta el plano activo, tanto en el caso que se está estudiando como planos activos futuros.

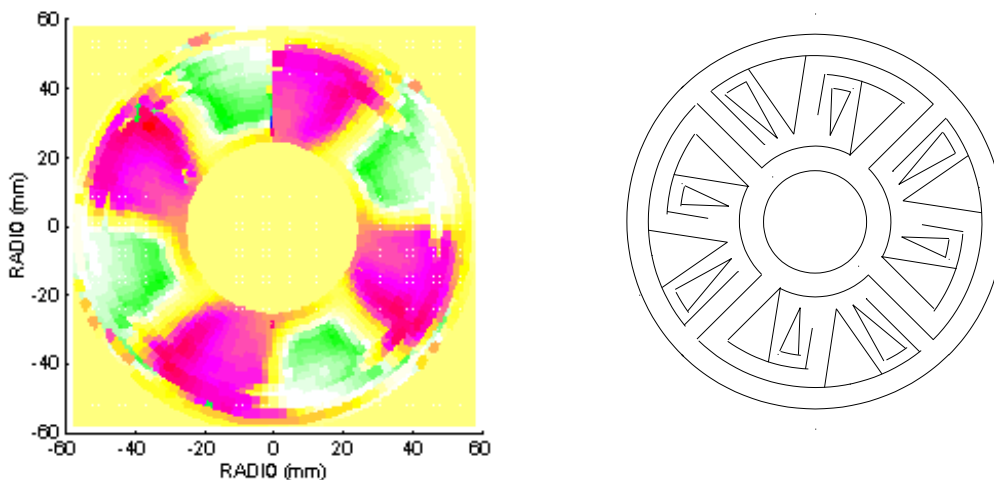


Figura 9.14: Vista axial del mapa de campo magnético.

En la figura 9.14 hay dos colores bien diferentes, el verde, que corresponde a los valores de campo negativos (los polos hundidos de la figura 9.13), y por otro lado el magenta y rojo, que corresponde a los valores más elevados del campo.

En los polos caracterizados por el color rojo, no se puede observar una variación del tono rojo que identifica la zona donde el campo magnético presenta un máximo. Para evidenciar esta realidad, repetiremos la figura 9.14 con una jerarquía de colores diferentes que permita localizar estos máximos:

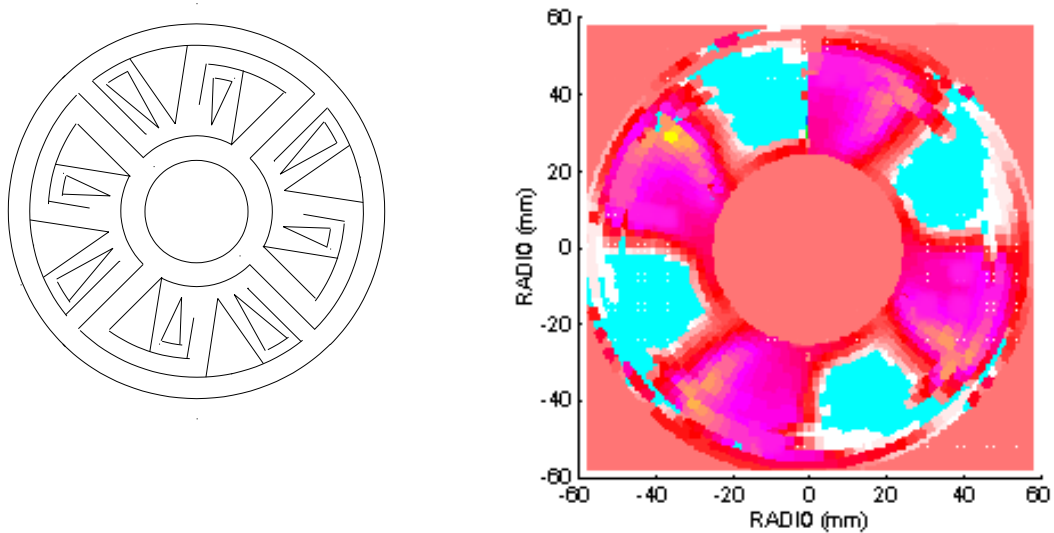


Figura 9.15: Mapa de campo magnético con otros colores.

Aquí se comprueba que en los polos caracterizados por el color rojo hay un cambio de color hacia el naranja, e incluso el amarillo. Estos puntos corresponden a los valores máximos de la inducción magnética (recordar figura 9.7).

Se comprueba la existencia de dos polos magnéticos bien diferenciados. Entre los polos magnéticos se observa una separación de diferente color. Esta separación es precisamente el tramo conductor. La componente axial de campo magnético justo encima de estos tramos es teóricamente nula. por lo tanto el color de estos tramos es el que corresponde a un valor de campo magnético cero.

Para poder referirnos a cualquiera de ellos con independencia del otro, se utilizará la nomenclatura habitual y se denominará a uno positivo y al otro negativo.

Será negativo aquel polo definido por valores negativos de la inducción magnética según la figura 9.7 y por lo tanto el polo positivo es aquel cuyos valores de inducción magnética son positivos según la misma figura.

Los valores más elevados del polo negativo se observan de verde fuerte en la figura 9.14 y los máximos de los polos positivos se muestran en naranja o amarillo en la figura 9.15.

Para localizar la posición relativa de los máximos de los polos positivos respecto a los máximos de los polos negativos, se llevará a cabo otra representación (y será la última) en la que la jerarquía de colores nos permitirá diferenciarlos:

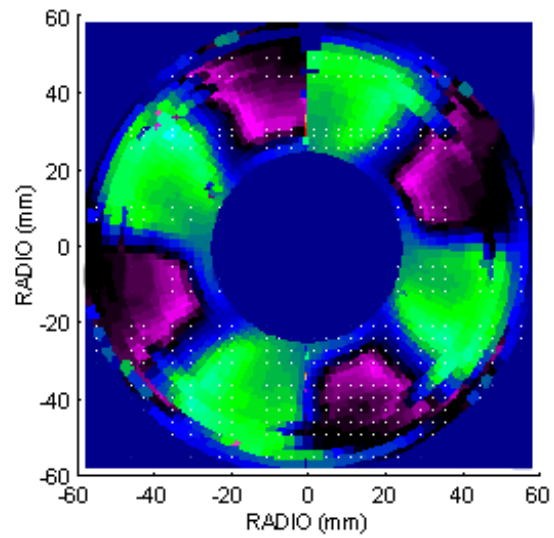
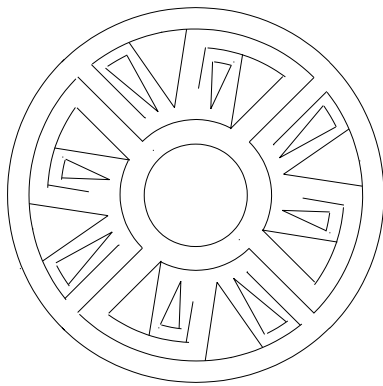


Figura 9.16: Mapa de campo magnético en el que se diferencian los máximos de cada polo.

En verde claro intenso están los máximos de los polos positivos y en lila los máximos de los polos negativos.

Los polos positivos y negativos corresponden a las posiciones P y N, respectivamente, explicitadas en el croquis de la figura 9.12.

9.5.1.2.- Temperatura del nitrógeno líquido

Se realizan las mismas medidas que en el apartado anterior, pero en esta ocasión a la temperatura de nitrógeno líquido. En esta prueba, la intensidad de corriente de alimentación es de 5.0 A.

Se quiere señalar que con anterioridad al ensayo que ahora se trata, se realizó una prueba en la que el prototipo se refrigeró a la temperatura de nitrógeno líquido y se alimentó con una intensidad superior a los 5 A. La intensidad no pudo ser medida ya que no se disponía en ese preciso instante de un aparato de medida, aunque se estima que la alimentación sería del orden de los 50 A. En estas condiciones, si se colocaba un elemento conductor con forma de disco sobre el plano activo, se producía una fuerza de repulsión sobre el plano que está en el orden de los 4 kp. Es una reacción muy fuerte que vale la pena estudiar, pues consigue con conductores usuales efectos similares a los de los superconductores.

En la prueba se desea comprobar, además, el efecto de los bucles cerrados.

Se comparará en primer lugar la distribución de campo que se origina. Se trata de la medida realizada en la posición $R = 38$ mm, equivalente a la figura 9.7:

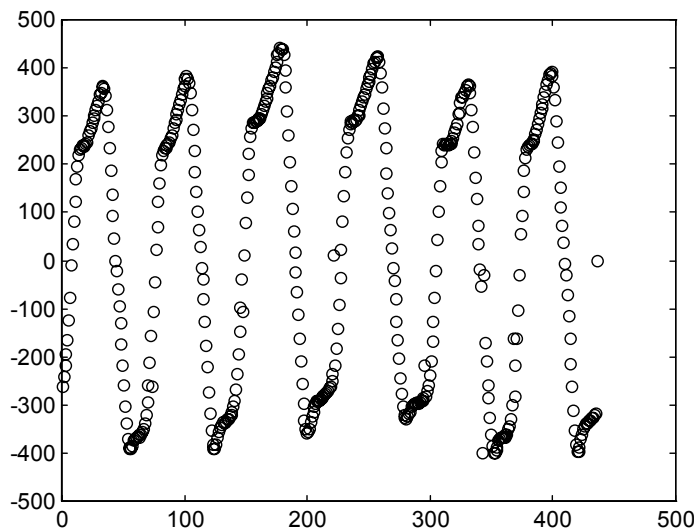


Figura 9.17: Resultado del barrido de la sonda a una distancia de 38 mm del centro.

Se puede comprobar que los picos no están tan distorsionados como en la figura 9.7. Ello es debido a que el efecto de los bucles cerrados es menos importante que a temperatura ambiente. Se puede concluir que la impedancia del bucle a 77 K es demasiado elevada y no afecta de igual forma que a la temperatura ambiente.

Respecto a la figura 9.17 hay que señalar dos aspectos:

- 1.- Los valores del eje y están todavía sin ajustar mediante el factor de conversión pertinente, pero se puede comprobar que la lectura realizada da valores cuatro veces superior a los de la figura 9.7.
- 2.- La posición de la sonda en este caso no tiene por qué coincidir con la posición inicial en el caso de las medidas a temperatura ambiente.

Curvas de isocampo:

a.- vista en tres dimensiones:

Naranja: 0.03 T
 Cian: 0.02 T
 Lila: 0.01 T
 Amarillo: 0.0 T
 Azul: -0.01 T
 Verde: -0.02 T
 Rojo: -0.03 T

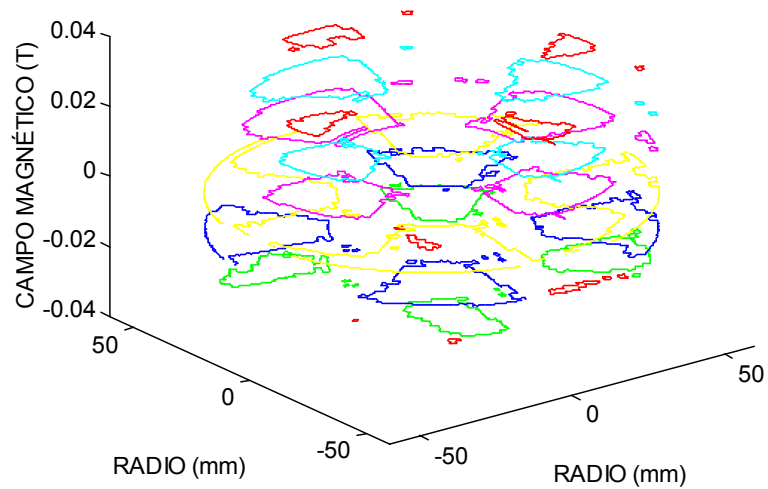


Figura 9.18: Líneas de contorno con valor de campo constante en el caso $T = 77$ K.

b.- vista axial:

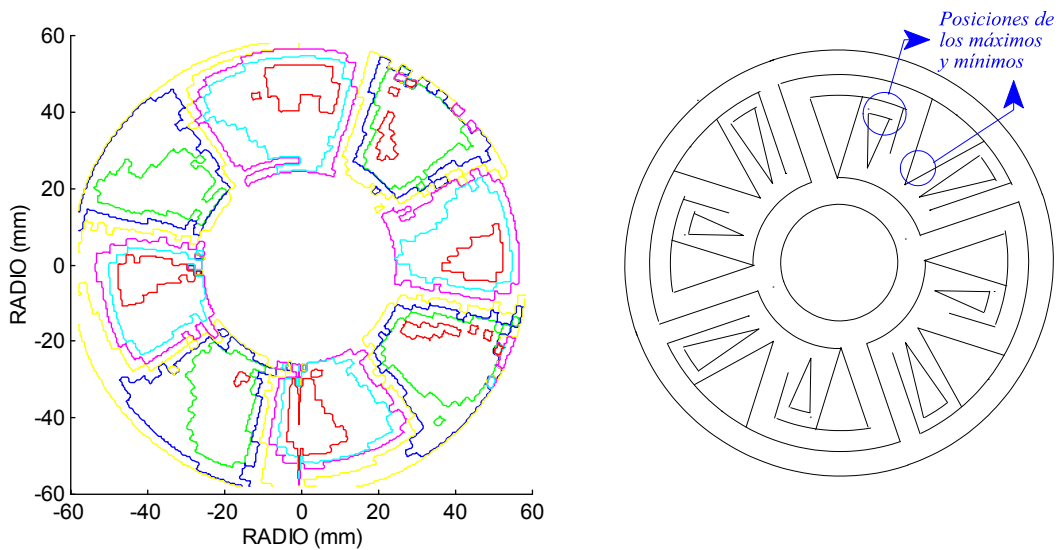


Figura 9.19: Vista axial de las líneas de isocampo en el caso $T = 77$ K.

Los valores más intensos corresponden a los colores naranja y rojo.

El valor de campo magnético obtenido indica que por cada camino del plano activo pase una corriente de unos 675 A. Como el prototipo presenta cuatro cuadrantes, por él circula una intensidad total de alrededor de los 2600 A.

Los máximos de cada polo se encuentran, físicamente sobre el plano, muy próximos entre sí. Ello puede hacer pensar que el resto del cuadrante no está siendo aprovechado.

Mapa de campo:

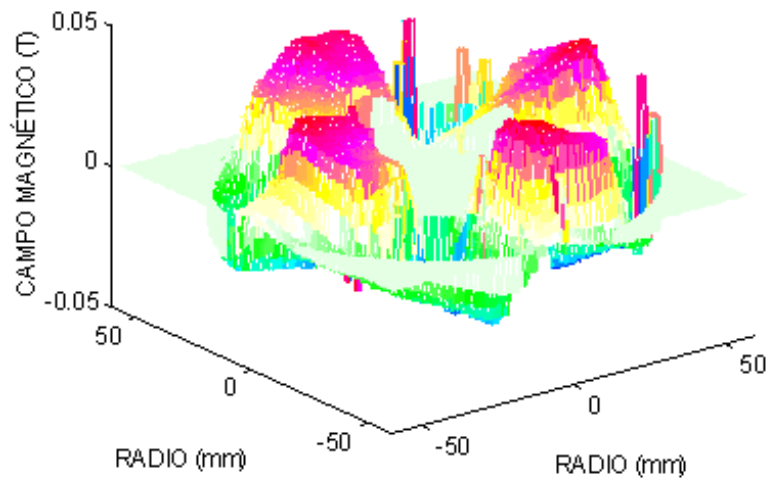


Figura 9.20: Dibujo espacial del campo magnético a T=77 K.

El color azul intenso indica dónde se encuentra máximo de un polo S. El color rojo intenso indica la posición de un máximo del un polo N. A continuación veremos mejor la distribución de los máximos:

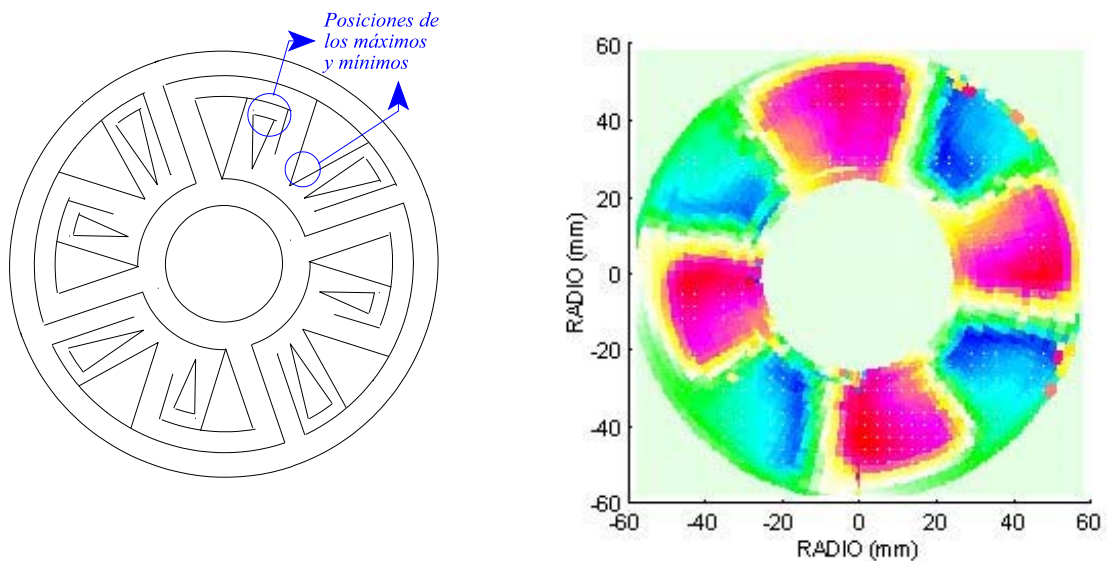


Figura 9.21: Vista axial del mapa de campo magnético.

Para concluir se puede afirmar que el equipo de medida con sonda hall es un fabuloso instrumento para obtener mapas y valores de campo magnético. Estos mapas pueden servir de referencia para diseñar de nuevo prototipos o planos activos en el caso que nos ocupa.

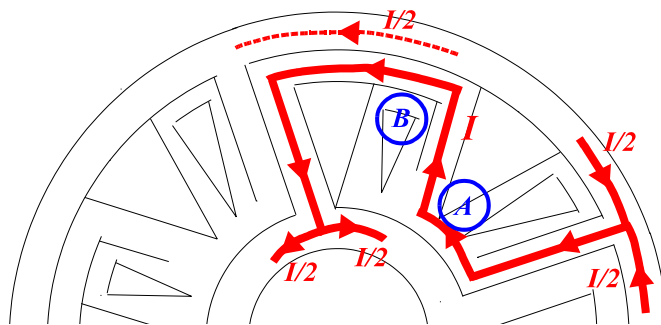
9.5.1.3.- Corrientes inducidas en el inductor secundario

Los campos magnéticos representados en los apartados 9.5.1.1 y 9.5.1.2. son creados por las corrientes que circulan por el inductor secundario que, recuérdese, no tiene componente ferromagnético alguno.

El campo magnético así generado, es a base de corriente. Sería interesante tener una referencia de, por lo menos, el orden de magnitud de las corrientes inducidas.

Se supondrá un camino de corriente sobre el inductor y se intentarán hacer las aproximaciones razonables para, conocido el valor del campo generado, hallar el valor de las intensidades que lo generan.

Una primera aproximación será que la principal contribución al campo generado es la corriente que pasa por el camino principal (en rojo en la figura 9.22).



Los máximos los polos norte y sur se encuentran en las posiciones A y B señaladas en la figura 9.22. A temperatura ambiente, el valor del máximo es del orden de 0.015 T, y pasa a ser del orden de 0.04 T en el caso estudiado a la temperatura de nitrógeno líquido.

Se supone que el campo es generado por las corrientes más próximas. El campo que crea una corriente rectilínea muy larga a una distancia r es:

$$B(i) = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

en el caso que se estudia, no hay conductores muy largos, por ello habrá que introducir un coeficiente c que ajuste la expresión en función del tamaño del tramo. El valor de c debe estar comprendido entre 0.3 y 0.5. Para los cálculos que a continuación se indican, se tomará el valor c=0.4.

A temperatura ambiente el valor del campo magnético es: B=0.015 T.

$$B(I) = \frac{\mu_0 \cdot I/2}{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^{83}} \cdot c \% \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^{83}} \cdot c \% \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}} \cdot c \% \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}} \cdot c$$

$$B(I) = \frac{\mu_0 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}} \cdot (I/10 \% I/4 \% I \% I) \cdot \frac{\mu_0 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}} \cdot \frac{47}{20} \cdot I$$

de donde se puede despejar I directamente: $I = \frac{20}{47} \cdot \frac{0.015 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}}{\mu_0 \cdot c} = 400 \text{ A.}$

PROTOTIPO P-4

Este es, aproximadamente, el valor de la corriente que pasa por uno de los cuatro cuadrantes que conforman el inductor secundario. La corriente total será del orden de los 1600 A.

A la temperatura de nitrógeno líquido, $B = 40 \text{ mT}$

Razonando de forma similar, la intensidad tendrá un valor: $I = \frac{20}{47} \cdot \frac{0.04 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{83}}{\mu_0 \cdot c} = 1050 \text{ A}$.

De esta forma por el inductor secundario, pasan unos 4200 A.

Si se supone un comportamiento ideal del conjunto como transformador, se puede afirmar que la transferencia de potencia del primario y del secundario es del 100%. Se puede hallar la caída de tensión sobre el inductor secundario así como la impedancia del conjunto:

$$220 \text{ W} = 1600 \cdot V; \quad V = 137.5 \text{ mV}$$
$$Z_{\text{inductor secundario}} = \frac{135. \text{ mV}}{1600 \text{ A}} = 86 \mu\Omega$$

En el capítulo 12 se realiza un cálculo teórico de la resistencia de un prototipo similar al P-4 y el orden de magnitud de la resistencia es equivalente al anteriormente obtenido, por ello se puede pensar que los valores de las corrientes obtenidas en este apartado se aproximan bastante a la realidad.