

ESTABLECIMIENTO DEL PATRÓN NACIONAL DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO

M. A. Escobar, M. P. García, J. U. Aguilar y A. Mejía
Centro Nacional de Metrología
Carretera a los Cués, km 4,5
76241 El Marqués, Querétaro. México
Tel. (4) 211 05 44. Fax: (4) 211 05 48. E-mail: mescoabar@cenam.mx

Resumen: Una de las magnitudes fundamentales en Magnetismo, utilizada frecuentemente en la calibración de instrumentos de medición y generación magnética, como gaussmetros o teslámetros, e imanes de referencia, es la densidad de flujo magnético B (en tesla). En el Laboratorio de Magnetismo de la Div. de Mediciones Electromagnéticas del CENAM, estamos trabajando en el desarrollo del patrón nacional de densidad de flujo magnético, en corriente continua, en el intervalo de 10 μ T (100 mG) a 300 mT (3000 G), el cual nos permitirá cubrir algunos servicios de calibración de instrumentos como los mencionados anteriormente. Damos a conocer aquí los alcances de generación y medición de B logrados, y describimos los principios en los cuales se basa este patrón, así como también describimos los métodos de generación y de medición de la bobina de campo magnético calculable y del teslámetro de resonancia magnética nuclear, los cuales han sido empleados para alcanzar nuestro objetivo.

INTRODUCCION

Poder ver la luz cada día, puede quizá insensibilizarnos sobre la importancia, el cuidado, la complejidad y el valor de este sentido. De la misma manera el uso cotidiano de dispositivos o instrumentos de uso industrial, doméstico, médico y científico, pudiera hacernos insensibles sobre los avances científicos y tecnológicos que dan vida a esos dispositivos o instrumentos, donde las propiedades de los materiales juegan un papel fundamental en su funcionamiento.

El magnetismo y los materiales magnéticos están presentes en muchos aspectos de nuestra vida cotidiana, desde la generación y distribución de electricidad, su uso en equipos industriales y domésticos, su uso en los sistemas de transporte, hasta las computadoras más avanzadas, y los sistemas de diagnóstico médico.

Gracias a su importancia tecnológica y económica, derivada de sus aplicaciones potenciales en la industria eléctrica, metal-mecánica, automotriz, de enseres domésticos, fotocopiado, e informática entre otras, así como en el sector salud, el ecológico y en laboratorios de metrología, el interés por el magnetismo y los materiales magnéticos continua en crecimiento.

En nuestro país hemos detectado una gama de necesidades metrológicas en el campo de las mediciones magnéticas [1], siendo algunas de estas necesidades la medición de los campos magnéticos B (densidad de flujo magnético o inducción magnética, en tesla, T) y H (intensidad de campo

magnético, en A/m), la calibración de instrumentos de generación y medición de magnitudes magnéticas, y la caracterización magnética de materiales, en corriente continua (c. c.) y en alterna (c. a.).

Satisfacer estas necesidades metrológicas en nuestro país, requiere de desarrollar y establecer los patrones nacionales y los sistemas de medición de referencia, de las diversas magnitudes magnéticas involucradas, que soporten y nos permitan brindar a los usuarios de estas magnitudes, mediciones magnéticas confiables con trazabilidad a patrones nacionales..

En el Laboratorio de Magnetismo de la Div. de Mediciones Electromagnéticas del CENAM, tomando como base nuestra misión y a fin de dar respuesta a algunas de las necesidades detectadas en los sectores antes mencionados, nos propusimos como objetivo desarrollar y establecer el patrón nacional de densidad de flujo magnético, en c. c., en el intervalo de 10 μ T (100 mG) a 300 mT (3000 G).

El presente trabajo pretende dar a conocer los alcances de generación y de medición de B que han sido logrados, así como también pretende describir los principios y los métodos de generación y de medición en los cuales se basa el desarrollo de este patrón.

DESCRIPCIÓN DEL PATRÓN NACIONAL DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO, B (T)

El patrón que pretendemos establecer esta constituido de dos partes fundamentales: una parte asociada a la generación del campo B, y la otra

relativa a su medición. En cuanto a la generación del campo B, es indispensable establecer las mejores condiciones de estabilidad de corriente eléctrica en todo el sistema de generación, a fin de obtener en un espacio determinado, un campo B lo más uniforme y estable posible, de tal manera que el campo generado pueda ser utilizado como una referencia.

Para alcanzar nuestro objetivo, se emplearon dos métodos de generación y de medición de B:

- (1) el método de la bobina de campo magnético calculable, para cubrir campos bajos, en el intervalo de 10 μT a 50 mT, y
- (2) el método del teslámetro de resonancia magnética nuclear (RMN), para cubrir campos medios, en el intervalo de 50 a 300 mT.

Antes de describir estos métodos mencionaremos una de las relaciones básicas del electromagnetismo, la cual será utilizada más adelante, la relación entre los campos **B** y **H** en el "vacío":

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1)$$

Donde:

B = densidad de flujo magnético, en tesla T,
H = intensidad de campo magnético, en A/m,
 μ_0 = cte. de campo magnético = $4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am.

Método de la bobina de campo magnético calculable:

El método consiste en generar un campo magnético homogéneo en el centro de una bobina, tipo Helmholtz, la cual es alimentada por una fuente de corriente continua. La intensidad de corriente eléctrica, I (A), que circula a través de esta bobina produce un campo magnético homogéneo en el centro de ésta, cuya intensidad de campo, H (A/m), se determina a partir de la relación siguiente:

$$H = k I \quad (2)$$

Donde:

k = cte. de la bobina = $19,76 \pm 0,06$, en (kA/m)/A.

De las relaciones (1) y (2), se obtiene una expresión para la densidad de flujo magnético, B (T), dada por la ecuación siguiente:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 (k I) \quad (3)$$

A partir de esta relación podemos entonces estimar el valor de la corriente I que debe circular a través de la bobina de campo magnético calculable, para generar un campo B dado (ver ecuación 4):

$$I = B / (\mu_0 k) \quad (4)$$

El intervalo de generación de B, que se pretende establecer por este método, es el siguiente: de 10 μT (100 mG) a 50 mT (500 G).

La tabla 1, muestra algunos valores de la intensidad de corriente que fueron estimados, a partir de la ecc. (4), dado un valor de B:

Tabla 1. Estimación de I, dado un valor de B.

B (nominal)	I (A) (estimada)
10 μT (100 mG)	402,719 μA
50 μT (500 mG)	2,01359 mA
100 μT (1 G)	4,02719 mA
200 μT (2 G)	8,05438 mA
500 μT (5 G)	20,1360 mA
1 mT (10 G)	40,2719 mA
1,5 mT (15 G)	60,4079 mA
2 mT (20 G)	80,5438 mA

Método del teslámetro de resonancia magnética nuclear (RMN):

Un sistema de generación de campos magnéticos, conformado por una fuente de corriente de alta estabilidad y por un electroimán, generan entre los polos de éste último una intensidad de campo magnético H (A/m), dada por (ver ecc. 1):

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 \quad (5)$$

La medición del campo **B**, por medio del método de resonancia magnética nuclear [2, 3, 4], se basa en la dependencia lineal de **B** con la frecuencia de precesión ω de los protones, de elementos tales como el hidrógeno, deuterio y el nitrógeno. En presencia de un campo magnético **B**, externo, los protones con momento magnético $m \neq 0$, adquieren una energía $E = - m \bullet \mathbf{B}$, siguiendo un movimiento de precesión entorno al campo **B** (ver Fig. 1), con una frecuencia característica f_0 llamada frecuencia de Larmor, o frecuencia angular de resonancia, dada por:

$$f_0 = (\gamma_p B) / 2\pi \quad (6)$$

Donde:

$\gamma_p = 4\pi m / h$ = razón giromagnética del protón [2, 5],
h = cte. de Planck .

En las relaciones anteriores, tanto μ_0 , como γ_p y h, son constantes físicas fundamentales. El valor de γ_p , en una muestra de agua esférica, es [6]:

$$\gamma_p = 26\,751.525\,5(81) \times 10^4 \text{ (s}^{-1} \text{ T}^{-1}\text{)}$$

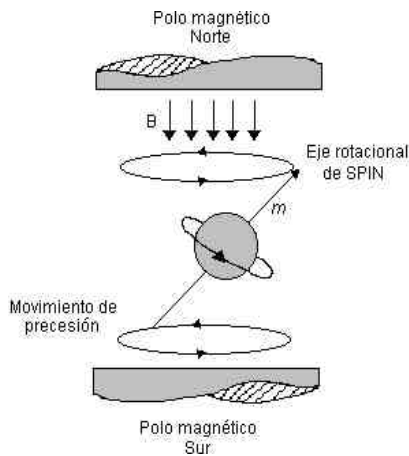


Fig. 1 Representación del movimiento de precesión de protones, causado por un campo magnético B externo.

De la ecc. (6) se obtiene finalmente la siguiente relación para el campo B:

$$B = 2\pi f_o / \gamma_p = \omega / \gamma_p \quad (7)$$

Dado que γ_p es una constante física fundamental, la única variable en la relación anterior a ser medida, de manera directa, es la frecuencia. La exactitud en la medición de B por el método de RMN es ≈ 5 ppm. La trazabilidad de éste patrón cuántico es hacia el patrón de frecuencia, mantenido en los laboratorios nacionales de metrología.

El intervalo de medición de B, que se pretende establecer por el método del teslámetro de RMN, es el siguiente: de 50 mT (500 G) a 300 mT (3000 G).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El mayor reto para alcanzar nuestro objetivo fue, sin lugar a dudas, el establecer las mejores condiciones de generación y de medición de la corriente eléctrica I, que alimenta los sistemas de generación de B, por los métodos arriba indicados, para tratar de obtener un campo B lo más uniforme y estable posible. Estos requerimientos básicos, y la no existencia de una fuente de corriente universal que nos permitiera cubrir totalmente el intervalo de B deseado, nos condujo a experimentar con las mejores fuentes de corriente con que contábamos, las cuales fueron complementadas con diversos sistemas de medición y de control.

Establecimiento del patrón en el intervalo de 10 μ T a 50 mT, por el método de la bobina de campo magnético calculable :

Para la generación del campo B en este intervalo, se empleó una bobina de campo magnético calculable,

tipo Helmholtz, cuyas especificaciones técnicas principales se encuentran descritas en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la bobina de campo magnético calculable.

Corriente de alimentación máxima:	3 A (en serie) 4 A (en paralelo)
Tensión de alimentación máxima:	60 V, en c. c.
Resistencia eléctrica:	18,4 Ω
Temperatura de operación máxima:	40 $^{\circ}$ C
Diámetro de acceso axial:	50 mm
Diámetro de acceso radial:	8 mm
Longitud de la cavidad cilíndrica:	111 mm
Constante de la bobina, K [(kA/m)/A]:	19,76 \pm 0,06

Una característica importante de esta bobina es que gracias a sus dos accesos para la medición del campo B, un acceso axial, paralelo al eje de la bobina, y otro acceso radial, perpendicular al eje de la bobina, ésta permite la calibración de sensores tipo Hall, de flujo axial y transversal.

La medición del campo B generado por la bobina, se llevó a cabo utilizando un teslámetro, con un sensor Hall de flujo transversal, cuyo posicionamiento en la cavidad de la bobina se determinó a partir del conocimiento del perfil del campo, $B = B(x)$. La Fig. 2 muestra la posición, relativa, obtenida para el posicionamiento de la punta del sensor Hall : $x = 28$ mm.

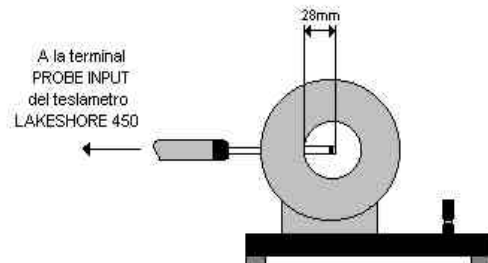


Fig. 2 Posicionamiento del sensor Hall en la cavidad de la bobina.

La generación de un campo magnético B estable y las propias restricciones impuestas por los circuitos de alimentación y el sistema de generación mismo, implicaron el uso de diferentes circuitos de alimentación, los cuales dieron como resultado el establecimiento de tres subintervalos para la generación de B:

Subintervalo de 10 μ T (100 mG) a 2 mT (20 G):

La tabla 1 muestra los valores nominales de B e I, que fueron generados y medidos. La Fig. 3 esquematiza el circuito empleado para la generación de B.

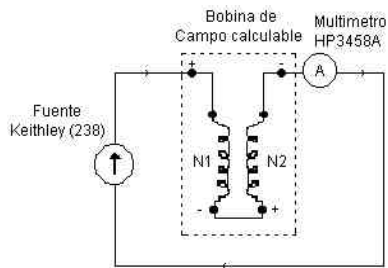


Fig. 3 Diagrama del circuito empleado para la generación de B, en el intervalo de 10 μ T a 2 mT.

Subintervalo de 2 mT (20 G) a 10 mT (100 G):

La tabla 3, muestra los valores de la intensidad de corriente que fueron estimados, a partir de la ecc. (4), dado un valor de B:

Tabla 3. Estimación de I, dado un valor de B.

B (nominal), en mT	I (estimada), en mA
2	80,5438
3	120,8157
4	161,0876
5	201,1360
10	402,7191

La generación y medición de estos valores fue realizada utilizando el circuito descrito en la Fig. 4.

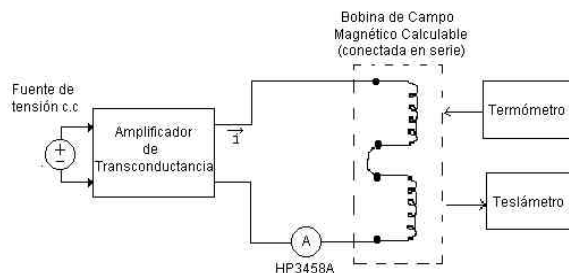


Fig. 4 Diagrama del circuito empleado para la generación de B, en el intervalo de 2 a 10 mT.

Subintervalo de 10 mT (100 G) a 50 mT (500 G):

Dados los valores tanto de la resistencia de la bobina de campo magnético calculable, $R = 18,4 \Omega$ (conexión en serie), como de las intensidades de corriente eléctrica (1,6 a 4,1 A) requeridas para la generación del campo B, en el intervalo de 20 a 50 mT, y dada la alta inestabilidad observada tanto en la corriente de alimentación de la bobina, como del campo B generado, así como la potencia disipada por la bobina, fue necesario hacer un análisis y una modificación del circuito de alimentación, a fin de contrarrestar y minimizar los efectos observados.

El uso de una fuente de corriente, la conexión en paralelo de las bobinas que constituyen la bobina de campo calculable, el uso de un resistor de $0,01 \Omega$ (en baño de aceite), el uso de un calibrador de tensión de c. c., y una estimación de la resistencia total del circuito de alimentación, nos permitieron por un lado mejorar la estabilidad tanto de la corriente de alimentación de la bobina, como del campo B, y por otro lado efectuar mediciones para establecer el intervalo de 10 a 50 mT.

La tabla 4, muestra los valores de la intensidad de corriente que fueron estimados.

Tabla 4. Estimación de I, dado un valor de B.

B(nominal), en mT	I (estimada), en A
10	0,811000766
20	1,622001532
30	2,433002298
40	3,244003063
50	4,05500383

La Fig. 5 representa el sistema que fue utilizado para la generación y medición de I y de B.

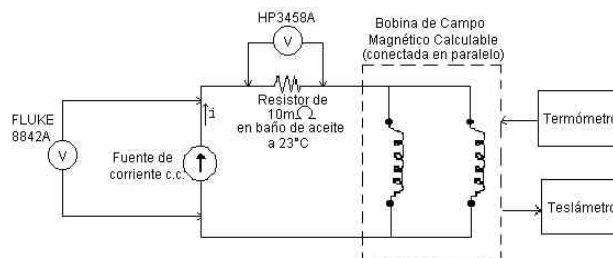


Fig. 5 Diagrama del circuito para la generación de B en el intervalo de 10 a 50 mT.

Establecimiento del patrón en el intervalo de 100 a 300 mT, por el método del teslámetro de RMN:

Para la generación del campo B en este intervalo, se utilizó un electroimán con polos de 6" de diámetro, y una separación entre éstos de 0,5" (ver Fig. 6). La alimentación del electroimán se efectuó a través de una fuente de corriente continua, cuyo control se realizó por medio de una fuente de tensión, desarrollada en el Laboratorio. La corriente en el sistema de generación fue medida por el método potenciométrico, haciendo uso de un derivador de corriente.

La medición del campo B, se efectuó por medio de un teslámetro de RMN, cuyas características principales son las siguientes: exactitud de ± 5 ppm, con una tolerancia de gradiente de campo $\leq 0,02 \%/cm$, un

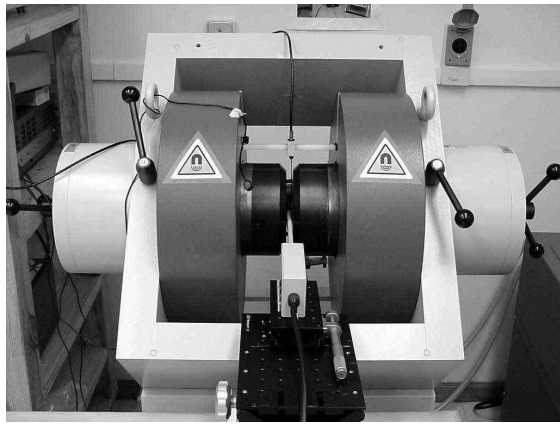


Fig. 6 Sistema de generación y medición del campo B, por el método del teslámetro de RMN, utilizado en el intervalo de 100 a 300 mT.

intervalo de frecuencia de 1,7 a 78 MHz, y con una estabilidad en su reloj interno de 3,0 ppm/año.

Una vez establecidas las condiciones de generación del campo B, se procedió a medir el campo generado entre los polos del electroimán, como se muestra en la Fig. 6. Los valores nominales del campo B, establecidos por este método, fueron los siguientes: 100, 200 y 300 mT. El sensor de RMN se colocó dentro de una zona que mostró la mejor homogeneidad del campo B entre los polos.

Durante la operación del electroimán, éste se mantuvo enfriado a través de un sistema de circulación de agua, a una temperatura de 20 °C.

RESULTADOS

La tabla 5 muestra los alcances de generación y medición que fueron obtenidos con cada uno de los métodos, que fueron utilizados en el establecimiento del patrón nacional de B.

Tabla 5. Alcances de generación y medición de B.

Patrón nacional de densidad de flujo magnético, en c. c.	Método de la bobina de campo magnético calculable	Método del teslámetro de RMN
Intervalo de generación y medición:	10 μ T a 50 mT	100 a 300 mT
Valores nominales establecidos:	10, 50, 100, 200 y 500 μ T. 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, y 50 mT	100, 200 y 300 mT.

Los resultados de las mediciones efectuadas, así como las incertidumbres asociadas a éstas, serán presentadas durante el simposium.

CONCLUSIONES

En el caso del método de la bobina de campo magnético calculable, se logró determinar y establecer las mejores condiciones de generación y de medición del campo B, para cubrir el intervalo de: 10 μ T a 50 mT, en el cual se establecieron 16 puntos de referencia del campo B..

En cuanto al método del teslámetro de RMN, y gracias al desarrollo de una fuente de tensión para el control de la fuente de corriente de alimentación del electroimán utilizado, se lograron establecer las condiciones de estabilidad para la generación y medición del campo B, estableciéndose tres puntos de referencia en el intervalo de 100 a 300 mT.

El conocimiento y la experiencia adquirida durante el desarrollo del patrón nacional de B, nos permitió detectar algunos requerimientos para mejorar el patrón establecido, como por ejemplo: contar con una fuente de corriente cuya estabilidad sea mejor que 10 ppm, mejorar el sistema de posicionamiento de los sensores Hall y de RMN, y sustituir los polos del electroimán por polos a base de FeCo.

El establecimiento del patrón nacional de densidad de flujo magnético, B (T), nos permitirá en primer lugar calibrar nuestros propios teslámetros de efecto Hall y nuestros imanes patrón, y en segundo lugar atender a algunas de las solicitudes de calibración que nos han sido requeridas por diversos sectores industriales de nuestro país.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Escobar y M. P. García. Aplicaciones industriales de la metrología magnética. De la Metrología, Vol. 5, No. 3, 2000.
- [2] V. Nguyen. Système de création de champ magnétique homogène à aimants ferrites pour l'imagerie RMN. Thèse INPG. Sep. 12 1996
- [3] L. Henderson, et al. Are your magnetic measurements really traceable: an introduction to NPL's capabilities. Cal Lab, march-april 1999. Pp 26 – 32.
- [4] J. Bortfeldt and B. Kramer. Units and fundamental constants in physics and chemistry. Landolt-Börnstein, New Series. Springer-Verlag.
- [5] B. W. Petley. The role of the fundamental constants of physics in metrology. Metrologia, Vol. 29, 1992. Pp 95-102.
- [6] E. R. Cohen and B. N. Taylor. The fundamental physical constants. Physics Today, August 1994. Pp 9 – 13.