

# CAPACIDADES DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DEL LABORATORIO DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO

M. G. Alatorre Moreno y M. A. Escobar V.  
Centro Nacional de Metrología, Div. de Mediciones Electromagnéticas  
Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Qro. 76241 México  
Tel: (442)2110500 Ext. 3454, 3435, Fax: 2110548, e-mail:malatorr@cenam.mx

**Resumen:** En este trabajo se describen los métodos y sistemas de medición que son utilizados en la calibración de equipos de medición y generación de densidad de flujo magnético, y se presentan las capacidades de medición y calibración actuales del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético del CENAM, mencionando algunos de los fundamentos teóricos-prácticos en los que se fundamentan estas calibraciones y mediciones.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La magnitud de densidad de flujo magnético o campo de inducción magnética,  $B$ , llamado también campo magnético  $B$ , expresa como su nombre lo indica el flujo magnético, o el número de líneas de campo magnético, por unidad de área, que es generado por corrientes eléctricas que circulan a través de circuitos eléctricos o por imanes. En el Sistema Internacional de Unidades,  $B$  se expresa en tesla (T), unidad que es igual a  $\text{Wb} / \text{m}^2$ .

Para la generación de un campo magnético  $B$  homogéneo y estable, son empleados los siguientes sistemas de generación: imanes patrón, solenoides, bobinas de Helmholtz, y electroimanes.

La selección del método de generación del campo magnético  $B$ , depende del nivel o intensidad del campo  $B$  a ser medido, de la homogeneidad del campo necesaria para realizar la medición, la resolución con que se vayan a realizar las mediciones y la incertidumbre requerida.

Estos sistemas de generación son usados para la calibración de magnetómetros basados en sensores que detectan tensiones inducidas, como por ejemplo bobinas de detección (search coil), sensores de efecto Hall y sensores con núcleo ferromagnético (fluxgate), así como magnetómetros basados en sensores de efecto cuántico, tales como: magnetómetros de resonancia magnética nuclear (RMN).

En nuestro país existen necesidades metrológicas en el campo de las mediciones magnéticas, en sectores tales como: el eléctrico, metal-mecánico, automotriz, de enseres domésticos, agroalimentario, de fotocopiado, el sector de salud, el ecológico y en laboratorios de metrología, siendo algunas de las necesidades detectadas la medición de densidad de flujo magnético residual (magnetismo residual) de materiales, campo magnético  $B$  ambiental, y la

calibración de instrumentos de generación y medición de densidad de flujo magnético, como: imanes de referencia y magnetómetros (teslámetros, gaussímetros) de flujo axial y transversal.

## 2.- CALIBRACIÓN DE MAGNETÓMETROS

Los magnetómetros (también llamados gaussímetros o teslámetros), son instrumentos de medición que son empleados para medir densidad de flujo magnético. Usualmente estos equipos son de tipo digital o analógico.

Los magnetómetros analógicos, como el mostrado en la figura 1, son instrumentos de baja exactitud, que son empleados principalmente en la industria metal-mecánica para medir magnetismo residual de piezas metálicas, las cuales deben cumplir con ciertas especificaciones.



**Fig. 1:** Magnetómetro analógico

Los intervalos de medición de estos equipos van desde  $\pm 50 \mu\text{T}$  ( $\pm 0,5 \text{ G}$ ) hasta  $\pm 2 \text{ mT}$  ( $\pm 20 \text{ G}$ )

Los magnetómetros digitales tienen mejores características técnicas y metrológicas que los equipos analógicos, ejemplos de estos son: los de resonancia magnética nuclear (RMN), fluxgate y de efecto Hall, como el mostrado en la figura 2. Cada uno de estos equipos basa su principio de medición en distintos fenómenos físicos y el uso de ellos depende de los alcances de medición y niveles de incertidumbre que se requieren para alguna aplicación de medición ó calibración específica. Sus

alcances de medición van desde algunos nanoteslas (nT), hasta algunas decenas de teslas (T).



**Fig. 2:** Magnetómetro digital con sonda de efecto Hall

Las capacidades de calibración de magnetómetros del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético, en la magnitud de densidad de flujo magnético en corriente continua, se resumen en la tabla siguiente:

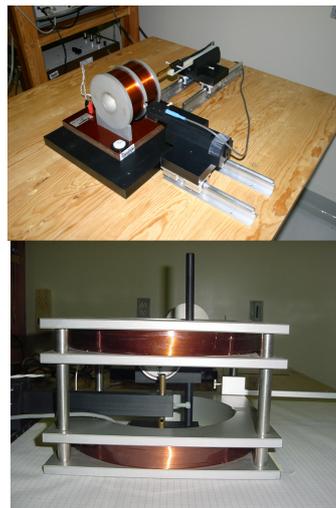
Instrumento bajo calibración	Método de calibración	Intervalo de medición	$\pm U$ (mT/T)
1.- Magnetómetro con sensor de flujo axial o transversal	Comparación directa /bobina de Helmholtz	10 $\mu$ T a 50 mT	3
2.- Magnetómetro con sensor de flujo axial o transversal	Comparación por sustitución/ bobina de Helmholtz	100 $\mu$ T a 2 mT	10
3.- Magnetómetro con sensor de flujo transversal	Comparación por sustitución/ electroimán	100 mT a 1 T	0,3
4.- Magnetómetro con sensor de flujo transversal	Comparación directa/ imanes patrón	100 mT y 250 mT	0,2
5.- Magnetómetro con sensor de flujo axial	Comparación directa/imán patrón	100 mT	0,1

**Tabla 1:** Capacidades de calibración de magnetómetros del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético del CENAM.

Las incertidumbres expandidas ( $\pm U$ ) mostradas en la tabla 1, corresponden a un factor de cobertura  $k=2$ , para un nivel de confianza del 95% aproximadamente.

### Descripción de los métodos de calibración

Para la calibración de los magnetómetros indicados en los puntos 1 y 2, de la tabla 1, se utiliza una bobina tipo Helmholtz para la generación y determinación del campo magnético B, como las mostradas en la figura 3. La bobina genera en su centro una densidad de flujo magnético homogénea, haciendo circular a través ésta una corriente continua estable.



**Fig. 3:** Bobinas patrón tipo Helmholtz, utilizadas en la calibración de magnetómetros.

Con éste sistema de generación se realizan calibraciones de magnetómetros analógicos y digitales con sensor de flujo axial y transversal, en el intervalo de 10  $\mu$ T a 50 mT. Para esto se utilizan dos métodos de calibración: por comparación directa y por sustitución.

En el método por comparación directa, se realizan mediciones con el magnetómetro bajo calibración (IC), introduciendo el sensor de éste en el centro de la cavidad de la bobina, como se muestra en la figura 4. Si el sensor es de flujo axial, éste debe ser introducido y colocado en dirección paralela al eje de la bobina, si es de flujo transversal, este debe ser introducido y colocado en dirección perpendicular al eje de la bobina, ver figura 4. El valor del campo magnético B de referencia, inducido en la bobina, se determina conociendo la constante de la bobina, que relaciona el campo magnético con la intensidad de corriente que circula a través de ésta, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$B = \mu_0 k I \quad (1)$$

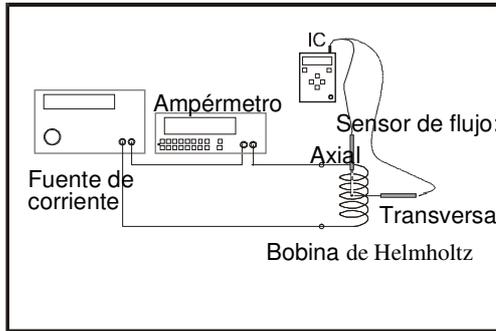
Donde:

B: es el campo magnético de referencia, en tesla (T)

$\mu_0$ : es la constante de campo magnético, en (Vs/Am)

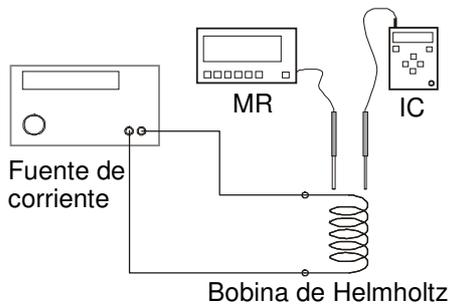
k: es la constante de la bobina patrón, en [(A/m)/A]

I: es la corriente eléctrica continua que circula por la Bobina, en (A)



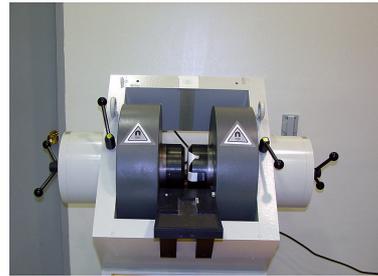
**Fig. 4:** Método de calibración de magnetómetros por comparación directa

El método de calibración por sustitución, ver figura 5, consiste en generar un campo magnético B, con la bobina de Helmholtz y medir este campo magnético con el magnetómetro a ser calibrado (IC) y con un magnetómetro patrón de referencia (MR), de manera alternada. Con base en el valor promedio de las mediciones realizadas, se determina el error de medición del magnetómetro bajo calibración.



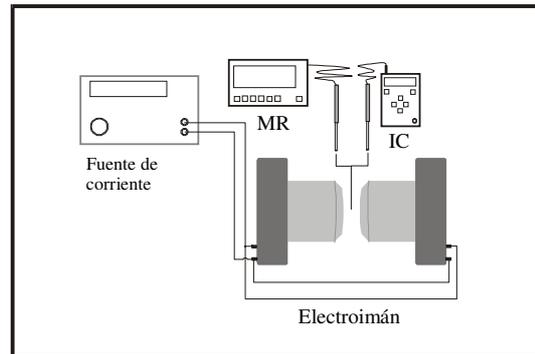
**Fig. 5:** Método de calibración de magnetómetros por sustitución

Para la calibración de magnetómetros como el indicado en el punto 3 de la tabla 1, se utiliza como sistema de generación de campo magnético, B, una fuente de corriente de alta estabilidad y un electroimán, ver figura 6.



**Fig. 6:** Electroimán empleado para la generación de campo magnético B, en el intervalo de 100 mT a 1T

Con éste sistema de generación se realizan calibraciones de magnetómetros digitales con sensor de efecto Hall de flujo transversal, en el intervalo de 100 mT a 1T, por el método de sustitución. La aplicación de éste método en este caso particular, consiste en generar un campo magnético B de valor determinado, haciendo uso de un electroimán y midiendo de manera alternada el campo magnético B generado por éste, con el magnetómetro bajo calibración (IC) y con el magnetómetro de referencia (MR), como se muestra en la figura 7. Con base en el valor promedio de las mediciones se determina el error de medición del magnetómetro bajo calibración.



**Fig. 7 :** Sistema de generación y medición empleado para la calibración de magnetómetros digitales, por el método de sustitución, en el intervalo de 100 mT a 1T.

Para la calibración de magnetómetros, como los indicados en los puntos 4 y 5 de la tabla 1, se emplean imanes patrón de valor específico, como el que se muestra en la figura 8. El imán mostrado en la figura permite la calibración de magnetómetros con sensores de flujo axial y transversal, a 100 mT.



**Fig. 8:** Imán patrón con cavidades para medir flujo axial y flujo transversal, con un valor nominal de 100 mT.

Conociendo el valor del campo magnético,  $B$ , generado por un imán patrón, se pueden calibrar magnetómetros digitales usando un método de comparación directa. Para esto, se introduce la sonda del magnetómetro en la cavidad del imán de referencia, hasta posicionar el sensor de la sonda en el centro del imán, donde el campo magnético  $B$  es generado con mayor homogeneidad. Posteriormente, se mide el campo magnético  $B$  de referencia con el magnetómetro a ser calibrado, ajustando previamente el “cero” del instrumento

### 3. CALIBRACIÓN DE IMANES PATRÓN

La capacidad de calibración de imanes patrón del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético del CENAM, se indica en la tabla 2.

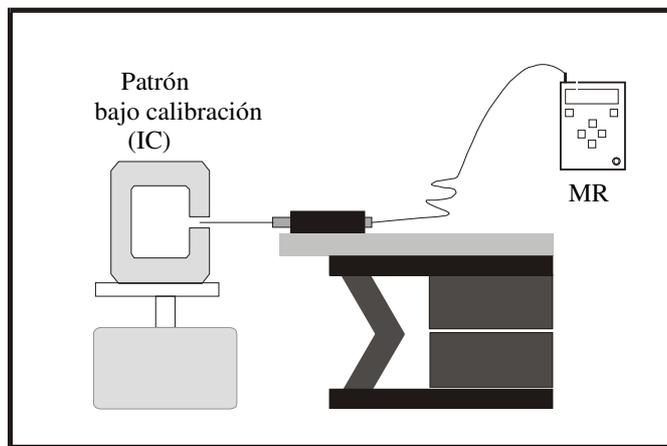
Para la calibración de imanes patrón, se emplea el método de comparación directa, el cual consiste, en medir el campo magnético  $B$ , que es generado en la parte central de éste, utilizando para ello un magnetómetro de referencia de efecto Hall, como se ilustra en la figura 9.

El “cero” del medidor se ajusta previamente, introduciendo el sensor Hall de éste, en una cámara de campo magnético cero, para compensar el campo magnético  $B$  ambiental y evitar así posibles errores en las mediciones.

Instrumento bajo calibración	Método de calibración	Intervalo	$\pm U$ (mT/T)
Imán patrón/ cavidad para medición de flujo transversal	Comparación directa / magnetómetro de efecto Hall	100 mT a 1 T	0,3 a 2

**Tabla 2:** Capacidad de calibración de imanes patrón, del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético.

Las incertidumbres expandidas ( $\pm U$ ) mostradas en la tabla 2, corresponden a un factor de cobertura  $k=2$ , para un nivel de confianza del 95% aproximadamente.



**Fig. 9:** Sistema de medición utilizado para la calibración de imanes patrón

### 4. MEDICIÓN DE MAGNETISMO RESIDUAL

Por magnetismo residual se entiende el magnetismo o inductancia magnética o polarización magnética remanente, que persiste en ciertos materiales después de haber desaparecido el campo magnético al que fueron expuestos, éste varía dependiendo del material.

En el caso de los aceros, el valor del magnetismo residual puede ser muy pequeño, aproximadamente del orden de nT a algunos  $\mu T$ . Estos valores tan pequeños de magnetismo residual que presentan algunos materiales y la presencia de un campo magnético ambiental, el cual puede ser de algunas decenas de  $\mu T$ , obligan a extremar los cuidados en las mediciones que se realizan. Estas deben ser realizadas, en la medida de lo posible, lejos de fuentes de campo magnético  $B$ , como mesas metálicas, sillas, pinzas, desarmadores, etcétera, hechas de materiales ferromagnéticos. A fin de minimizar los errores de medición, debe medirse el campo magnético ambiental en las coordenadas donde se medirá el magnetismo residual del artefacto o pieza metálica en cuestión, con el objeto de realizar las correcciones en las mediciones correspondientes. En el caso ideal, las mediciones de magnetismo residual deben ser realizadas haciendo uso de bobinas de Helmholtz, triaxiales, para compensar el campo magnético ambiental. Las mediciones deben realizarse con magnetómetros que tengan la suficiente resolución y sensibilidad para medir campos magnéticos en el intervalo de nT a mT, y que estén previamente calibrados.

## 5. MEDICIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO AMBIENTAL

La medición del campo magnético ambiental tiene diferentes aplicaciones prácticas, un ejemplo de éstas es la ubicación de espectrómetros de masas de alta resolución en ambientes cuyas condiciones ambientales de operación requieren entre otros parámetros, que el campo magnético ambiental sea menor o a lo más igual que 50  $\mu$ T.

Para el desarrollo de estas mediciones se utiliza un magnetómetro de referencia, tipo fluxgate, colocando su sensor en la posición de interés, en tres diferentes direcciones, este-oeste, sur-norte y vertical. La alineación del sensor se realiza mediante un nivel de gota y una brújula.

## 6. RECOMENDACIONES

Es recomendable mandar a calibrar los equipos de medición y generación de campos magnéticos ya que al hacerlo se obtienen los siguientes beneficios:

1. Conocimiento del valor del campo magnético B generado ó del error de medición, junto con su incertidumbre
2. Trazabilidad al Patrón Nacional de Densidad de Flujo Magnético
3. Confiabilidad de las mediciones
4. Después de cierto tiempo de calibrar continuamente el equipo, es posible predecir su comportamiento en el futuro y así alargar sus periodos de calibración
5. Es recomendable mandar calibrar un magnetómetro después de comprarlo, para saber si el equipo mide de acuerdo a lo especificado por el fabricante, también al realizar un ajuste mecánico ó electrónico al equipo y después de que éste presente alguna falla y sea reparado, con el propósito de conocer el valor actual de su error de medición y su incertidumbre.

La información técnica necesaria para solicitar servicios de calibración al Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético del CENAM, tanto de magnetómetros como artefactos de generación de campo magnéticos, como por ejemplo imanes de referencia y bobinas de Helmholtz o solenoides, en la magnitud de densidad de flujo magnético, en corriente continua, es la siguiente:

- 1.- Descripción y especificaciones técnicas del equipo

2.- Puntos de medición o generación en los que se requiere que el equipo sea calibrado,

3.- Indicar el tipo de sonda que se utiliza, si es una sonda con sensor para medir flujo axial o para medir flujo transversal. En caso de un equipo de generación de campo magnético, se requiere información sobre el tipo de cavidad que tiene y dimensiones de esta cavidad, ya sea para introducir una sonda con sensor para medir flujo axial o transversal.

## 7. CONCLUSIONES

Con el establecimiento de las capacidades de medición y calibración del Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético, se pretende atender, algunas de las necesidades metrológicas, en densidad de flujo magnético, detectadas en diversos sectores del país.

## 8. REFERENCIAS

[1] Are your magnetic measurements really traceable? An introduction to NPL's capabilities. L. Henderson, M. Hall, J. Bartholomew, T. Drake and S. Harmon. Cal Lab, March-April, 1999

[2] Informe técnico del establecimiento del Patrón Nacional de Densidad de Flujo Magnético en corriente continua M.A. Escobar Valderrama, M. P. García Torres. Área Eléctrica, División de Mediciones Electromagnéticas, CENAM,2002