

CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE BOBINAS DE HELTMOLTZ EN DC

RESUMEN

La caracterización y calibración de un electroimán es de suma importancia para las posibles aplicaciones futuras que se pretendan con el equipo. En este trabajo, se informan y justifican teóricamente los procesos seguidos para la caracterización y calibración automática de un electroimán Phylatex. Además se presentan las curvas experimentales de campo magnético producido por las bobinas en función de la corriente aplicada, obteniéndose el comportamiento esperado de acuerdo a la teoría de materiales ferromagnéticos. Finalmente se presenta este procedimiento como alternativa para la caracterización de nuevos materiales.

PALABRAS CLAVES: Caracterización, calibración, automática

ABSTRACT

Characterization and calibration of electromagnets is a very important issue if the objective is to develop any further application with the equipment. In this work it is informed and theoretically justify the automatic characterization and calibration of a Phylatex electromagnet. Besides, the experimental curves produced by a magnetic field as function of the feeder current in the windings are also provided, resulting in an expected behaviour according to the theory of ferromagnetic materials. Finally an alternative procedure for the characterization of materials is presented.

KEYWORDS: Characterization, calibration, automatic.

1. INTRODUCCIÓN

Las bobinas de Helmholtz con núcleo de hierro (electroimán) es un equipo de uso frecuente en laboratorios de física general y en laboratorios de investigación como elemento primordial en la construcción de magnetómetros [1], donde es necesario emplear electroimanes de alto campo en técnicas como Magnetometría Kerr (MEK) [2], [3], en Magnetometría de Muestra Vibrante (VSM) [4], [5], y en equipos de resonancia magnética nuclear [6], entre otras.

Un conocimiento detallado del funcionamiento de este dispositivo representa un factor preponderante en la confiabilidad y calidad de los resultados que sean reportados.

El funcionamiento del electroimán presenta una imanación del núcleo, ó campo magnético remanente B_r , que puede ser perjudicial para el buen resultado de las mediciones basadas en su uso, por esta razón, deben ser adecuadamente calibrados y caracterizados (desimanados), ya que la magnitud del campo magnético no sólo depende de la magnitud de la corriente, también de la separación de los núcleos de las bobinas, su geometría y el tipo de material del cual están hechos [7].

Cuando se tienen efectos por remanencia los resultados al trabajar con electroimanes son aleatorios, por lo tanto se debe desarrollar un proceso de desimanación del electroimán (ver 2.3). La desimanación del núcleo del electroimán se realiza por medio de la generación de un

JAVIER IGNACIO TORRES O.

Ingeniero electricista. M.Sc (c)
Profesor auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
oscurio@utp.edu.co

BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

Física, Ph. D
Profesora Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
bcruz@utp.edu.co

WILLIAM MARIN RAMIREZ

Ingeniero Mecánico M.Sc (c)
Universidad Tecnológica de Pereira
wilmar@utp.edu.co

ciclo iterativo de inversión de campo magnético decreciente.

El objetivo de este trabajo es caracterizar y calibrar un electroimán de núcleos cilíndricos planos, determinando como es la variación del campo magnético con la distancia entre ellos y además eliminar el campo remanente, mediante la implementación de algoritmos de control para la fuente de alimentación del electroimán usando el programa LabVIEW 7.1.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Bobina de Helmholtz: Una bobina de Helmholtz en forma básica consiste en un par de espiras concéntricas de radio R conectadas en serie y separadas por una distancia r a lo largo del eje de simetría (eje z). El campo generado por cada espira está dado por [8]:

$$H_{(z,z_0,r)} = \frac{2\pi * I_H}{C} \frac{r^2}{[(z - z_0)^2 + R^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

Donde $H(z,z_0,r)$ es el campo generado por la espira de radio R en la posición z_0 , estando la espira en z , dado en Oersted, (ver figura 1) I_H es la corriente que pasa por la espira en satamperes ($1 \text{ A} = 9 \times 10^9 \text{ satamperes}$) y $C = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ es la velocidad de la luz en el vacío. La curva espacial de campo magnético característica de una bobina de Helmholtz calibrada se presenta en la Fig.1.

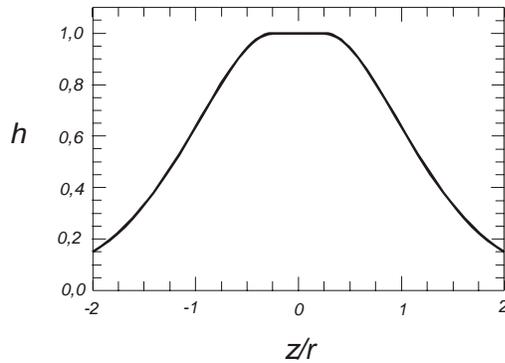


Figura 1 Perfil espacial del campo magnético generado por la bobina de Helmholtz. $h=H/H_{max}$ [8].

Las bobinas son formadas por arrollamientos de espiras distribuidas en m capas con n espiras para cada capa, siendo Φ el diámetro del alambre. Las bobinas están separadas por una distancia r medida en la dirección del eje axial (eje z). La función del campo puede ser descrita como [9]:

$$B(z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[B\left(z, \frac{-r-(n-1)\phi}{2} + i\phi, r - \frac{(m-1)\phi}{2} + j\phi\right) + B\left(z, \frac{r-(n-1)\phi}{2} + i\phi, r - \frac{(m-1)\phi}{2} + j\phi\right) \right] \quad (2)$$

El campo en una región homogénea es función de la corriente I y ésta dado por:

$$B = \alpha I \quad (3)$$

Donde el valor de proporcionalidad α puede ser obtenido por caracterización de la bobina [8]

Sin embargo, por efectos de remanencia en el núcleo, se presentan situaciones como la presentada en la Fig. 4 (Resultados propios).

2.2. Caracterización del electroimán: Es de interés determinar la región donde el flujo de campo magnético varía linealmente con la corriente, es decir, se debe calcular el valor de proporcionalidad α (ec 3). Como ya se ha expresado, el valor del flujo de campo magnético es función de la corriente, número de espiras, número de capas y diámetro del conductor. Además depende de la forma geométrica de los núcleos [7] y de la separación de estos. Por tal motivo, es necesario medir el valor del flujo magnético cuando las variables mencionadas cambian.

2.3. Desimanación del electroimán: Este procedimiento se requiere en el momento en el que se detecta que al anular la corriente magnetizante la densidad de flujo magnético no se anula (Fig. 4). Cuando se presente este comportamiento, el material se puede desimanar invirtiendo la corriente magnetizante un cierto número de

veces y disminuyendo su intensidad en cada inversión [8].

En la Fig. 2, se presenta el proceso seguido para desimanar un material ferromagnético. Este trabajo se inicia con una corriente $I_{max} = 10,0$ A que decrece hasta un valor de cero, se invierte la alimentación del electroimán para alcanzar la magnitud de I_{max} con polaridad negativa, aumentando de nuevo la corriente hasta cero. De nuevo se invierte la fase en la alimentación de la maquina y se incrementa la corriente hasta ($I_{max} = -1,0$ A), comenzando una nueva iteración del procedimiento hasta terminar en cero. La realización de este procedimiento en forma manual es engorroso, pues se debe invertir la alimentación de la fuente en cada paso por cero. Por esto es recomendable automatizar el proceso para hacerlo más versátil y rápido.

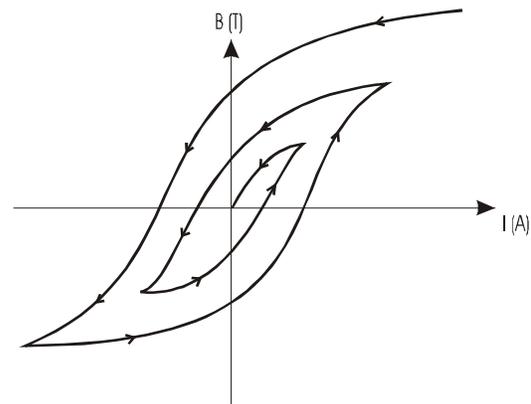


Figura 2. Ciclos sucesivos de histéresis durante el proceso de desimanación de un material ferromagnético.

3. ASPECTOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN Y DESIMANACIÓN

Para la realización de estos procedimientos se usó:

- Fuente de corriente Kepco ATE 75-15M
- Electroimán Phylatex
- Sonda Hall CASSY Lab Leybold
- Tarjeta de adquisición DAQ NI PCI-6221 (DAQ) de National Instruments

3.1 Control de la fuente de corriente: Para el control de la fuente de corriente los fabricantes proponen que el sistema de control se realice por medio de una tarjeta GPIB (General Purpose Interface) más el módulo de interfase SNR 488-4 y la tarjeta SN 488-B/D Kepco, elevando el costo del montaje considerablemente. El control de la fuente de corriente se realiza por medio de una señal digital de voltaje que genera DAQ. Ésta señal es un dato de 8 bits que se convierte a una corriente DC por medio de un conversor DAC 0808. La señal de control se transforma internamente en la fuente Kepco a una señal de voltaje de 0,0 V a 1,0 V, que equivale a una salida de la fuente de corriente de 0,0 A a 15,0 A. Este control, permite el manejo de la corriente pero no del voltaje. Para la limitación del voltaje en la bobina se adiciona una resistencia variable de 4,0 Ω .

3.2 Instrumentación: La medición de magnitud de la intensidad de campo magnético se implementó con una Sonda Hall CASSY Lab (Leybold). La comunicación de la señal de la sonda se realiza por el puerto USB y la interfase con el computador, se realiza mediante una tarjeta de adquisición NI PCI-6221 (DAQ) de National Instruments

3.3. Software: El sistema de adquisición y control se desarrolla en LabVIEW versión 7.1 (National Instrument). El programa permite controlar la corriente requerida por la bobina con un incremento de 256 pasos. Teniendo como variables de entrada el tiempo entre pasos ($\Delta t_{min}=10$ ms) y la corriente máxima (I_{max}). El sistema luego de generar la señal de control, adquiere la respuesta del sensor Hall y del valor de la corriente, los almacena y exporta. El valor del flujo de campo magnético del electroimán B en Tesla se grafica en función de la corriente I en Ampere y se presentan por pantalla.

El programa presenta dos modos de operación, uno de *caracterización* que en primera instancia presenta la curva del flujo de campo magnético en función de la corriente (B vs I), y exporta los datos almacenados para el calculo del valor de α y análisis de la curva (Fig. 3). También se puede obtener el perfil magnético del electroimán mediante la presentación de la curva de histéresis (Fig. 6). Y el otro modo de *desimanación* que se describe en (2.3).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización del electroimán: En la Figura 3 se presenta la dependencia del campo magnético con la corriente en función de la distancia entre los núcleos del electroimán. Se puede observar que para distancias grandes (6 cm - 10 cm) existe una linealidad en todo el rango de corriente. Al disminuir la distancia de separación, se encuentran dos regímenes de comportamiento: una zona proporcional y otra que muestra una tendencia a la saturación. Este comportamiento se debe a que la permeabilidad magnética no es constante sino que varía con el valor del campo magnético producido por el electroimán, por lo tanto, se presenta una superposición de dos campos magnéticos, uno producido por las bobinas y el otro producido por las características magnéticas del material de los núcleos (permeabilidad magnética de ellos) y del mismo campo magnético producido por las bobinas. [11] En la Tabla 1 se presentan los resultados de ajustar la parte lineal de cada una las curvas de la figura 3, obteniéndose así la constante de proporcionalidad α entre el campo magnético producido por el electroimán y la corriente aplicada a éste, en términos de la distancia de los núcleos. Se puede observar cómo al disminuir la distancia entre los núcleos de 10 cm a 1 cm la constante

de proporcionalidad aumenta también en un factor de 10, convirtiéndose este último arreglo experimental óptimo para aplicaciones en la que se requieran campos mayores a 0,5 T. Sin embargo la histéresis del material de los núcleos, hace que en el proceso se deba incluir el proceso de desimanación.

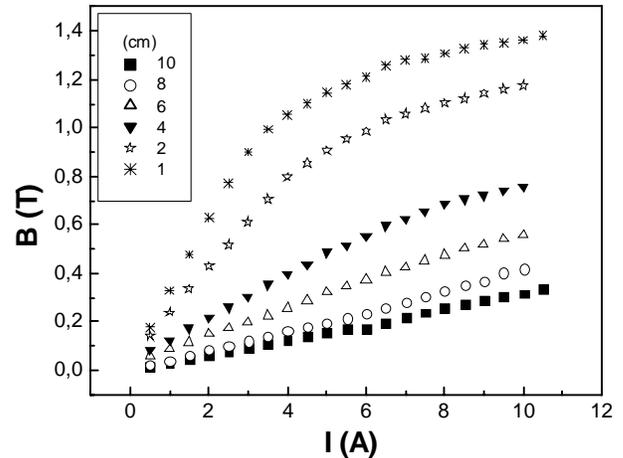


Figura 3. Flujo de campo magnético (T) producido por el electroimán al variar la corriente (A) en función de la distancia entre los núcleos.

Distancia entre núcleos (cm)	Constante de proporcionalidad experimental $B(T) = \alpha I(A)$
10,0	0,03
8,0	0,04
6,0	0,05
4,0	0,08
2,0	0,18
1,0	0,30

Tabla 1. Constante de proporcionalidad calculada a partir del ajuste lineal de las curvas obtenidas al variar la distancia entre los núcleos (Fig.3).

4.2 Desimanación del núcleo: En la Fig. 4 se muestra una zona ampliada de la región donde se presenta la remanencia de la curva característica. Por está razón se hace necesario implementar el proceso de desimanación del electroimán.

La curva que presenta los ciclos sucesivos de histéresis durante el proceso de desimanación del electroimán no se adjunta, pues se determinó con el primer ciclo que el material presenta un bajo campo coercitivo ($\sim 7,89$ mT), generando una superposición de los ciclos impidiendo la fácil visualización del proceso en este caso. El cálculo de este campo se realizó a partir de la Fig. 5, utilizando la (Ec. 3) con los datos presentados en la Tabla 1 para una separación de núcleos de 1 cm.

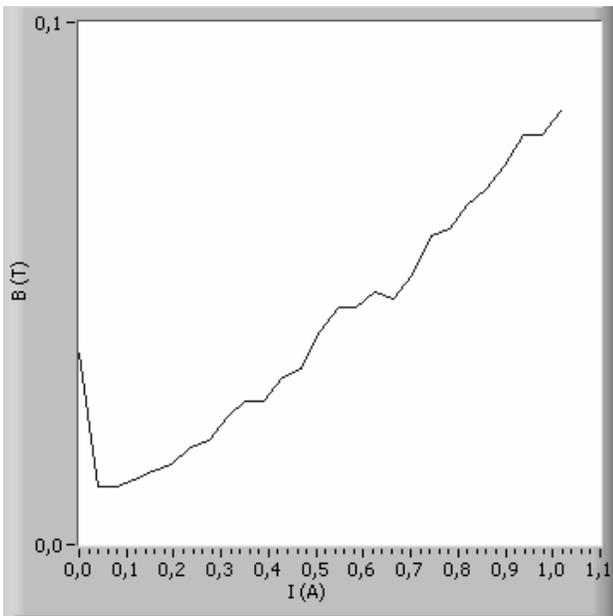


Figura 4. Curva característica del electroimán con remanencia

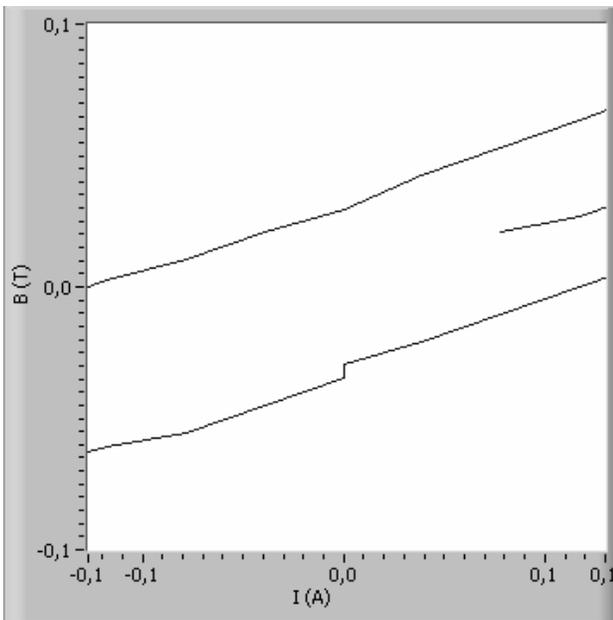


Figura 5 Sección del perfil de campo magnético, usado para medirle campo coercitivo del núcleo con d = 1,0 cm.

En las figuras 6(a-c) se presentan tres curvas de histéresis al variar la separación de los núcleos (1,0 – 4,0 y 10,0 cm). Se puede observar claramente la proporcionalidad entre la corriente aplicada al electroimán y el campo producido por éste, cuando se tiene una separación entre núcleos de 10,0 cm. Por lo tanto, se concluye que esta condición de trabajo es adecuada, pues el material de los núcleos no ha sido magnetizado, por lo que no se produce un campo adicional. Sin embargo, el campo magnético producido es del orden de 0,3 T, lo que limita las posibles aplicaciones en diversos estudios. Mientras que al disminuir la distancia el campo aumenta notablemente

(valores cercanos a 1,0 T), pero la zona de trabajo lineal es limitada. También se observa cómo para 1,0 cm de distancia se obtiene el campo coercitivo del material del núcleo a partir del ciclo de histéresis siendo éste del orden de 7,89 mT.

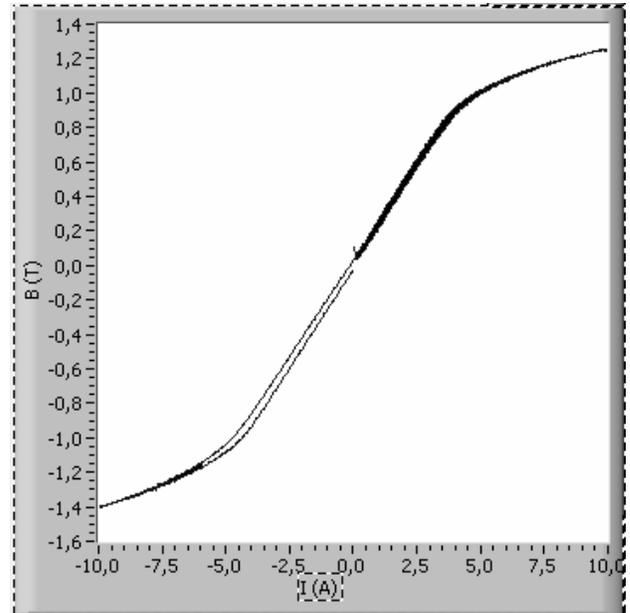


Figura 6a. Curva de histéresis del electroimán d= 1,0 cm.

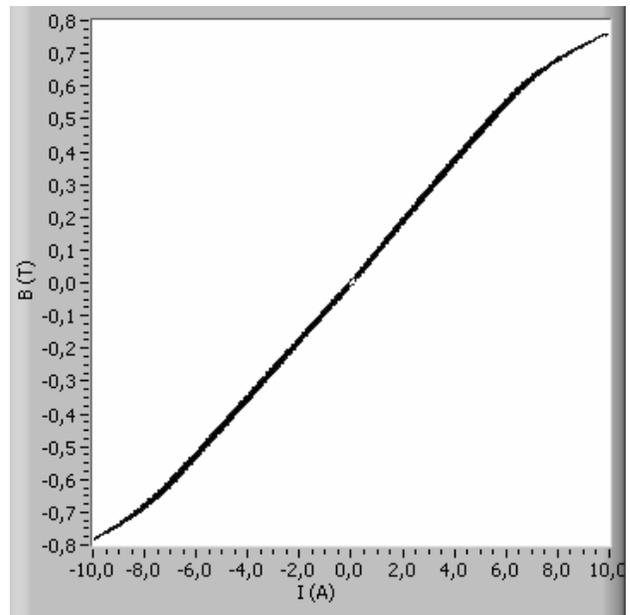


Figura 6b. Curva de histéresis del electroimán d= 4,0 cm.

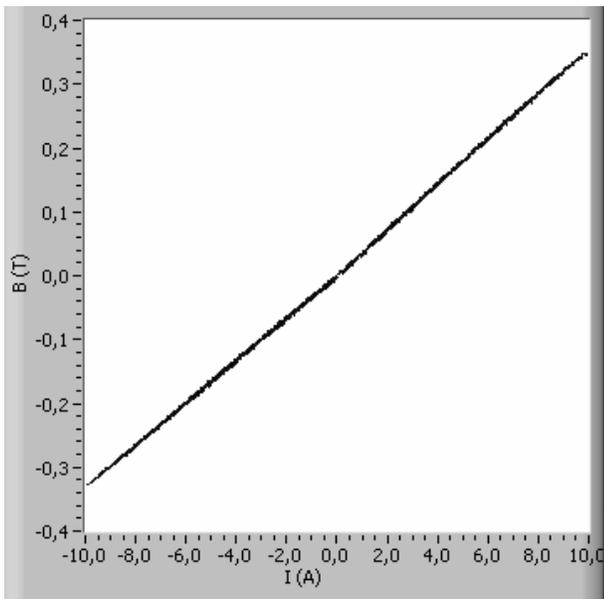


Figura 6c. Curva de histéresis del electroimán $d=10$ cm.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se encontró que, el campo magnético es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la separación entre los núcleos.

Se determinó, que al disminuir la separación entre los núcleos se hace cada vez más evidente la presencia de un campo adicional, disminuyendo la zona de proporcionalidad entre el campo magnético y la corriente aplicada.

Mediante el proceso automático de medida y usando una bobina con núcleo de aire, se puede caracterizar un material desconocido utilizado como núcleo, por medio de su perfil magnético trabajando con los núcleos a cortas distancias.

A nivel instrumental se requiere estabilidad de la señal suministrada por la fuente de corriente, siendo necesario para este caso la implementación de un buen sistema de control.

Es necesario implementar algoritmos de control que permitan eliminar la presencia de campo remanente en el electroimán.

6. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo hace parte del proyecto "Instrumentación, control e integración del proceso de medición de variables magnetoópticas por efecto Kerr longitudinal" Código 3058, que es financiado por la oficina de investigación y extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Torres, J. Efecto Kerr magnetoóptico antecedentes y aplicaciones. *Scientia et Technica*, Año XII (32):437–442, 2006.
- [2]. Hampton, J, and Martínez, J, and Abruña, H. Development of a versatile SMOKE system with electrochemical applications. *Rev. of Sci. Inst.*, 73(8):3018–3021, 2002.
- [3]. López, J, et al. Montaje y calibración de un sistema de efecto Kerr magnetoóptico. *Revista colombiana de Física*, 37(2):384–388, 2005.
- [4]. Wrona, J, et al. R-VSM and MOKE magnetometers for nanostructures. *M.M.M.*, 272:2294–2295, 2004.
- [5]. Rosales, A. et al. Desarrollo de un magnetómetro de muestra vibrante. *Revista colombiana de física*, VOL. 38, No. 1, 2006
- [6]. Quiroga, J. Arcos, H y Llamosa L. Caracterización de un electroimán para el diseño y construcción de un equipo de resonancia magnética nuclear. *Scientia et Technica*, Año (16):1–6, 2001.
- [7]. Venegas, A, et al. Campo magnético producido por las bobinas de Helmholtz caracterización y calibración. *Revista colombiana de física*, vol. 36, no. 1, 2004
- [8]. Sears, F. Fundamentos de física II. Electricidad y Magnetismo. 439 p. Aguilar Madrid 1963.
- [9]. S. d. S. F. Formacao de nanoestructuras magnéticas por aquecimento joule. *Ph.D. Tese. instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP.*, 2000.
- [10]. Bonete, H. O magnetômetro a efeito Kerr e o filme fino de co/si. *Universidade Estadual de Campinas*, page 40, 2002.
- [11]. Cullity B. D. Introduction to magnetic Materials, 666 páginas, Addison Wesley, Philippines, 1972, página 342