

DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN MAGNETÓMETRO DE MUESTRA VIBRANTE: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES MAGNÉTICOS

DESIGN AND CALIBRATION OF A VIBRANT SAMPLE MAGNETOMETER: CHARACTERIZATION OF MAGNETIC MATERIALS

Freddy P. Guachún¹, Víctor J. Raposo²

¹ Carrera de Matemáticas y Física, Universidad de Cuenca, Ecuador.

² Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca, España.

(Recibido: 07/2017. Aceptado: 09/2017)

Resumen

En este trabajo se presenta el proceso seguido en la implementación de un magnetómetro de muestra vibrante (MMV), construido con materiales comúnmente encontrados en un laboratorio de electromagnetismo. Se describe el diseño, construcción, calibración y utilización en la caracterización de algunos materiales magnéticos. Un MMV mide el momento magnético de una muestra cuando se la hace vibrar perpendicularmente a un campo magnético uniforme; a partir de estas lecturas se puede determinar la magnetización y la susceptibilidad magnética. Este instrumento sobresale por su simplicidad, versatilidad y bajo costo, pero es muy sensible y capaz de eliminar o minimizar muchas fuentes de error que se encuentran en otros métodos de medición, permitiendo así obtener resultados muy precisos y confiables. Su funcionamiento se basa en la ley de inducción magnética de Lenz-Faraday que consiste en medir el voltaje inducido en unas bobinas de detección producido por la variación del flujo magnético que las atraviesa. La calibración del MMV se realizó mediante una muestra patrón (Magnetita) y se verificó mediante una muestra de comprobación (Níquel).

Palabras clave: Magnetómetro de Muestra Vibrante, Caracterización Magnética, MMV, Ley de Lenz-Faraday, Equipo de laboratorio.

Abstract

This paper presents the process followed in the implementation of a vibrating sample magnetometer (VSM), constructed with materials commonly found in an electromagnetism laboratory. It describes the design, construction, calibration and use in the characterization of some magnetic materials. A VSM measures the magnetic moment of a sample when it is vibrated perpendicular to a uniform magnetic field; Magnetization and magnetic susceptibility can be determined from these readings. This instrument stands out for its simplicity, versatility and low cost, but it is very sensitive and capable of eliminating or minimizing many sources of error that are found in other methods of measurement, allowing to obtain very accurate and reliable results. Its operation is based on the law of magnetic induction of Lenz-Faraday that consists in measuring the induced voltage in coils of detection produced by the variation of the magnetic flux that crosses them. The calibration of the VSM was performed by means of a standard sample (Magnetite) and verified by means of a test sample (Nickel).

Keywords: Vibrating simple magnetometer, Magnetic characterization, VSM, Lenz-Faradays law, Laboratory equipment.

Introducción

Los materiales magnéticos están presentes de manera esencial en muchos campos de la ciencia; en el área de la informática, electrónica, industria, equipos experimentales, etc [1]. Esto conlleva a que los materiales magnéticos formen parte fundamental del avance de la sociedad actual, siendo necesario su estudio detallado con el fin de caracterizarlos y conocer sus posibles aplicaciones. Caracterizar un material significa identificarlo a partir del estudio de sus propiedades físicas o químicas; actualmente existen varias técnicas de caracterización de acuerdo al equipo utilizado y al

interés de los investigadores; una vez caracterizado un material, se puede establecer la naturaleza del mismo y definir sus posibles aplicaciones. Las características que definen a los materiales magnéticos están descritas en términos de curvas de magnetización en función del campo magnético aplicado (M vs H); esta curva nos describe la forma en la que se va magnetizando el material en función del campo magnético aplicado y, dependiendo de la forma de la curva de histéresis, se puede clasificar a los materiales magnéticos.

Las técnicas de caracterización magnética se pueden agrupar principalmente en tres tipos:

1) Medición de la fuerza sobre un material en un campo magnético no uniforme: Este tipo de técnicas se ha empleado en los laboratorios de física por muchos años, la balanza de Faraday ha sido la más utilizada; sin embargo, estas técnicas no permiten la observación de la magnetización en un campo uniforme, debido a que el gradiente del campo es fundamental para la producción de la fuerza. A más de ello, estas técnicas son difícilmente adaptables a procesos de medición de magnetización en función del campo aplicado.

2) Mediciones indirectas de fenómenos que implican las propiedades magnéticas: Estas técnicas incluyen medidas del efecto Faraday, análisis de efectos galvanomagnéticos y mediciones de resonancia ferromagnética en microondas; en casos particulares tiene una sensibilidad muy alta; sin embargo, poseen muchas limitaciones, pues sólo son aplicables a casos muy particulares de los cuales se requiere tener a priori un alto conocimiento.

3) Medición de inducción magnética en la vecindad de la muestra: Este tipo de técnicas se enfoca en la medición de un voltaje inducido en una bobina detectora originada por la variación de un flujo magnético; esta variación se puede generar de diferentes formas, ya sea variando el campo externo aplicado, la posición de la bobina detectora, o la posición de la muestra a caracterizar. Dentro de este tipo, la técnica de medición más utilizada para la determinación de curvas M vs. H (ciclo de histéresis) es el Magnetómetro de Muestra Vibrante (MMV); este instrumento fue inventado en 1959 por Simón Foner [2] y desde entonces se ha convertido en la técnica

más usada en laboratorios de investigación; pues, con el avance de la tecnología y con la fabricación de los amplificadores lock-in [3], se pudo optimizar esta técnica mejorando considerablemente la relación señal-ruido durante las mediciones.

1. Fundamentos teóricos

En el MMV, la muestra a caracterizar es fijada en un extremo de la varilla no magnética, mientras el otro extremo es ajustado verticalmente a un elemento que produzca la oscilación, en nuestro caso, un parlante conectado al generador de funciones del lock-in; de esta manera el flujo magnético producido por la muestra sobre el sistema de bobinas de detección varía temporalmente con la frecuencia de oscilación.

La muestra se puede considerar como un dipolo magnético de momento dipolar (m), que oscila periódicamente a lo largo del eje z y perpendicular al campo magnético. Al variar el campo magnético se produce un cambio en el momento magnético de la muestra y por ende en el voltaje inducido.

En la figura 1 se observa a la muestra con su dirección de oscilación, dos bobinas de detección y el sentido del campo externo aplicado.

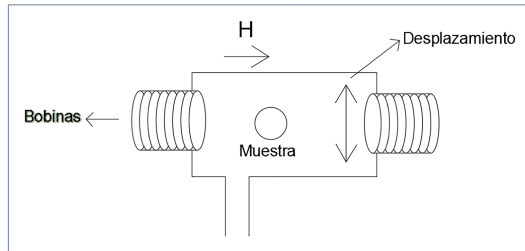


FIGURA 1. Desplazamiento de la muestra y ubicación de las bobinas de detección del MMV

La amplitud del voltaje inducido se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = mAfb \quad (1)$$

Donde A es la amplitud de oscilación, f la frecuencia de oscilación y b un factor que depende del número de espiras, área de las bobinas y posición con respecto a la muestra. El voltaje ε es medido

mediante la técnica de detección síncrona, usando un amplificador “lock-in”; de esta manera se podrá detectar señales muy pequeñas conservando una buena relación de señal-ruido.

En el extremo superior de la varilla no magnética se fija un imán permanente, cerca de una bobina llamada bobina de calibración de la oscilación. El voltaje inducido por el imán permanente sobre esta bobina se suele emplear para mantener la amplitud y la frecuencia de oscilación constante; de esta forma, la señal medida sólo depende del momento magnético de la muestra. Sin embargo, nosotros la utilizaremos como método de calibración de la medida, mas no para mantener constantes la amplitud y frecuencia. Las constantes de calibración se obtienen mediante la medida de una muestra patrón con momento magnético conocido. El campo magnético uniforme es aplicado mediante un electroimán que está conectado a una fuente de corriente que permite variar el valor del campo. El campo magnético generado por el electroimán se mide mediante un gaussímetro que posee un mecanismo de control por realimentación de bucle cerrado llamado PID (Proporcional, Integrativo, Derivativo) [4]. Todos los elementos están interconectados con el PC mediante un interfaz GPIB y con ayuda del software de programación gráfico, diseñado específicamente para aplicaciones de prueba y medición Agilent VEE Pro (Visual Engineering Environment) [5], se ajusta para ejecutar el proceso especificado anteriormente. En la figura 2, se muestran las conexiones y el lugar de colocación de los elementos del MMV.

2. Diseño de las bobinas de detección

Las bobinas de detección son una parte fundamental de medida, pues de ellas depende en gran parte la sensibilidad y estabilidad de la señal percibida por el MMV.

Existen algunos tipos de configuraciones, vamos a estudiar las más sencillas y que podamos realizar para nuestro sistema de medida. Estudiaremos la configuración propuesta por Foner [2] que consiste en dos bobinas en el eje x, con sus espiras enrolladas en sentido contrario y la configuración propuesta por Mallison [6] que consiste

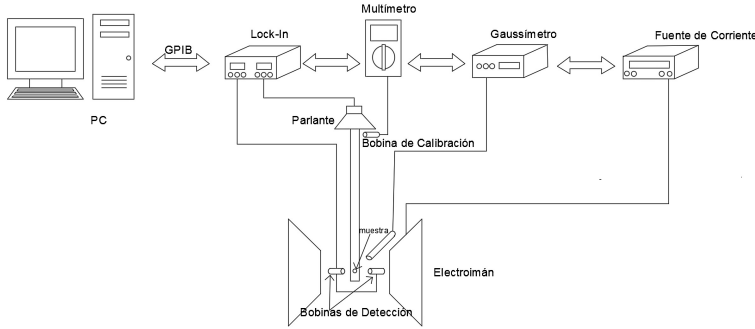


FIGURA 2. Conexiones del MMV.

en cuatro bobinas colocadas simétricamente al eje x . Se emplean pares de bobinas para minimizar los efectos de la posición de la muestra o las variaciones de campo externo. Figura 3.

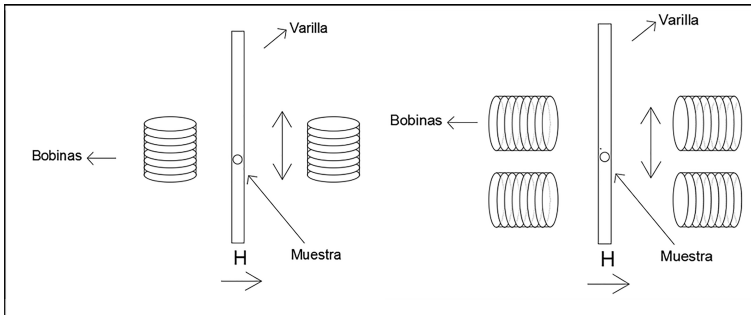


FIGURA 3. Configuración Foner y Configuración Mallison.

Para ello, estudiaremos la señal recibida por las dos configuraciones de bobinas de detección. Para el análisis supondremos que la muestra se comporta como un dipolo magnético puntual, oscilando en presencia de las bobinas de detección. Para un dipolo puntual, la ecuación 2 muestra el campo magnético producido cuando su momento magnético es m y \vec{r} muestra la distancia al mismo [7].

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}}{r^3} + \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} \right] \quad (2)$$

El flujo magnético se define como la cantidad de líneas de campo magnético que atraviesan una determinada superficie S en el espacio y se representa mediante la siguiente ecuación.

$$\phi = \int_{ds} \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

La fuerza electromotriz en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción Φ del campo magnético que lo atraviesa por unidad de tiempo.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Para utilizar las ecuaciones 2,3 y 4, estimar los valores de inducción y fuerza electromotriz, se utilizaron datos referenciales, que nos darán una estimación razonable del voltaje inducido para una muestra típica.

2.1. Configuración de Foner y Mallison

Una característica de la configuración de Foner es que las dos bobinas están conectadas en serie y opuestas para obtener una señal de salida neta. Además de eliminar en gran medida los efectos del ruido de fondo debido a la inestabilidad del campo magnético o vibraciones mecánicas de los sistemas de imán y bobina [2]. La configuración de Mallison cuenta con cuatro bobinas, con sus ejes paralelos al eje x . La máxima señal obtenida en esta configuración se obtiene juntando las bobinas que se encuentran a los lados de la muestra y ubicando los extremos de las bobinas en un ángulo de 45° [8].

La figura 4 presenta el análisis de la posición y la distancia entre la muestra en un punto durante la oscilación y una de las bobinas de detección; este análisis será similar con el resto bobinas, pues están colocadas simétricamente a la muestra.

Con las ecuaciones 2, 3 y 4 representamos el valor de la fuerza electromotriz en ambas configuraciones. Figura 5 con las bobinas alineadas en los ejes x o z .

Observamos en la figura 5a que es mayor la fuerza electromotriz producida en el eje z , siendo además de la misma frecuencia que

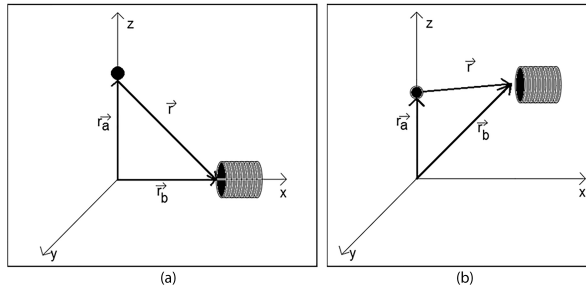


FIGURA 4. (a) Configuración Foner. (b) Configuración Mallison.

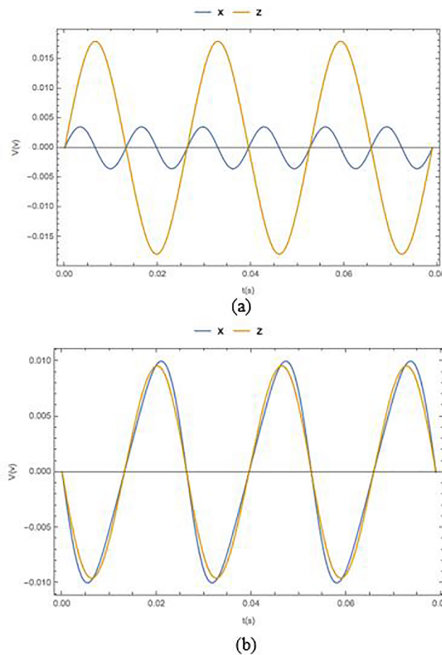


FIGURA 5. Fuerza electromotriz inducida en las bobinas de detección con orientaciones en el eje x y el eje z (a) Configuración Foner (b) Configuración Mallison.

la de oscilación. Este resultado indica que las bobinas de detección se deben colocar en forma vertical, puesto que es en esa forma que se obtiene mayor fuerza electromotriz inducida. Por otra parte, observamos en la figura 5b que la fuerza electromotriz producida en el eje z y en el eje x son similares. Este resultado indica que

las bobinas de detección se podrían colocar de forma vertical o de forma horizontal, puesto que se obtiene aproximadamente el mismo voltaje inducido de las dos formas.

Debe destacarse además que para la obtención de estas figuras se han escogido las conexiones adecuadas entre las cuatro bobinas en serie-antiserie para que la variación del flujo sea máxima; si en una bobina el flujo aumenta y en otra disminuye, se colocan en antiserie para que ambas contribuyan con el mismo signo al voltaje inducido.

2.2. Comparación y selección

Para la comparación seleccionamos los valores de la fuerza electromotriz producida en el eje z de la configuración de Foner y los valores de la fuerza electromotriz producida en el eje z de la configuración de Mallison. Figura 6.

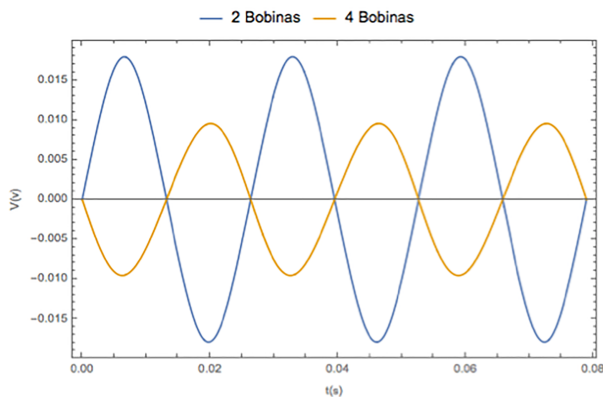


FIGURA 6. Comparación entre 2 Bobinas y 4 Bobinas.

Se observa en la figura 6, que la configuración de dos bobinas brinda mayor voltaje inducido que el de cuatro bobinas. Este resultado es consecuencia de la mayor proximidad de las bobinas a la muestra. Para la elección final se debe considerar la repetitividad de la medición a la hora de colocar la muestra, esto es, debido a que la muestra se coloca manualmente en la varilla no magnética, por lo que es posible que exista cierta variación entre la posición donde se realizó la calibración y la posición en el momento de la medición; se

estaría cometiendo un error de calibración. Para ello, analizamos una situación suponiendo que la muestra es colocada a 2 mm hacia arriba de la posición inicial de calibración y observamos qué ocurre con los valores de la fuerza electromotriz inducida en ambas configuraciones. Figura 7.

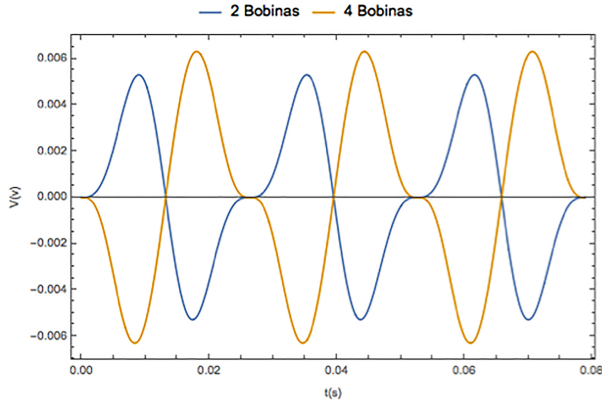


FIGURA 7. Señal producida por la muestra desplazada 2 mm.

La figura 7 muestra que el valor del voltaje inducido en las bobinas de detección ha disminuido, siendo la configuración de dos bobinas el que más lo ha hecho, incluso teniendo un valor menor que el de cuatro bobinas; además de ello se observa que la señal producida en la configuración de dos bobinas tiene un comportamiento cada vez menos sinusoidal. Con este análisis se puede concretar que es más factible la configuración de 4 bobinas, ya que permite minimizar el error que se comete por el desplazamiento de la muestra con respecto a la posición referencial, por lo que en este MMV se utilizará la configuración de Mallison; pues, aunque implique menos señal detectada, será mucho menos sensible a la colocación de la muestra, lo que mejorará la repetitividad de la medida.

3. Montaje experimental

En esta sección explicaremos el montaje experimental y programación realizada en la implementación del MMV. El proceso se puede dividir en las siguientes fases:

3.1. Configuración de Equipos

Mediante el lenguaje de programación correspondiente a cada equipo, se realizan las configuraciones en el software Agilent VEE Pro: El multímetro es ajustado para medir voltios en CA. En el lock-in se ha configurado: una amplitud de oscilación de 5 V para el generador de funciones, una sensibilidad a $100\mu V$, una constante de tiempo de 300 ms, la pendiente del filtro pasa baja de 24 dB/oct y el estado del filtro síncrono menor a 200 Hz. En el gaussímetro se han ajustado las constantes del controlador PID y modo control a la fuente de corriente. En la fuente de corriente se limita por seguridad la $I_{\text{máx}}$ a 12 A, se pone en modo control por entrada analógica (controlado por el gaussímetro).

3.2. Frecuencia de Resonancia

En esta sección analizamos la condición en la que el sistema nos brinda una mayor amplitud de oscilación, puesto que el sistema oscilante no sólo depende de la amplitud que se asigne, sino también de la frecuencia, pues habrá un momento donde el sistema entrará en resonancia y por ende tendrá una mayor amplitud de oscilación. Para ello, en el software programamos para que el generador de funciones del lock-in realice un barrido de frecuencia y el multímetro mida el voltaje inducido producido por el imán de calibración de oscilación para cada frecuencia. Luego de ello el programa determine el valor máximo de voltaje medido con su respectiva frecuencia y se ajuste automáticamente a esa frecuencia para el proceso de caracterización de la muestra.

3.3. Ajuste de Campo

En esta sección realizamos la programación para que la fuente de corriente y el gaussímetro trabajen conjuntamente. El gaussímetro, mediante el mecanismo PID, controla directamente la salida de la fuente de corriente para ajustarla hasta que se alcance el valor deseado de campo magnético. Para ello se debe programar en el modo indicado en el manual y tener precaución de dar tiempo al sistema hasta alcanzar el valor deseado de campo magnético.

3.4. Medición de Magnetización

En esta sección programamos el lock-in para que mida la señal percibida en las bobinas de detección; para cada valor del campo ajustado. Se realiza un bucle de campo magnético para la medida de la magnetización y que en el primer punto se realice un ajuste automático de ganancia en el lock-in.

3.5. Finalizar

Finalmente se programa todo el sistema para que después de realizar la respectiva medición, los equipos regresen a su condición inicial y la muestra deje de vibrar.

3.6. Pantalla principal

Se crea un panel frontal de manipulación donde aparecen visibles únicamente los comandos importantes para la caracterización, como el valor de campo máximo aplicado, el valor de la variación entre cada punto del campo y el valor de la masa de la muestra a caracterizar. Figura 8.

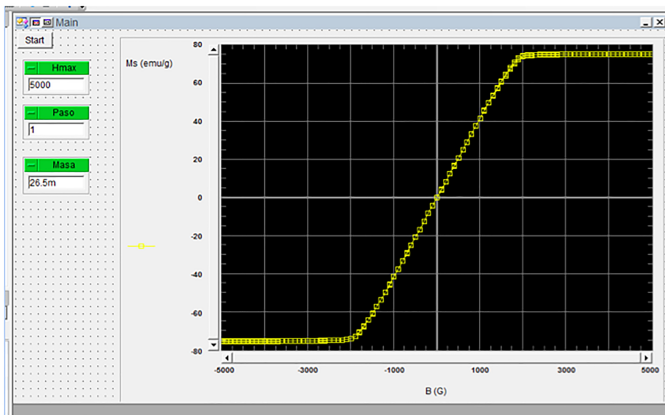


FIGURA 8. *Pantalla frontal principal.*

4. Calibración del sistema de medida

La calibración de la medida es la parte más esencial del MMV, pues de esto depende la utilidad y eficacia de su utilización al momento de caracterizar los materiales magnéticos.

4.1. Varilla no magnética

Para comenzar la calibración debemos tener en cuenta que la varilla no es completamente no magnética, pues presenta un pequeño momento magnético que puede ser captado por las bobinas de detección; para ello, ponemos a oscilar solamente la varilla, por lo que las bobinas de detección captaran únicamente su señal magnética; este proceso lo repetimos varias veces para obtener un promedio de las lecturas y minimizar el error. Con estos datos determinamos su línea de tendencia y su ecuación, Figura 9.

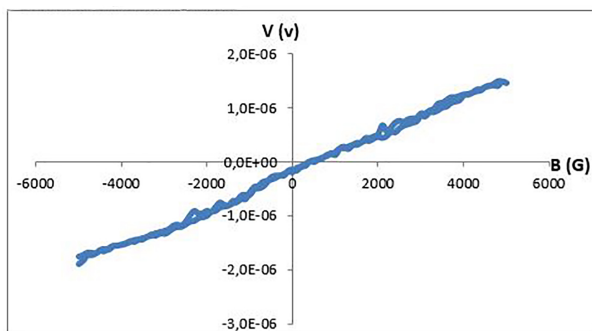


FIGURA 9. Señal de la varilla no magnética.

La ecuación $V = 3,43E-10 B - 1,89E-7$, corresponde a la línea de tendencia central de los datos; esta ecuación la incluiremos dentro de la programación de medida de magnetización, de manera que se elimine la interferencia de la varilla durante las mediciones, es decir, $V_{vacío} = V_{medido} - V_{varilla}$

4.2. Dependencia de la amplitud

La señal percibida por las bobinas de detección depende de la amplitud de oscilación de la muestra. Cada vez que se cambie de muestra, frecuencia o amplitud, la señal será diferente, para eliminar esta dependencia debemos calibrar la medida de la señal de salida mediante la amplitud de oscilación con la muestra patrón (Magnetita). En la figura 10(a) se observa que, si la muestra oscila con menor amplitud, la señal percibida por las bobinas de detección también es menor. Para eliminar esta dependencia, a la señal medida por el lock-in la multiplicamos por la amplitud de calibración ($A_{calibración}$) que será la amplitud de oscilación con la

muestra de magnetita y la dividimos por la amplitud de oscilación que se tenga en cada medición ($A_{\text{medición}}$), es decir, la amplitud que medirá el multímetro, de forma que si se cambia la muestra y/o se varía la amplitud, se compensa esa variación.

Se observa en la figura 10(b) que la señal ya no depende de la amplitud de oscilación, de esta manera las futuras mediciones de las muestras a caracterizar podrán oscilar a diferentes amplitudes sin que esto afecte a la calibración. $V_{\text{muestra}} = V_{\text{medido}} * (A_{\text{calibración}}/A_{\text{medición}})$

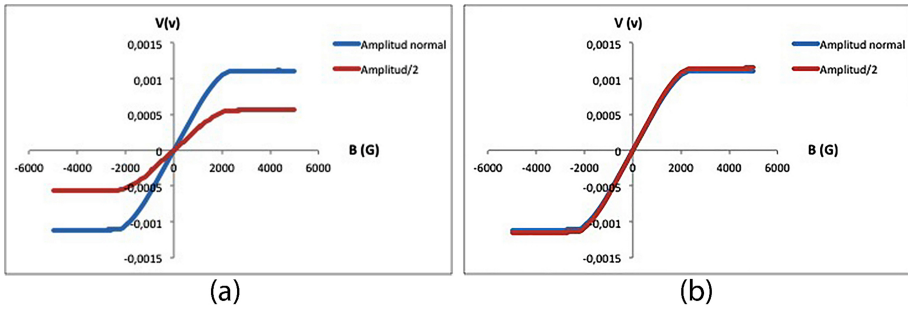


FIGURA 10. Señal con dependencia de la amplitud (a). Señal sin dependencia de amplitud (b).

4.3. Calibración con una muestra patrón.

Para obtener como resultado las curvas de histéresis en emu/g se necesita calibrar nuevamente el MMV; para ello usamos una muestra patrón de composición Fe_3O_4 (magnetita) de 26,5 mg, y con un momento magnético de 92 emu/g [9]. Primero se obtuvo el ciclo de histéresis de la muestra patrón con el MMV, luego se ajustó mediante cálculos numéricos las mediciones de forma que el momento magnético final sea de 92 emu/g ($M_{\text{s calibración}}$). También se ajustó la medida con la masa de calibración ($m_{\text{calibración}}$), que es la masa de la magnetita. La ecuación de calibración es la siguiente:

$$M_{\text{muestra}} = \left(\left(V_{\text{medido}} \frac{A_{\text{calibración}}}{A_{\text{medición}}} * \frac{m_{\text{calibración}}}{m_{\text{medición}}} - V_{\text{varilla}} \right) \frac{M_{\text{s calibración}}}{V_{\text{saturación}}} \right) \quad (5)$$

El ciclo de histéresis de la muestra patrón sin y con calibración se presenta en la figura 11.

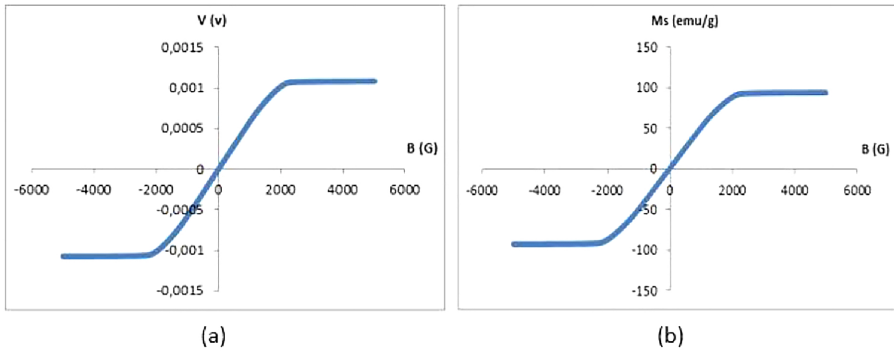


FIGURA 11. Señal sin calibración (a). Señal calibrada con la muestra patrón (b).

4.4. Comprobación de calibración.

Para verificar que el anterior procedimiento funciona adecuadamente y que la calibración es correcta, mediremos una muestra de níquel de 46 mg. Figura 12.

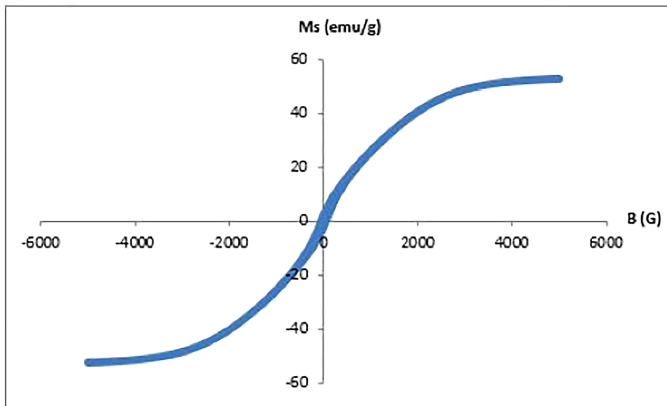


FIGURA 12. Ciclo de histéresis de la muestra de calibración.

Se verifica que tiene un momento magnético de 52,52 emu/g, este valor es muy similar a los 54,7 emu/g [10], lo que indica que la calibración ha sido correcta.

4.5. Límite de sensibilidad

Para determinar la sensibilidad del MMV se caracterizaron materiales con masas muy pequeñas para ver hasta qué punto el MMV detecta la señal de la muestra y que ésta sea mayor que el ruido generado. Se realizaron mediciones con muestras de permalloy de diferentes masas: 10,73 mg, 0,1128 mg, 0,04657 mg y 0,02784 mg, figura 13.

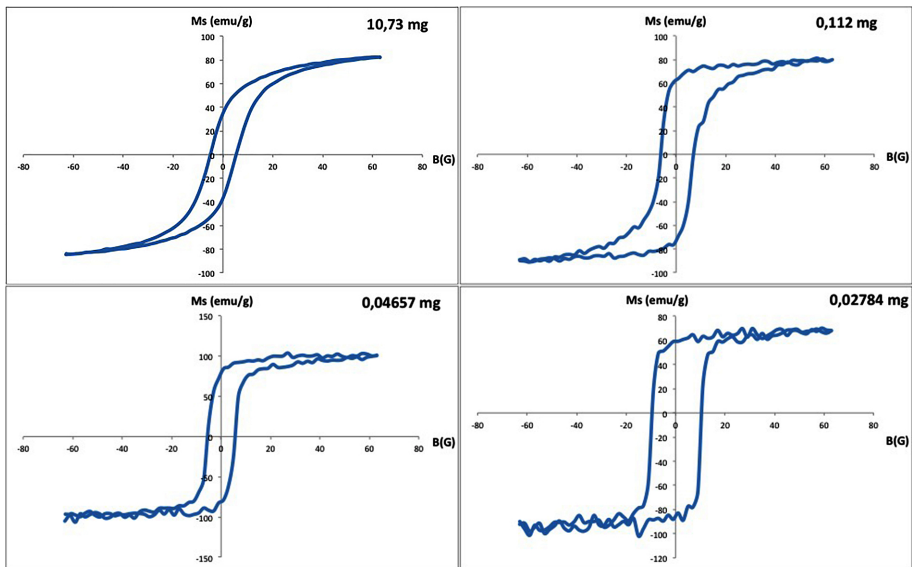


FIGURA 13. Ciclo de histéresis de la muestra de calibración.

Se observa en la figura 13 que, para una muestra de permalloy de masa mayor a 10 mg, se tiene un ciclo de histéresis muy bien definido, sin ruido importante y con un momento magnético de 84 emu/g, valor dentro del intervalo esperado comparado con los datos encontrados en la bibliografía [11]. Para la muestra de 0,1 mg, el ciclo de histéresis comienza a perder su forma, siendo el ruido apreciable, aunque el ciclo aún es reconocible. Para la muestra de 0,04657 mg, el ciclo de histéresis se deforma, aunque todavía tenga forma apreciable; los valores de Ms distan mucho de los comparados con la bibliografía. Finalmente, para muestras de 0,02784 mg, existe mucho ruido y el ciclo de histéresis está muy deformado, variando

en gran cantidad la medida del momento magnético en comparación con las anteriores mediciones. De las anteriores medidas estimamos que el ruido presente en ellas es del orden de 0.05 emu en cualquiera de ellas, por lo que resulta razonable requerir que la mínima señal que podemos medir deber ser un orden de magnitud mayor, por tanto de 0.5 emu.

Conclusiones

Se construyó un magnetómetro de muestra vibrante de gran sensibilidad y de bajo costo, utilizando materiales encontrados en un laboratorio de electromagnetismo. El MMV construido permite analizar el momento magnético de muestras, con un error menor al 3%; los resultados obtenidos están en concordancia con los encontrados en la literatura.

La sensibilidad del MMV depende en gran parte de las bobinas de detección: ellas son las encargadas de detectar la señal de la muestra, por lo que es necesario tener una adecuada configuración de las mismas. La configuración Mallison resultó ser la más favorable para nuestro caso.

Se puede realizar las configuraciones para que la señal de la muestra sólo dependa de su masa, obviando el aporte de la amplitud y de la frecuencia.

Para tener una medida coherente y óptima de la señal, la constante de tiempo del lock-in debe ser de 300 ms.

El magnetómetro de muestra vibrante construido detecta señales coherentes para muestras mayores a 800 emu.

En las medidas presentadas anteriormente se muestra la versatilidad del dispositivo, pudiendo medir muestras con campo coercitivos y de saturación muy bajos, como en las muestras de permaloy, y ciclos casi anhisteréticos, como la magnetita, con campo de saturación de miles de Gauss.

Referencias

- [1] J. Dorantes, *Ciencia*, 18 (2003).
- [2] S. Foner, *Rev. Sci. Instrums.* **30**, 548 (1959).

-
- [3] Stanford Research systems, “Model sr850 dsp lock-in amplifier,” (1992).
 - [4] W. Coba, *Control Pid un Enfoque Descriptivo* (Universidad Tecnológica Nacional, 2005).
 - [5] Agilent, “Vee pro 9.3 quick start guide,” (2011).
 - [6] J. Mallinson, *App. Phys.* **37**, 2514 (1966).
 - [7] M. Barral and J. Ruso, *Introducción al electromagnetismo*, Manuais universitarios (Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, 2008).
 - [8] L. Avilés, *Implementación de un magnetómetro de muestra vibrante para la caracterización de materiales magnéticos* (Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2010).
 - [9] K. Lu, N. Manjooran, M. Radovic, G. Pickrell, E. Medvedovski, E. Olevsky, C. Li, G. Singh, and N. Chopra, *Advances in Nanomaterials and Nanostructures*, Ceramic Transactions Series (Wiley, 2011).
 - [10] B. Cullity and C. Graham, *Introduction to Magnetic Materials* (Wiley, 2011).
 - [11] J. Mallinson, *Magneto-Resistive and Spin Valve Heads: Fundamentals and Applications*, Electromagnetism (Elsevier Science, 2001).