

# Medición del lazo de histéresis. Método con corriente alterna e inductancia mutua para calibración

A. González Arias; F. González-Quevedo; A. González Blanco. Laboratorio de Magnetismo, Facultad Física-Matemática, Universidad de La Habana

## RESUMEN

Se describe un método de calibración y el circuito utilizado para la medición del lazo de histéresis mediante corriente alterna de baja frecuencia. La calibración se lleva a cabo utilizando una inductancia mutua, y permite eliminar la imprecisión característica de los circuitos de amplificación. El método es simple y permite determinar los parámetros relacionados con el lazo de histéresis en forma rápida y con buena precisión.

## ABSTRACT

A calibration method and measurement circuit, used in the obtention of hysteresis loops by means of low frequency a.c., are described. The calibration, carried out with a mutual inductance, makes it possible the elimination of the inaccuracies associated to amplifier circuits. The method, being a simple one, makes it possible to obtain the parameters related to hysteresis loops in a fast way, with good accuracy.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más importantes relacionados con el estudio de materiales magnéticos es el de determinar la inducción magnética en función del campo aplicado (curvas de  $B$  vs.  $H$ ), así como la característica derivada  $\mu$  vs.  $H$  ( $\mu = B/\mu_0 H$ , permeabilidad relativa;  $\mu_0$  permeabilidad del vacío). En la figura 1 se muestra la sección superior de un lazo de histéresis típico de un material ferro o ferrimagnético, señalando los principales parámetros que lo caracterizan.

La remanencia  $B_r$  y la fuerza coercitiva  $H_c$  dependen del valor de  $H_m$  (y  $B_m$ ), campo máximo aplicado e inducción máxima, respectivamente.  $B_r$  y  $H_c$  se reportan usualmente a un determinado valor de  $H_m$  (por ej., a 1 Oersted, o su equivalente en Ampere/metro). La curva punteada es la curva de inducción normal o curva virgen de magnetización, y es la envol-

vente de los extremos de la familia de lazos obtenida con diferentes valores de  $H_m$ , en condición cíclica /1/. La inducción de saturación  $B_s$  se define como el valor asintótico a que tiende  $B$  para valores muy grandes de  $H$  (usualmente del orden de 3000-5000 A/m en materiales magnéticamente blandos).

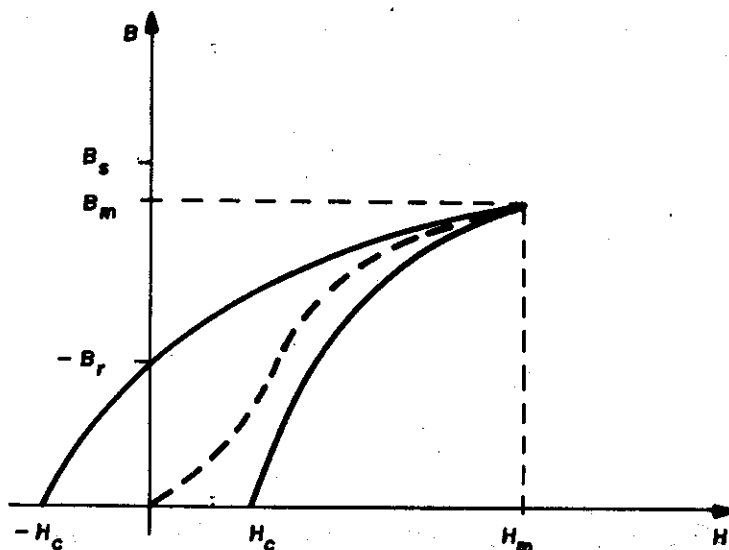


Figura 1.

Otros parámetros de interés son la permeabilidad inicial ( $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} B/\mu_0 H$ ), proporcional a la tangente en el origen a la curva de inducción normal y la permeabilidad máxima, proporcional a la tangente de máximo valor posible, tomada a partir del origen /2/. El área encerrada en el lazo es proporcional a las pérdidas por histéresis, que dan una medida de la eficiencia del material al ser utilizado como dispositivo en circuitos de corriente alterna.

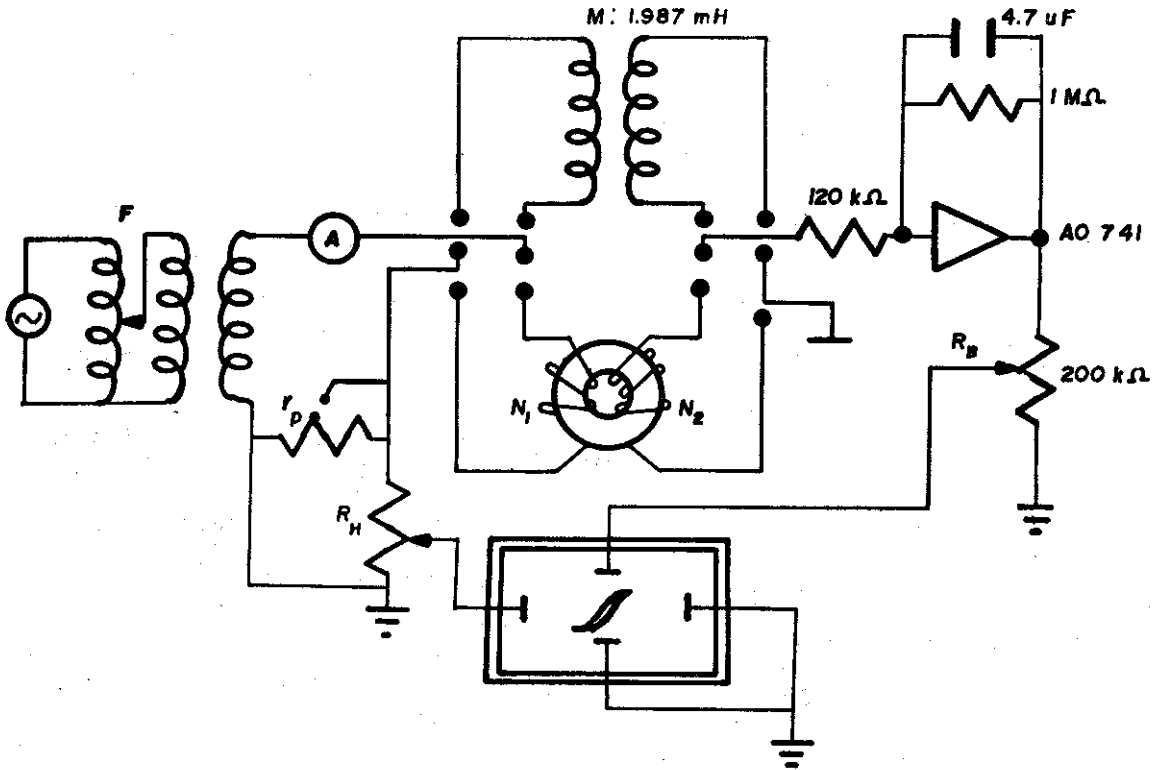
El método tradicional para la medición del lazo de histéresis —que aún se utiliza cuando se requiere alta precisión— es el método balístico de trazado por puntos. Este método tiene el inconveniente de que pueden ser necesarias varias horas para trazar una familia de lazos en un material determinado. Por otra parte, los métodos automáticos cuasiestacionarios para la determinación del lazo requieren, por regla general, complejidad de diseño y requerimientos rigurosos para su utilización /3,4/.

En los materiales magnéticos metálicos, las corrientes parásitas inducidas originan un retraso de la inducción respecto al campo aplicado, si la variación de la magnetización con el tiempo es muy brusca /4/. Esto disminuye grandemente la posibilidad de utilizar corriente alterna para medir los parámetros de histéresis en estos materiales. En las ferritas, donde

la resistividad es varios órdenes mayor que en los metales, y por tanto no aparecen corrientes parásitas detectables en el rango de bajas frecuencias, los métodos basados en corriente alterna e integración electrónica son enteramente satisfactorios para determinar las características estáticas del material, en la casi totalidad de los casos. Los circuitos se simplifican y los requerimientos disminuyen, a costa de una precisión algo menor en la medición. Utilizar directamente el voltaje de la red comercial, a 60 Hz, ofrece la ventaja adicional de tener a mano una fuente ilimitada de corriente, muy conveniente para determinar condiciones de saturación.

En las secciones siguientes se describe un circuito que, no obstante su simplicidad, proporciona buenos resultados en la determinación de los parámetros relacionados con el lazo de histéresis en ferritas blandas. El método de calibración constituye una adaptación al caso de corriente alterna de un método utilizado comúnmente en mediciones balísticas (ver ref. /1/). La calibración permite independizar el resultado de la medición de las características de amplificación del circuito electrónico utilizado, y de su correspondiente imprecisión. Los posibles errores de amplitud y fase introducidos por el circuito integrador aparecen discutidos con bastante detalle en la literatura (ver ref. /2/).

Figura 2



DESCRIPCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL CIRCUITO

En la figura 2 se muestra un esquema del circuito construido. La resistencia  $r_p$  es de 10 Ohm, confeccionada con alambre de mangana. La inductancia mutua  $M$ , de núcleo no magnético, se construyó según el método de Brooke, y se midió a la frecuencia de trabajo utilizando un puente convencional de corriente alterna /5/.

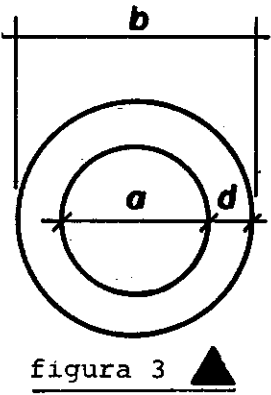
Todas las fórmulas que aparecen más adelante se expresan en unidades SI, y se utilizan los siguientes símbolos para representar los parámetros de interés:

- $H_m$  : intensidad de campo máxima
- $B_m$  : inducción máxima
- $I_m$  : corriente máxima en el primario
- $I_{ef}$  : corriente efectiva en el primario
- $N_1$  : número de vueltas en el primario del toroide
- $N_2$  : número de vueltas en el secundario

- $n_1$  : número de vueltas por unidad de longitud en el primario del toroide
- $V_s$  : voltaje a la salida del circuito integrador
- $V_e$  : voltaje a la entrada
- $\phi$  : flujo magnético en el toroide
- $A$  : área de la sección transversal del toroide
- $RC$  : constante del circuito integrador
- $M$  : inductancia mutua de calibración

Calibración de  $H$ . Consideremos el toroide de sección rectangular de la figura 3, donde  $d=(b-a)/2$ , y  $r_0=(a+b)/4$  (radio promedio).

Usualmente, la intensidad de campo  $H$  en un toroide se calcula por la expresión  $H = n_1 I = N_1 / 2\pi r_0$  /6/. Sin embargo esta es una expresión aproximada, válida solamente cuando  $d/r_0 \ll 1$ . (Ver ref/1/ y /2/). Al considerar la



variación de  $H$  en función de la distancia al centro del toroide, aplicando el teorema del valor medio, se obtiene que la relación entre el campo efectivo en el toroide y el calculado por la expresión  $H=n_1 I$  viene dado por la expresión.

$$k = \frac{H(\text{efectivo})}{H(\text{calculado})} = \frac{1}{2} \frac{(a+b)}{(b-a)} \ln(b/a) .$$

En la tabla 1 aparecen los valores de  $k$  para distintos valores de  $b/a$ , factibles de presentarse en núcleos de ferritas. El valor de  $H$ , calculado por la relación  $n_1 I$ , debe ser multiplicado por el correspondiente valor de  $k$ , para no introducir errores considerables durante la medición de núcleos pequeños.

Al llevar a cabo la calibración, el valor de  $H_m$  se calcula directamente a partir de la lectura del amperímetro:  $H_m = k n_1 \sqrt{2} I_{ef}$ . Es fácil ver que la amplitud de la señal en el eje X del osciloscopio es proporcional a  $H_m$ , y que la constante de proporcionalidad se puede variar mediante el potenciómetro  $R_H$ . En la práctica, para calibrar, tras colocar en la pantalla del osciloscopio la zona deseada del lazo de histéresis variando la fuente  $F$ ,  $R_H$  y  $R_B$  a conveniencia, se desconecta la señal del eje Y, y sin tocar nuevamente  $R_H$  y  $R_B$ , se lleva la señal a plena escala mediante  $F$ , anotándose el valor de la corriente, y se calcula el correspondiente  $H_m$ . Si hay  $2n$  divisiones en el osciloscopio, como sólo hay que considerar el medio ciclo positivo, el campo por división será  $H_0 = H_m/n$  (A/m por división, en unidades SI).

La relación de proporcionalidad entre  $H$ ,  $I_{ef}$  y la señal del osciloscopio, garantiza que la calibración se mantenga para cualquier valor posterior del  $I_{ef}$ , siempre que  $R_H$  no varíe.

Calibración de B. Para la calibración de B se utiliza la inductancia mutua  $M$ . En el circuito integrador,

$$V_s = (1/RC) \int V_e dt . .$$

Cuando el toroide está conectado al circuito de integración,

$$V_e = N_2 d\phi/dt = N_2 A dB/dt,$$

$$V_s = N_2 AB/RC .$$

El voltaje en el eje Y del osciloscopio es proporcional a  $B$ , con una constante de proporcionalidad que varía según el valor de  $R_B$ . Al

TABLA 1

FACTORES DE CORRECCIÓN

b/a	k	b/a	k	b/a	k
1.1	1.0008	2.1	1.0456	3.1	1.1045
1.2	1.0028	2.2	1.0513	3.2	1.1103
1.3	1.0054	2.3	1.0572	3.3	1.1160
1.4	1.0094	2.4	1.0630	3.4	1.1218
1.5	1.0137	2.5	1.0690	3.5	1.1275
1.6	1.0183	2.6	1.0750	3.6	1.1331
1.7	1.0234	2.7	1.0809	3.7	1.1387
1.8	1.0286	2.8	1.0868	3.8	1.1443
1.9	1.0341	2.9	1.0927	3.9	1.1498
2.0	1.0397	3.0	1.0986	4.0	1.1552

conectar la inductancia mutua  $M$ ,  
 $V_e = M dI/dt$ , y  $V_s = MI/RC$ .

Cuando los voltajes *máximos* de salida sean iguales en ambos casos, (igual deflexión en la pantalla del osciloscopio), tendremos que  $B_m = \sqrt{2MI_{ef}/N_2 A}$ . Notar que esta expresión no depende de las características del circuito integrador.

Para calibrar la inducción mag-

nética, una vez calibrado el campo  $H$ , y sin variar  $R_B$ , se conecta  $M$  al circuito, se desconecta la señal del eje X, y se varía la fuente F hasta obtener deflexión a plena escala, anotándose el valor de la corriente y calculándose  $B_m$ . Al igual que en el caso anterior, si hay  $2n$  divisiones, entonces  $B_0 = B_m/n$  (Teslas por división, en unidades SI).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de los errores de calibración da por resultado que es imprescindible medir el valor de la corriente con la mayor precisión y exactitud posible, y también las dimensiones del toroide, especialmente su sección transversal. Por otra parte, el valor de  $k$  obtenido por interpolación lineal, a partir de la tabla I, no introduce error apreciable en la medición.

Se obtuvieron buenos resultados utilizando pocas vueltas de alambre grueso (0.3-0.4 mm) en el primario del toroide, pero en este caso es necesario que el enrollado sea lo más homogéneo posible, con las espiras unidas estrechamente y, de ser posible, en una sola capa. De lo contrario, la dispersión del campo magnético en el enrollado primario afectará notablemente los resultados. Cuando las vueltas necesarias son muy pocas, puede ser conveniente enrollar dos o tres alambres paralelos en cada vuelta,

para así cubrir mayor superficie. En este caso el error que se comete al contar una vuelta en exceso o defecto puede ser notable.

El número de vueltas  $N_2$  generalmente queda determinado por las características del material magnético y la amplificación del osciloscopio empleado.

Utilizando este método, ha sido posible determinar, punto a punto, la curva de inducción normal y las características de  $\mu$  vs.  $H$ , en ferritas de parámetros conocidos, con un error no mayor de 5%, sin tomar precauciones especiales para medir la corriente. Si la pantalla del osciloscopio utilizado es demasiado pequeña, el error de lectura puede llegar a ser del orden del error de calibración, e incluso mayor. En este caso puede ser conveniente efectuar dos o más calibraciones, con diferente sensibilidad, durante la determinación de los parámetros del lazo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Harris, F.K.  
"Electrical Measurements",  
Ed. R., 1962.
2. Berkowitz, A.E.  
"Magnetism and Metallurgy",  
Tomo 1, 1969.
3. Bockemuehl, R.R. and  
W.E. Sargeant  
J. Appl. Phys., sup V 31,5,  
1960.
4. Cioffi, P.P.  
The Rev. of Sci. Instr. 21, 7,  
1950.
5. Ver ref /1/, pp. 661, 669, 723.
6. Reitz, J.R. and F.J. Milford  
"Foundations of Electromagnetic Theory", Ed. R., 1959.

Recibido: 19 de julio de 1983.