

Medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético

Leandro Carballo^(a) y Ramón Gómez^(b)

Laboratorio de Física II, Curso 2007
Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Favaloro, Av. Belgrano 1723, Buenos Aires, Argentina

En este trabajo obtuvimos el ciclo de histéresis del núcleo ferromagnético de un transformador de 220 V/12 V. Usamos un circuito que nos permitió obtener señales proporcionales a la inducción magnética B en el núcleo y a la intensidad del campo magnético aplicado H. Registramos la curva de histéresis con un osciloscopio de dos canales funcionando en el modo XY.

Introducción

Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal, homogéneo e isótropo se definen en función de la susceptibilidad magnética, χ_m , coeficiente adimensional que representa la proporcionalidad entre la magnetización o imanación M y la intensidad de campo magnético H, según la ecuación:^[1]

$$M = \chi_m H \quad (1)$$

La inducción magnética B está relacionada con estas dos variables:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2)$$

siendo μ la permeabilidad magnética del medio, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío y μ_r la permeabilidad relativa ($\mu_r = 1 + \chi_m$).

Dependiendo del valor de μ_r , los materiales pueden clasificarse en los siguientes grupos:

$\mu_r \leq 1$	$\chi_m \sim -10^{-5}$	diamagnéticos
$\mu_r \geq 1$	$\chi_m \sim 10^{-3}$	paramagnéticos
$\mu_r \gg 1$	χ_m valor elevado	ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos presentan imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos muy débiles y son los más usuales en las aplicaciones tecnológicas. En estos materiales, las intensas interacciones entre los momentos magnéticos atómicos los lleva a alinearse paralelamente unos a otros en regiones denominadas dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo.

Si aplicamos una intensidad de campo magnético o excitación magnética H creciente a una muestra de material ferromagnético, y representamos la inducción B en función de H, obtenemos la llamada curva de imanación o magnetización del material (Figura 1).

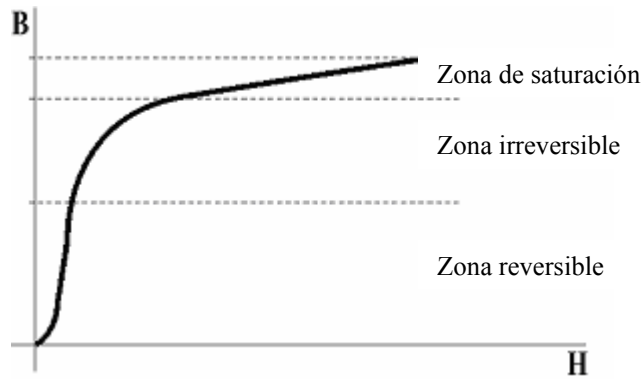


Figura 1. Curva de imanación o magnetización.

En la Figura 1 vemos que se pueden distinguir tres partes claramente diferenciadas en la curva de imanación. Se observan: una primera zona reversible, en la cual si eliminamos el campo H exterior, la densidad de flujo también desaparece; una segunda zona irreversible; y una última parte, que representa la zona de saturación, en la cual la permeabilidad relativa es unitaria.

El valor de B que se produce en un material ferromagnético debido a una determinada excitación magnética H no es una función uniforme, sino que depende del material. Si introducimos una muestra de material ferromagnético en el interior de una bobina y hacemos variar H modificando la corriente que circula por la bobina, obtenemos la siguiente curva:

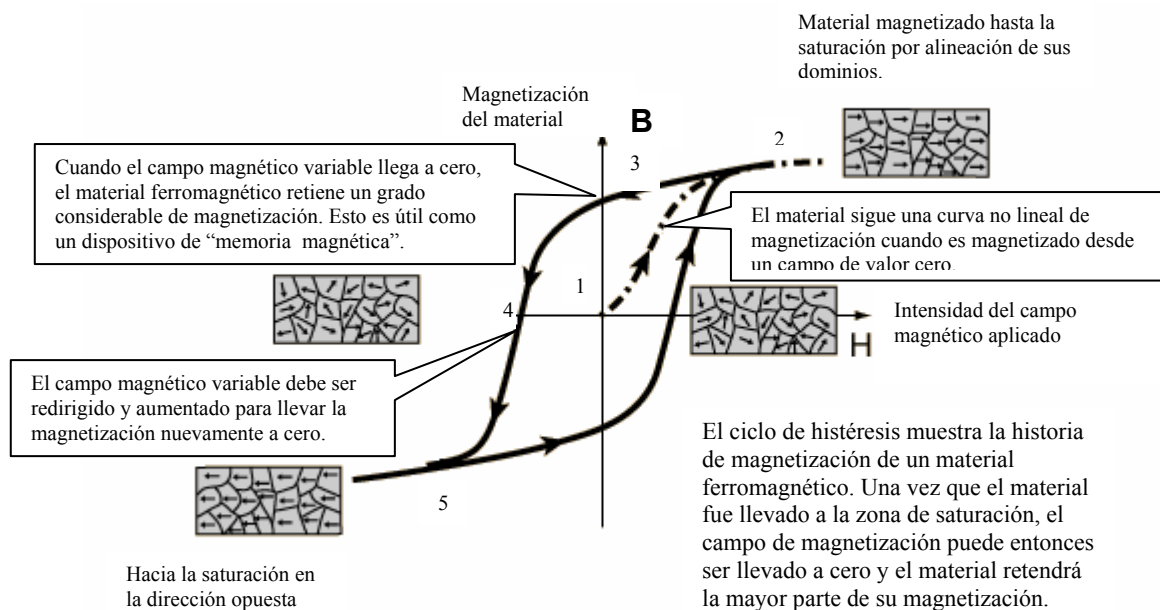


Figura 2. Curva de histéresis.

Con respecto a la Figura 2, cuando $H = 0$ en el punto 3, aún existe una cierta magnetización $B = B_r$ que recibe el nombre de inducción remanente y constituye el

estado de magnetización permanente de la muestra. Cuando $B = 0$, en el punto 4, H presenta un valor de H_c que se denomina campo coercitivo, que es el campo opuesto que es necesario aplicar para desmagnetizar la muestra. Si se continúa disminuyendo H hasta alcanzar $H = -H_{m\acute{a}x}$, punto 5, y después invertimos el sentido de cambio de H , se llega a formar una curva cerrada, que recibe el nombre de ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis es una representación gráfica de los diferentes estados por los que pasa el material ferromagnético a lo largo del ciclo de trabajo. Si la intensidad de campo H varía entre $\pm H_{m\acute{a}x}$, el material ferromagnético describe dentro del plano de estado B - H una gráfica, de modo que los valores que se obtienen aumentando H no coinciden con los obtenidos al hacer disminuir H . Si partimos de un punto situado en la curva de histéresis, por ejemplo, el punto 2, y volvemos a dicho punto recorriendo un ciclo, nos encontraremos en la situación inicial, pero se ha disipado una energía que es proporcional al área encerrada bajo la curva B - H . Esta energía perdida se denomina como “pérdidas por histéresis”. A su vez, la temperatura del material aumenta durante este proceso.

Los materiales ferromagnéticos se utilizan extensamente en electroimanes, núcleos de transformadores y motores y generadores, en los cuales es deseable tener un campo magnético tan grande como sea posible con una corriente determinada. Ya que la histéresis disipa energía, los materiales que se utilizan en estas aplicaciones deben tener un ciclo de histéresis tan estrecho como sea posible. En los imanes permanentes por lo regular es deseable un ciclo de histéresis amplio, con una magnetización de campo cero intensa, y la necesidad de un campo inverso también intenso para desmagnetizar (Figura 3).

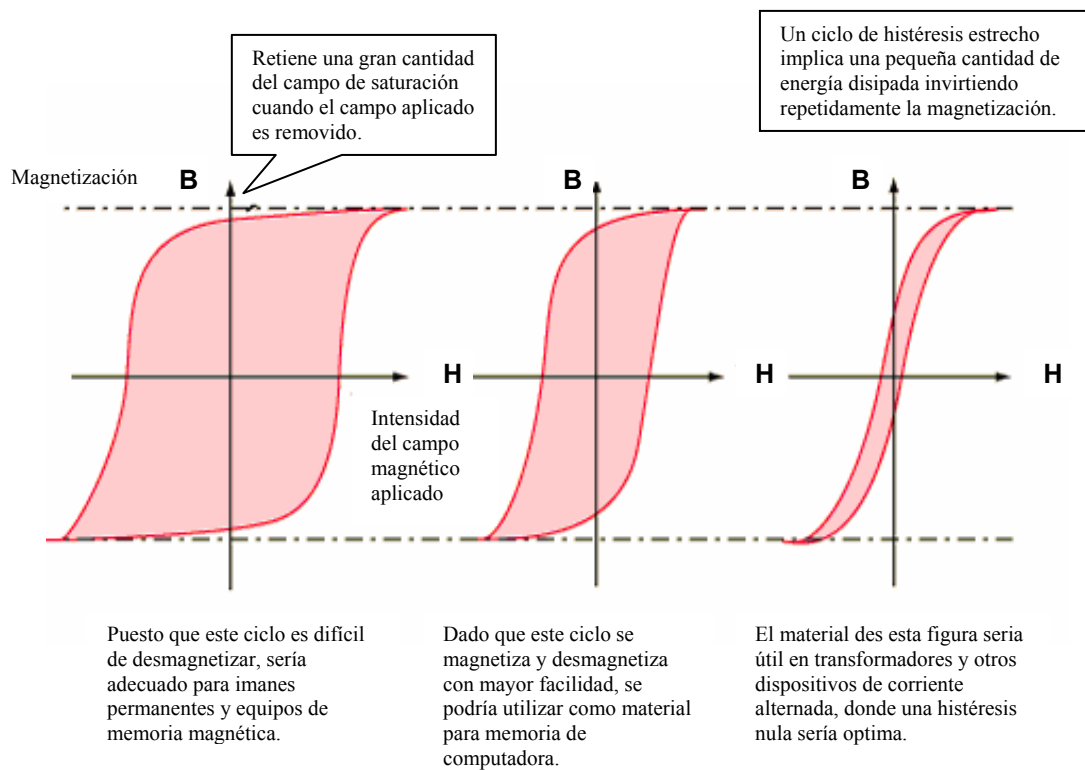


Figura 3. Ciclos de histéresis y su posible uso en distintas aplicaciones. Extraído de Ref.[3].

Método experimental

La muestra magnética que estudiamos es un toroide de ferrita que constituye el núcleo de un transformador comercial de 220 V a 12 V, y que cuenta con un bobinado primario y uno secundario. El dispositivo experimental utilizado para visualizar la curva de histéresis se muestra esquemáticamente en la Figura 4. Para realizarlo contamos con el transformador, resistencias de $1\ \Omega$ y $320\ K\Omega$, un condensador de $1\ \mu F$ y un osciloscopio de dos canales.^[4]

Colocamos una resistencia R_1 en serie con el primario del transformador y alimentamos a éste con un voltaje alterno tomado de la tensión de línea (220 V, a 50 Hz). Para terminar el armado del sistema dispusimos de un circuito RC en serie con el secundario.

Por un lado, medimos la caída de tensión V_1 en R_1 conectando los extremos de la resistencia al canal 1 del osciloscopio. De esta manera, pudimos tener una señal proporcional a la corriente I_p en el primario ($V_1 = I_p \cdot R_1$) y, por lo tanto, esta tensión nos dio una señal proporcional al valor de H en el toroide.

Como aplicamos una tensión variable al primario, en el secundario inducimos una fuerza electromotriz (fem) ε que, según la Ley de Faraday, es:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt} \quad (3)$$

donde ϕ_B es el flujo magnético que atraviesa el secundario y N_2 el número de espiras del secundario. Dado que el flujo magnético ϕ_B es proporcional a B, de la ecuación (3) se ve que la integral de la fem ε es proporcional al valor de B en el toro. Para integrar la señal del secundario y obtener un voltaje proporcional a B usamos el circuito RC conectado al secundario. El circuito tiene una constante de tiempo $\tau = RC \gg 1/\omega$, donde $\omega = 2\pi f$, y f es la frecuencia de la tensión aplicada. Por lo tanto, conectando los extremos del condensador en el canal 2 del osciloscopio puede obtenerse la señal del integrador V_2 que es proporcional a B. Finalmente, cambiando el osciloscopio al modo XY se obtiene la curva V_2 en función de V_1 , que es representativa de la curva de histéresis magnética B-H del material estudiado.

Por razones de seguridad, en este tipo de experimentos es recomendable usar un transformador de buena calidad, donde el secundario esté aislado eléctricamente del primario, lo que debe verificarse exhaustivamente. Recordamos además que el uso de un auto-transformador también implica riesgos, por lo que debería evitarse. Tampoco es recomendable conectar el bobinado del primario directamente a la tensión de línea ya que puede destruirse el bobinado o bien favorecer el riesgo de accidentes.^[2] En nuestro caso, luego de probar de varias maneras, tomamos la decisión de flotar todo el sistema sin dejar elementos a tierra, ya que de otra manera no conseguíamos visualizar la curva de histéresis debido entre otras cosas a la débil señal que conseguíamos en el secundario, o bien prevalecía un indeseado “conflicto de tierras”, lo que tratamos de evitar de este modo. No obstante, trabajamos con sumo cuidado, respetando las normas de seguridad del laboratorio y prestando mucha atención a la tarea que realizábamos.

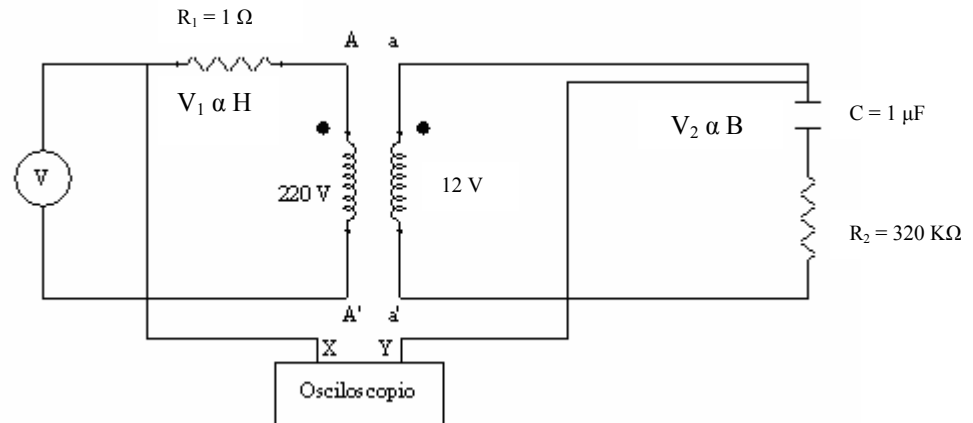


Figura 4. Diagrama esquemático del dispositivo experimental para estudiar la histéresis de una muestra magnética.

Resultados

Con las conexiones establecidas al osciloscopio, pudimos obtener las señales de la tensión en la resistencia R_1 , y la señal de la tensión en el condensador (véase Figuras 5 y 6).

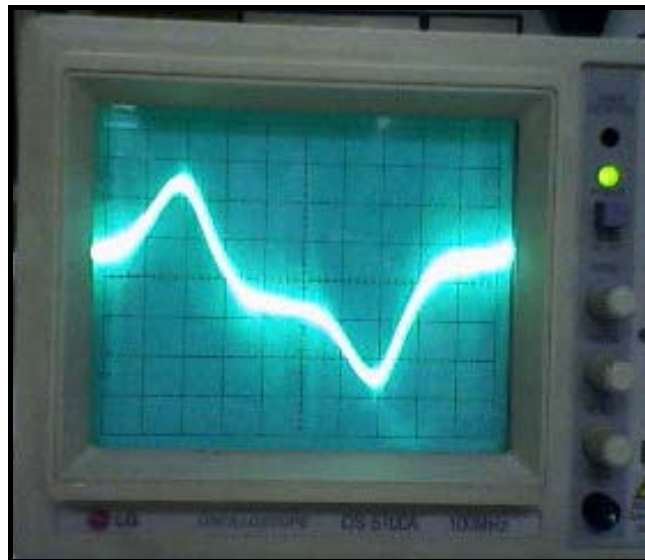


Figura 5. Señal en la resistencia R_1 .

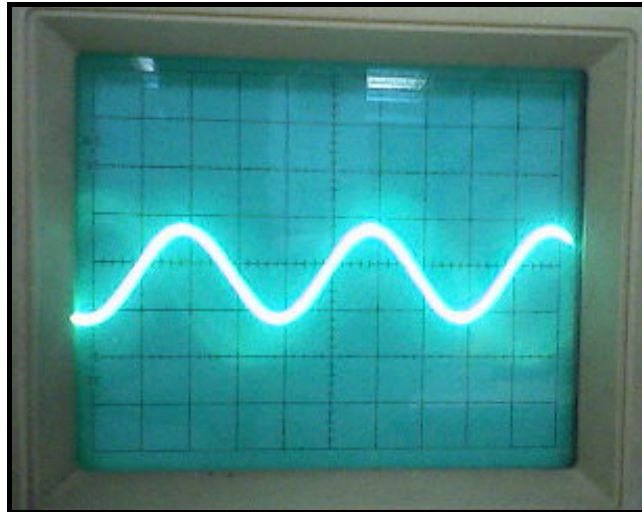


Figura 6. Señal en el capacitor C.

Luego de disponer el osciloscopio en modo XY, pudimos obtener la curva de histéresis mostrada en la Figura 7. En la Figura 8 podemos observar como varía la curva modificando la escala del voltaje en el canal 2, yendo de 100 mV a 50 mV. En la Figura 9 se puede observar una digitalización de la imagen realizada con el software FotoAnalyzer.

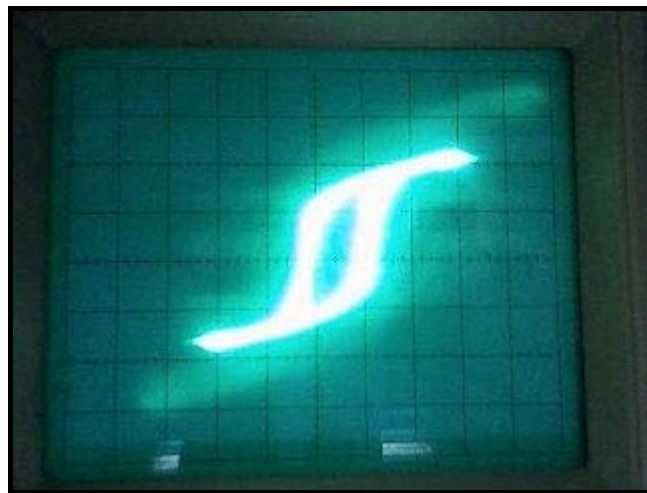


Figura 7. Curva de histéresis en el osciloscopio con una escala de 100 mV en el canal 2.

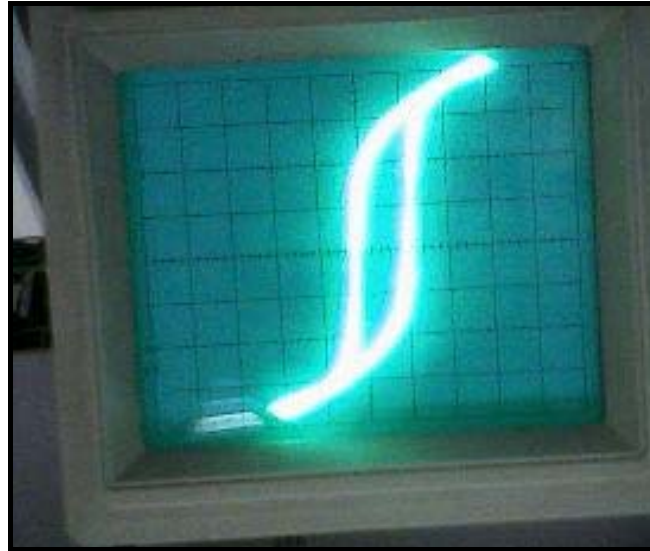


Figura 8. Curva de histéresis en el osciloscopio con una escala de 50 mV en el canal 2.

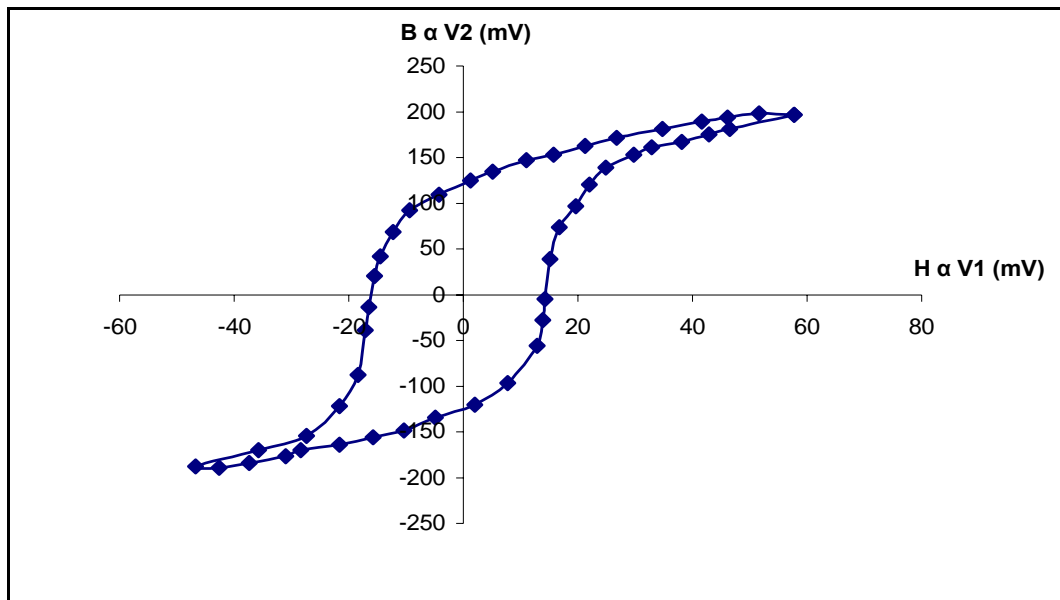


Figura 9. Digitalización de la curva de histéresis lograda con el FotoAnalyzer.

De los datos obtenidos podemos medir establecer los siguientes campos:

$$\text{Campo de saturación: } B = \frac{1}{N_2 A} 0,063 \text{ T}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{Campo de remanencia: } B_r = \frac{1}{N_2 A} 0,040 \text{ T}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{Campo coercitivo: } H_c = \frac{N_1}{l} \mu_0 I_1 = \frac{N_1}{l} 2,07 \times 10^{-8} \text{ T}\cdot\text{m}$$

siendo N_2 y N_1 el número de vueltas en los bobinados secundarios y primario, respectivamente, A el área y l la longitud.

Sabiendo que μ_r del material es $\mu_r = \frac{dB}{dH}$, mediante cálculo numérico pudimos calcular la derivada y obtener el grafico de la Figura 10. Aquí podemos ver como varía la permeabilidad magnética del material en función del campo aplicado.

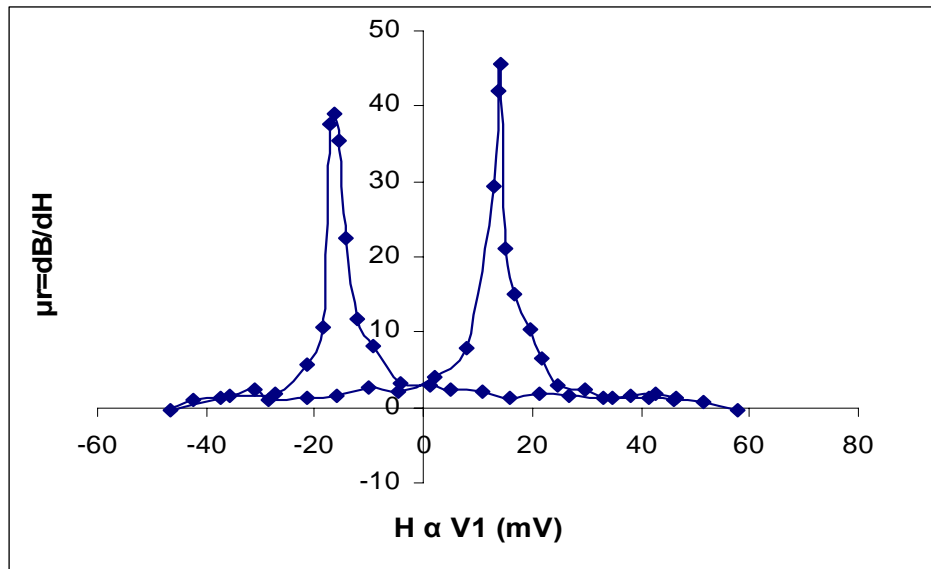


Figura 10. Permeabilidad magnética del material en función del campo aplicado.

Conclusiones

Esta experiencia nos permitió llegar a una mejor comprensión de un tema tan importante como es el ciclo de histéresis de un material ferromagnético. Las observaciones indican que cuando el campo magnético variable H llega a cero, el material ferromagnético retiene una considerable magnetización. En nuestro caso, luego de alcanzar el campo de saturación B , al retirar H , el núcleo ferromagnético de nuestro transformador mantuvo un campo B_r de alrededor de un 63% del máximo. Además, el valor obtenido del campo coercitivo H_c nos indica que debemos aplicar un campo opuesto pequeño para desmagnetizar la muestra.

Finalmente pudimos corroborar que la permeabilidad magnética μ_r es una propiedad intrínseca del material ya que aplicando intensidades de H con mismo módulo pero con distintos signos, el valor de μ_r es el mismo.

Anexo – Análisis de las relaciones entre las tensiones medidas y los campos $B(t)$ y $H(t)$

Para visualizar la curva de histéresis en el osciloscopio, teniendo en cuenta que este aparato sólo permite medir tensiones, hemos de encontrar el modo de poder representar $B(t)$ y $H(t)$, en función de diferencias de potencial que sean proporcionales a estas variables.

Medida de $H(t)$

$H(t)$ es proporcional a las corrientes que circulan por los circuitos primario y secundario:

$$\oint_L H dl = Ni$$

Si tenemos conectada una carga muy pequeña en el secundario del transformador, la corriente $I_2(t)$ que circula por la misma será despreciable, por lo tanto podemos aproximar esta situación a la de vacío, considerando en ese caso que sólo circula corriente por el primario del transformador. (Si $I_1(t) = I_0(t) + I_2(t)$, teniendo en cuenta que $I_2(t)$ es muy pequeña, podremos aproximar I_1 a I_0 : corriente del transformador en vacío).

En nuestro caso, la carga es de $R = 320 \text{ K}\Omega$ y $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$. La impedancia de la carga $Z_2 = 320000 - j \frac{1}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 320000 \text{ }\Omega - j 3183 \text{ }\Omega$. Por lo tanto, Z_2 es una carga muy pequeña (impedancia muy grande), netamente resistiva.

Sabiendo que $V_2 = 12 \text{ V}$, la corriente en el secundario será:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \cong 37,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 37,5 \text{ }\mu\text{A}$$

A partir de la tensión en la resistencia de $1 \text{ }\Omega$, medida en el canal 1 del osciloscopio, comprobamos que el valor de $I_1(t)$ que se obtiene es muy superior a $37,5 \text{ }\mu\text{A}$, pudiéndose realizar la aproximación mencionada (la carga del transformador tiene una impedancia tan elevada, que la corriente del secundario es despreciable, pudiéndose considerar que el transformador está prácticamente en vacío, y por tanto, $I_1(t) \approx I_0(t)$).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, $H(t)$ será proporcional a $I_1(t)$. Si en el canal 1 del osciloscopio medimos $V_1(t)$, como se muestra en la figura del esquema, estaremos midiendo una forma de onda proporcional a $H(t)$ en el eje X, que era nuestro propósito.

Medida de $B(t)$

Para la medida de $B(t)$, partimos de la relación entre esta magnitud y el flujo magnético que atraviesa una superficie S:

$$\phi = \int B \cdot dS$$

Si $B(t)$ es uniforme, tendremos que $\phi(t) = B(t) \cdot S$, es decir, existe una proporcionalidad entre ambas magnitudes, de modo que presentarán la misma forma de onda. El flujo magnético será una función senoidal, que en general, presentará la siguiente forma:

$$\phi(t) = \phi_{\text{máx}} \cos(\omega t)$$

Según la Ley de Faraday, la fem ε que aparece en una bobina, como consecuencia del flujo magnético variable que la atraviesa, es:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

El circuito integrador RC conectado al secundario tiene un valor de R mucho mayor al de la reactancia que ofrece C, por lo tanto la corriente en el secundario es prácticamente

$I_2 = \frac{\varepsilon}{R}$. El voltaje a través de C es proporcional al campo magnético B:

$$V_2 = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{N_2 AB}{RC} \rightarrow B = \frac{V_2 RC}{N_2 A}$$

Referencias

- (a) leacarbollo@yahoo.com.ar
(b) ramon86@gmail.com

1. F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young y R.A. Freedman, *Física Universitaria*, vol. II, Pearson Educación, México, 2005.
2. Salvador Gil y Eduardo Rodríguez, *Física re-Creativa: Experimentos de Física usando nuevas tecnologías*, Prentice Hall, Buenos Aires, 2001
3. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/hyst.html#c4>
4. Yaakov Kraftmakher, "Hysteresis loops of a ferromagnet", *Phys. Teach.*, **43**, 436 (2005).