



Medida del Ciclo de Histéresis de un material ferromagnético

Objetivos:

- a) Medida del ciclo de histéresis de un material ferromagnético.
- b) Cálculo de los principales parámetros magnéticos.

Introducción

Al aplicar un campo magnético sobre cualquier material, éste se imana¹. En general, al retirar el campo magnético, la imanación desaparece, pero existe un grupo de materiales, conocidos como **ferromagnéticos**, que tienen imanación permanente en ausencia de campo magnético². El orden magnético en estos materiales se mantiene por debajo de una temperatura de orden conocida como **temperatura de Curie**. Por encima de esta temperatura, el material pasa a ser paramagnético.

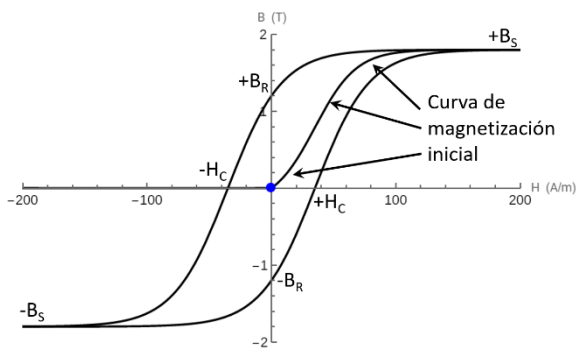


Figura 1. Ciclo de histéresis

La Figura 1 muestra la imanación de un material ferromagnético en presencia de un campo externo, en el eje de ordenadas se representa B porque esa es la magnitud a la que se puede acceder de manera experimental. Se parte de un estado desimanado (el punto azul: $H, B = 0, 0$) y se va aplicando campo magnético, se recorre la **curva de primera imanación** (o magnetización inicial). Cuando se aplica un campo lo

suficientemente intenso, se alcanza la **imanación de saturación** ($+B_s$), que es la imanación máxima posible de un material. A partir de este punto se reduce el campo aplicado, la imanación macroscópica se reduce, pero en general no regresa por el camino original. Este comportamiento irreversible de la imanación se denomina **histéresis**. Se observa en $(H, B) = (0, +B_R)$ que el material se mantiene imanado en ausencia de

¹ En América se usa la palabra *magnetización*, en España se usa *imanación*, en este guion encontrarás ambas acepciones

² Este efecto también existe en los materiales ferrimagnéticos.

campo externo, se denomina imanación (magnetización) remanente a $\pm B_r$. Finalmente observamos el campo coercitivo: $(H, B) = (\pm H_c, 0)$ que es el campo necesario para anular la imanación.

Si se sigue aumentando el campo en sentido negativo, se alcanza el estado de saturación en sentido contrario al inicial ($-B_s$). Realizando la variación de H en sentido inverso se obtiene el llamado ciclo de histéresis del material. El área encerrada por el ciclo es la energía disipada por el material en forma de calor en el proceso cíclico de imanación al que se le ha sometido. Aunque el ciclo de histéresis representa la imanación (M) de un material frente al campo magnético aplicado (H), lo que se obtiene de manera experimental es la gráfica $B - H$ (Figura 1), como en el laboratorio de prácticas. Se puede pasar de una representación a otra considerando la expresión: $B = \mu_0(H + M)$.

Del ciclo de histéresis se puede obtener también la **susceptibilidad magnética**: $\chi = dM/dH$; o la **permeabilidad magnética relativa** $\mu_r = B/\mu_0 H$, esta es igual a cero si el material expulsa todas las líneas de campo magnético (diamagnético perfecto), es igual a uno si las líneas de campo entran al material pero no se genera imanación adicional al campo externo (paramagnético), y es mayor que uno cuando hay campo interno adicional al campo externo (ferromagnético y ferrimagnético). También se puede

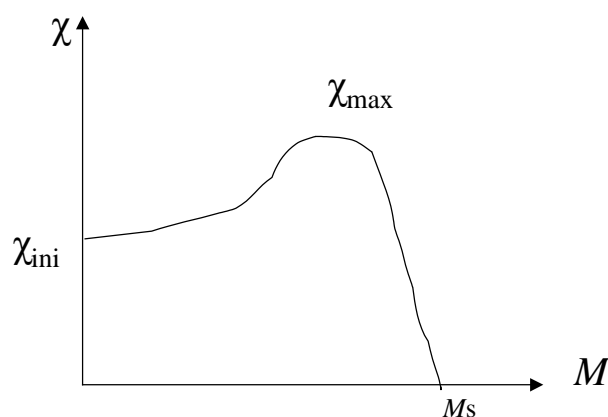


Figura 2. Susceptibilidad vs Magnetización

obtener la **permeabilidad magnética incremental**, $\mu_{in} = dB/dH$. Si medimos M frente a H , a partir de la curva de primera imanación obtenemos la susceptibilidad inicial calculando la pendiente en el origen y la susceptibilidad máxima calculando la pendiente en el punto donde esta sea máxima. Si partiendo de un estado saturado se realizan ciclos de histéresis con amplitudes decrecientes, representando el valor máximo de imanación frente al campo máximo en cada ciclo obtenemos la **curva de conmutación** que a bajas frecuencias suele coincidir con la curva de primera imanación.

La imanación de saturación es el momento magnético por unidad de volumen, y por tanto se puede estimar a partir del producto del número de átomos en dicho volumen ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$) y el momento magnético atómico ($\sim \mu_B$). Ambos factores apenas pueden mejorarse en un sólido con vistas a que aumente la imanación de saturación, cosa deseable para aplicaciones tecnológicas. De hecho, el valor más alto de imanación de saturación a temperatura ambiente lo tiene una aleación de FeCo y es de 2.5 T aproximadamente.

Muy distinta es la situación en lo que se refiere al control del campo coercitivo, que depende de la composición del material, pero también de su estructura, y de otros efectos como tratamientos térmicos y/o mecánicos, o el tamaño de la muestra (variaciones al disminuir al tamaño nanométrico los sólidos). Un adecuado control de la microestructura o nanoestructura del material permite variaciones de más de ocho órdenes de magnitud en el campo coercitivo. Generalmente, el valor del campo coercitivo condiciona el

rango de aplicaciones tecnológicas del material. Los llamados **materiales magnéticos blandos** presentan ciclos de histéresis estrechos, con campo coercitivo bajo, ($10^{-7} - 10^{-4}$ T). Son materiales fácilmente imanables y no presentan apenas imanación remanente. Se emplean en transformadores y en núcleos de sensores.

Los **materiales magnéticos duros** poseen un alto campo coercitivo, (0.1 - 10 T) y sus ciclos de histéresis encierran una gran área. Almacenan, por tanto una alta densidad de energía magnética. Se usan como imanes permanentes y en sistemas de almacenamiento de información.

Nota sobre las unidades

En el S.I., la inducción magnética B se expresa en Tesla (T) y el campo magnético aplicado H y la imanación M en Am^{-1} . La relación constitutiva se expresa como $B = \mu_0(H + M)$. Sin embargo, es muy común hablar de imanación y campo magnético aplicado en Tesla, en cuyo caso formalmente se están expresando los valores $\mu_0 M$ y $\mu_0 H$, respectivamente.

La práctica

Para medir el ciclo de histéresis vamos a establecer un campo magnético en el circuito magnético cerrado del núcleo de un transformador. Para ello haremos circular una corriente continua a través de una bobina que rodea al núcleo. Midiendo el campo B en el núcleo (eje Y) y el campo magnético aplicado H (eje X) obtendrás el ciclo de histéresis del núcleo. Para ello monta el dispositivo mostrado en la Figura 3.

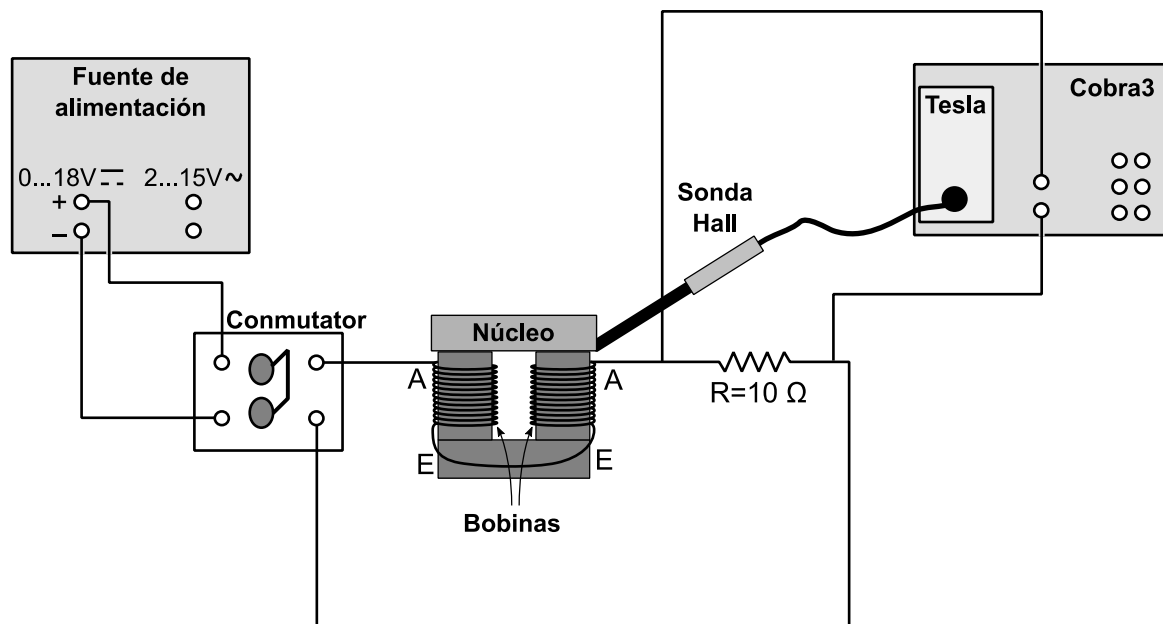


Figura 3. Sistema experimental

Conecta el ordenador y la unidad de adquisición de datos (COBRA), en cuyo frontal se inserta el módulo Tesla, a la red de 220 V. A continuación, conecta la fuente de alimentación a otro enchufe, de modo que ésta quede lo más alejada posible de los elementos anteriores. Tienes que procurar que las bobinas y el transformador

estén alejados también del PC y de la unidad COBRA para evitar errores durante la transferencia de datos por efecto de interferencias asociadas al campo magnético.

Para medir el campo aplicado se utiliza el siguiente orden de ideas: el campo magnético generado por las bobinas es proporcional a la corriente que las atraviesa (ley de Biot-Savart), conectamos a las bobinas una resistencia (en serie para que la corriente sea la misma) y aprovechamos la ley de Ohm ($V = I \cdot R$); de forma que la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia variable es proporcional a la intensidad que pasa por las bobinas, y por tanto, al campo H aplicado. Conecta esta diferencia de potencial a la entrada analógica 2 de la unidad COBRA. Coloca la sonda para medir el campo magnético como se indica en la Figura 3 y conéctala al módulo TESLA. Esta salida entrega un voltaje que es proporcional al campo magnético existente en el núcleo. Por tanto el conjunto COBRA-TESLA registra tanto el campo magnético (B) en el núcleo como permite obtener la corriente (I) que circula a través de las bobinas.

¡Importante! La sonda es un instrumento MUY DELICADO.

Ten cuidado de no golpearla o doblarla, y colócala justo en el centro del núcleo.

Para realizar el ciclo de histéresis completo, debe invertirse el sentido del campo magnético en las bobinas usando el conmutador.

Solo debe accionarse el conmutador cuando el voltaje esté en cero. De lo contrario otros voltajes generados podrían afectar a la transferencia de datos.

Como el núcleo tendrá una imanación residual, deberás **desimanarlo** antes de registrar el ciclo de histéresis. Para ello tienes que aplicar campos magnéticos alternos de amplitud decreciente hasta llegar a cero. Conecta el circuito a la salida de la fuente de alterna de 15 V y ve cambiando el conector de la fuente de alterna a las distintas posiciones, desde el valor máximo de 15 V hasta el mínimo de 2 V.

Para medir el ciclo de histéresis con el ordenador, sigue el siguiente procedimiento:

1. Pincha en el icono del programa *Medida de ciclos* que está en el escritorio.
2. Pincha en el círculo rojo (*New Measurement*) que aparece en el Menú.
3. Selecciona los parámetros de medida en el ordenador como indica la Figura 4.
4. En esta misma ventana entra en la opción “*option*” y selecciona la pestaña “*calibration*”. La sonda Hall deberá estar alejada de las bobinas, al pulsar en “*calibrate*” pondrás a cero la lectura de la sonda Hall. Pulsa OK.
5. Pulsa “*continuar*” para poder ver el gráfico durante las medidas.
6. Llegados a este punto, los valores actuales de la densidad de flujo y de la corriente se muestran de acuerdo a la Figura 5.

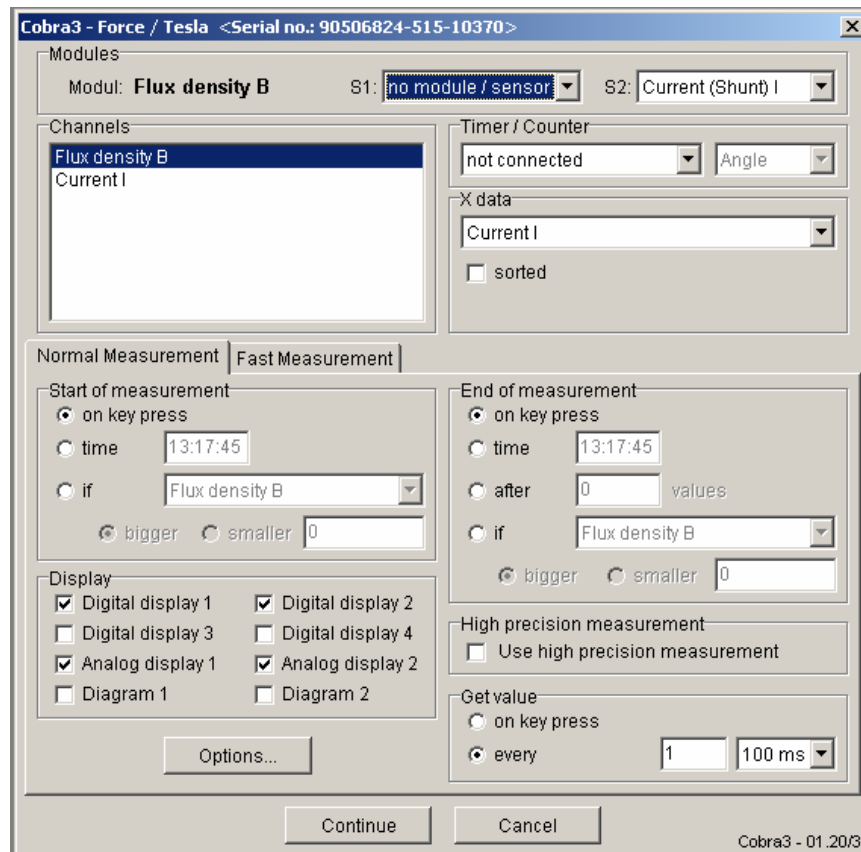


Figura 4. Seleccionar parámetros de medida

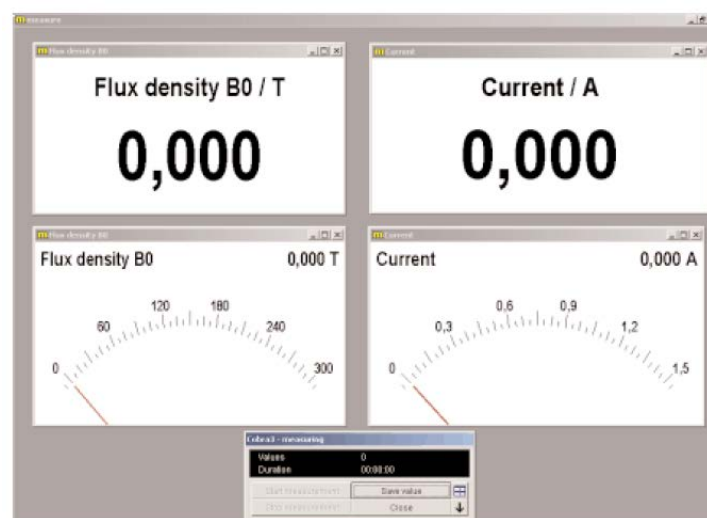


Figura 5. Imagen del programa durante las medidas

Registro del ciclo de histéresis

1. La resistencia variable debe estar seleccionada a 10 Ω . Para ello introduce los cables que llegan a la resistencia por sus bornes negros.
2. Para registrar el ciclo, conecta de nuevo el circuito a la salida de continua de la fuente, gira el potenciómetro de voltaje hasta cero y el de limitación de corriente hasta **5 A** (al máximo).
3. Después de pulsar el icono "Start measurement" incrementa el voltaje lenta y uniformemente desde cero hasta el máximo. Acabas de medir la curva de primera imanación. Baja el voltaje gradualmente y **una vez**

en cero invierte la polaridad con el conmutador. Sube de nuevo al máximo y baja a cero. **Otra vez en cero**, vuelve a invertir la polaridad con el conmutador. Sube de nuevo al máximo; en este momento se habrá cerrado el ciclo.

4. Baja a cero el voltaje para no dejar corriente circulando por las bobinas.
5. Detén la medida presionando la tecla “*Stop measurement*”.
6. Los valores registrados consisten en la gráfica de la densidad de flujo, B (mT), como función de la corriente, I (mA), que circula por las bobinas.

Nota. Es importante bajar a cero el voltaje antes de parar la medida, antes de presionar “*Stop measurement*” para evitar problemas de comunicación entre el ordenador y el sistema de adquisición.

Cómo calcular los parámetros magnéticos a partir del ciclo de histéresis

Lo primero que tienes que hacer es calcular la constante de proporcionalidad del eje X (campo H). Como la unidad COBRA mide voltajes, la corriente que circula por las bobinas se puede obtener con la ayuda de la resistencia de $10\ \Omega$ y la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Hay que recordar que una corriente I produce en el interior de una bobina de longitud L y N vueltas un campo magnético dado por:

$$H = \frac{IN}{L} = \frac{VN}{RL}$$

En nuestro caso, $R = 10\ \Omega$, $N = 1200$ vueltas (600 por cada bobina) y $L = 0.232$ m (núcleo macizo) ó $L = 0.244$ m (núcleo laminado). Por tanto:

$$\frac{N}{L} = 2586\ \text{m}^{-1} \quad (\text{núcleo macizo}) \qquad \frac{N}{L} = 2459\ \text{m}^{-1} \quad (\text{núcleo laminado}^3)$$

Entonces, para calibrar el eje X pulsa en el icono $\sqrt{\alpha}$ y selecciona los parámetros como se muestra en la Figura 5. El factor que debes introducir en “*Operation*” depende del núcleo utilizado. Una vez hechas las modificaciones, pulsa “*Calculate*”. Comprueba que la escala, la magnitud y la unidad del eje X han cambiado.

³ En 2022-23 el núcleo laminado se usa para la práctica de Efecto Hall. Estas usando el núcleo macizo

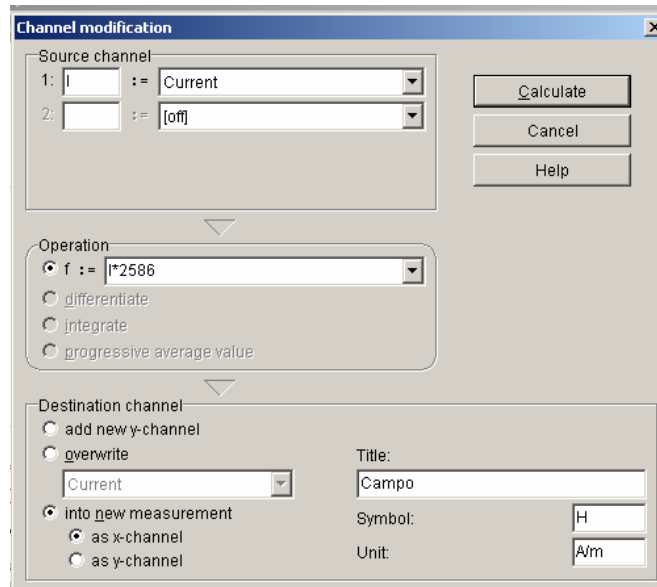


Figura 6. Cambiar el eje X a campo magnético

Llegados a este punto, puedes deducir el valor de la imanación de saturación, la imanación remanente y el campo coercitivo a partir de la curva usando las opciones “zoom” (Y) y “survey” (H) (esta última permite visualizar los puntos de intersección con los ejes con la ayuda de los cursores de línea que pueden moverse libremente).

Para calcular las pérdidas (energía magnética perdida por ciclo) tienes que calcular el área. Si el eje **X** está en A/m y el eje **Y** en T, el área del ciclo $B(H)$ tendrá unidades de J/m^3 . Para calcular la integral pulsa en el menú en la opción “Analysis” y selecciona “show integral”. El software retorna el área de **la mitad izquierda** de la curva, por lo tanto, la energía es el doble del valor obtenido.

Puedes calcular la pendiente de la recta tangente en un punto con la opción “survey”.

Puedes salvar los datos x,y correspondientes a los ciclos medidos en extensión txt. Para ello ve al menú **Medida - Exportar datos**, a continuación se abrirá la ventana *Exportar Valores* en la que seleccionamos **Copiar en un fichero y Exportar como números**. Estos ficheros txt podrás abrirlos con cualquier programa de datos (ej: SciDavis, Origin). También puedes guardar las medidas en extensión msr (la extensión del programa), con ayuda del menú **Archivo - Guardar Medida**.

Cuestiones:

1. [en el laboratorio] Mide el ciclo de histéresis del núcleo de Fe macizo. Guarda los datos en un fichero con extensión txt y represéntalo en el informe ¿se alcanza la saturación sin lugar a duda?
2. [cuando proceses los datos fuera del lab] Obtén a partir del ciclo de histéresis (procesa en casa los datos usando SciDavis, Origin, Python, o el software de tu elección):
 - El campo coercitivo del material
 - Calcula la imanación de saturación y la imanación remanente tanto en [T] como en [A/m].

- Utiliza sólo los puntos de la curva de magnetización inicial y grafica las dos curvas: $\mu(H)$ y $\chi(M)$. Comenta su comportamiento (hablando de parámetros físicos, no de tendencias matemáticas); los valores interesantes son los máximos y los valores cercanos a $H=0$, compara con valores tabulados (en libros o internet) para hierro.
 - Calcula las pérdidas de energía. Ya que la energía del ciclo se pierde en forma de calor, compara el valor obtenido con algo (p.e. ¿cuánta agua podrías hervir con esa energía? O cualquier otra comparación que te parezca adecuada)
3. [en el laboratorio] Realiza 5 ciclos menores en orden ascendente desde el estado desimanado, en una sola medida y guarda los datos en un fichero, representa en el informe estas curvas. A partir de las coordenadas (H_{max}, B_{max}) grafica la curva de conmutación junto a la de primera imanación. ¿Qué relación hay entre estas dos curvas?

Importante: Al hacer la conversión de las distintas magnitudes, el ordenador da los resultados con muchos decimales. Es importante estimar el número de cifras significativas razonables para la medida y entregar los resultados convenientemente redondeados.