

Histéresis ferromagnética

José Manuel Rodríguez Manjón
Alejandro José Florido Tomé

03/12/2022

1. Objetivo

En la presente práctica se tiene como meta hallar las variables remanentes y coercitivas de magnetización e intensidad magnética. Para ello, se observa la curva de primera imanación e histéresis magnética del hierro.

2. Marco Teórico

De forma natural, por encima de 0K los momentos magnéticos de las partículas en el interior de los materiales se encuentran desordenados, dando lugar a un momento total nulo. Sin embargo, por debajo de la temperatura de Curie, se observan efectos magnéticos de largo alcance ante la reacción entre momentos individuales, denominada interacción de canje.

Así pues, son ferromagnéticos aquellos materiales que tienen un momento no nulo incluso en ausencia de campo.

El material está dividido en dominios y paredes de dominio. Dentro de cada dominio los momentos están totalmente alineados, pero la dirección de cada uno es diferente a la de los demás, por lo que el momento magnético global será nulo. Esta desviación supone un exceso de energía, pero dado el corto alcance de la interacción de canje, esto afectará solamente a los momentos cercanos a las paredes.

Así, al aplicar un campo magnético, observaremos la llamada histéresis. Dicho proceso irreversible conlleva la progresiva alineación de los dominios entre sí hasta alcanzar la llamada imanación máxima o de saturación. Apagando el campo se mantiene una imanación remanente. De nuevo, ante la aplicación de un campo contrario, se llega a los valores de campos coercitivos, para el cual la imanación es nula.

Al hacer una representación de las variables frente al campo H, se observa un ciclo cuya área cubre la energía disipada por interacciones caracterizadas por

una fuerza de rozamiento entre momentos.

Imaginemos que tenemos una bobina con N_1 vueltas por la que pasa una corriente I . En el experimento la bobina encierra parte de un conductor de una pieza cerrada de acero (formando lo que se conoce como circuito magnético), cuya longitud promedio total es L . La aplicación de la ley de Ampère al circuito, suponiendo corriente estacionaria, nos permite escribir:

$$H = \frac{N_1}{L} I \quad (2.1)$$

Ante la ausencia de corrientes superficiales, las componentes tangenciales de H se conservan, además del producto de sus componentes normales con la permeabilidad. Con todo, las componentes paralelas a la interfase del campo B también son mayores que las normales, dando lugar a una sección S constante a un flujo ϕ también constante. (El campo B está provocado por inducción desde la bobina primera).

$$\phi = N_2 S B \quad (2.2)$$

Para esclarecer la energía perdida en el circuito de histéresis, conocemos que:

$$\int dI \phi = \int N_s S B \frac{L}{N_1} dH = V \int B dH = E \quad (2.3)$$

Donde se han supuesto las bobinas iguales (con el mismo número de vueltas).

3. Metodología

Se medirá la corriente en la bobina primaria y el flujo magnético en la bobina secundaria. El dispositivo Leybold Power-Cassy aplica una corriente conocida variable en el tiempo (onda triangular de unos 0.1 Hz de frecuencia y 2 V de amplitud) a la 60 bobina primaria, y la unidad de adquisición de datos Sensor-Cassy realiza la medida del voltaje inducido en la bobina secundaria.

Los pasos seguidos fueron:

1. Medir la sección del circuito y la longitud total.
2. Comience la medida con el software para recolectar datos e integrar la función que muestra el ciclo.
3. Desmagnetizamos cada barra y repetimos el ciclo en dos ocasiones por elemento.

4. Resultados y Cuestiones

4.1. R.1.

Comencemos exponiendo los datos experimentales del flujo frente a I , $\phi(I)$ en las Figuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FLUJO FRENTE A CORRIENTE (1)

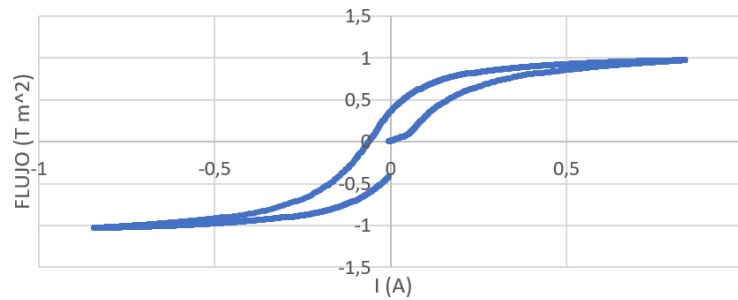


Figura 1: Se representa el flujo frente a la intensidad para la primera barra, primer ciclo.

FLUJO FRENTE A CORRIENTE (2)

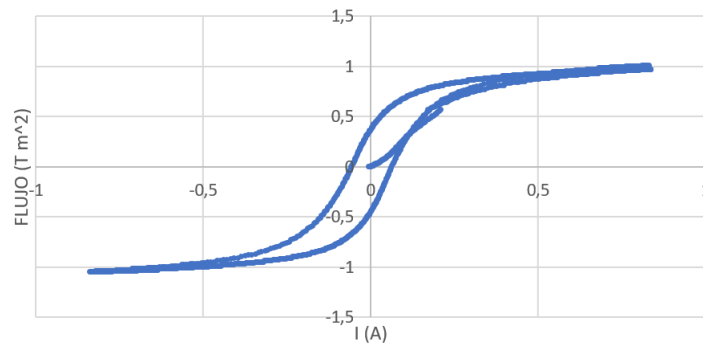


Figura 2: Se representa el flujo frente a la intensidad para la segunda barra, primer ciclo.

FLUJO FRENTE A CORRIENTE (3)

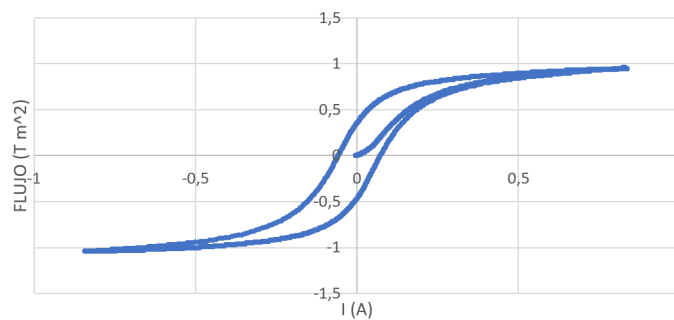


Figura 3: Se representa el flujo frente a la intensidad para la tercera barra, primer ciclo.

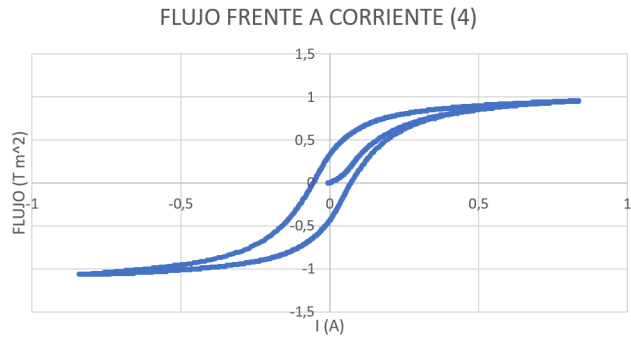


Figura 4: Se representa el flujo frente a la intensidad para la primera barra, segundo ciclo.

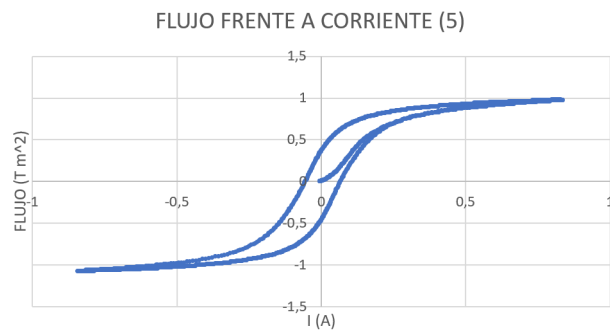


Figura 5: Se representa el flujo frente a la intensidad para la segunda barra, segundo ciclo.

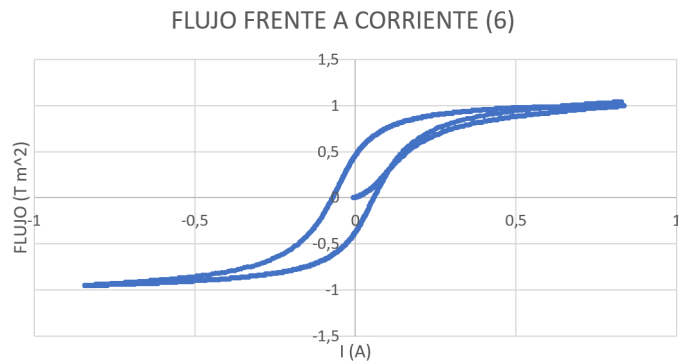


Figura 6: Se representa el flujo frente a la intensidad para la tercera barra, segundo ciclo.

El ciclo de histéresis se observa en cada una de las experiencias, a pesar de que en algunas se cruzan datos, seguramente por problemas del programa a la hora de tomarlos. Así, en ambos casos, se ve una zona horizontal en la imanación que permite estimar de manera acertada el valor de saturación.

4.2. R.2.

Usando las ecuaciones anteriores, podemos deducir que la densidad de energía no es más que la división directa entre el área del ciclo respecto a la intensidad magnética y el volumen del circuito.

Hay que tener en cuenta que el circuito total es una barra de sección transversal un cuadrado de lado $a = (3,9 \pm 0,1) \text{ cm}$, y cuya longitud es $l = 2(11,2 + 9,5) \pm 0,2 \text{ cm}$.

Representamos en la Tabla 1 los valores de la energía y de su densidad para cada barra.

	$E_1 (\pm 0,001) \text{ J}$	$E_2 (\pm 0,001) \text{ J}$	$E_1/V \text{ J/m}^3$	$E_2/V \text{ J/m}^3$
Barra 1	0,287	0,297	$455,8 \pm 1,6$	$646,6 \pm 2,2$
Barra 2	0,251	0,283	$398,6 \pm 1,7$	$616,1 \pm 2,4$
Barra 3	0,303	0,279	$481,2 \pm 1,7$	$607,3 \pm 2,3$

Tabla 1: Energías y densidades de energía asociadas a cada barra.

4.3. R.3.

Ahora, representemos $B(H)$ (véase las Figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12) y $M(H)$ (véase las Figuras 13, 14, 15, 16, 17 y 18).

Con todo esto, somos capaces de hallar el campo coercitivo H_c con la ecuación (2.1), la inducción magnética en el interior del circuito con (2.2), y la imanación de saturación con $B = \mu_0(H + M)$. Nos hemos ayudado de una estimación lineal de B frente a H en la curva de primera imanación, en un pequeño intervalo en la que los valores son lineales, para así hallar el valor de la permeabilidad. Tenemos todos los valores recopilados en la Tabla 2.

4.4. C.1.

Si comparamos los valores presentados en la Tabla 2 con los teóricos, que son $\mu_r = 5000$, $\mu_0 M_s = 2,1 \text{ T}$, y $H_c = 80 \text{ A/m}$, vemos claramente como el campo coercitivo nos sale parecido, pero ni la permeabilidad relativa ni la imanación de saturación nos salen parecidos. Hay un error relativo en todas ellas

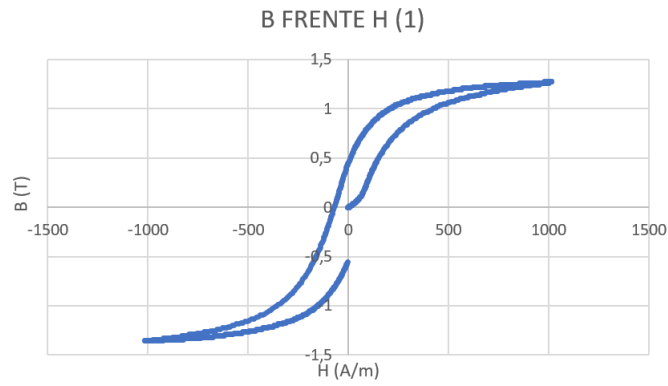


Figura 7: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la primera barra, primer ciclo.

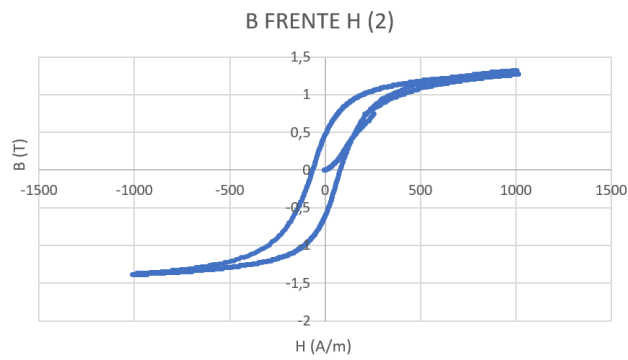


Figura 8: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la segunda barra, primer ciclo.

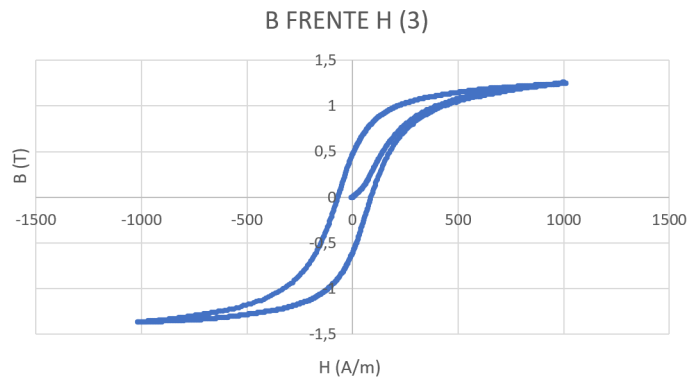


Figura 9: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la tercera barra, primer ciclo.

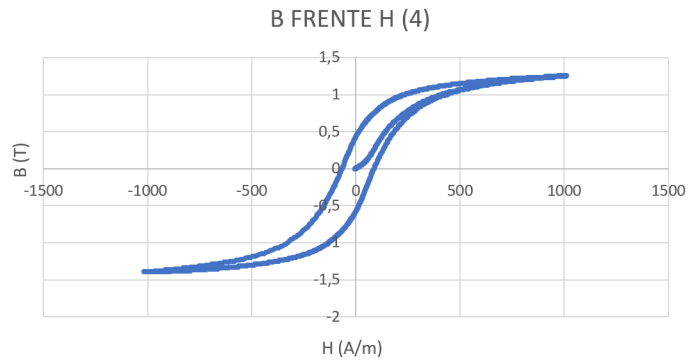


Figura 10: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la primera barra, segundo ciclo.

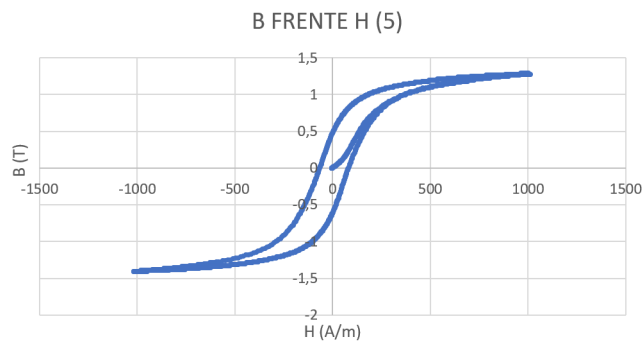


Figura 11: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la segunda barra, segundo ciclo.

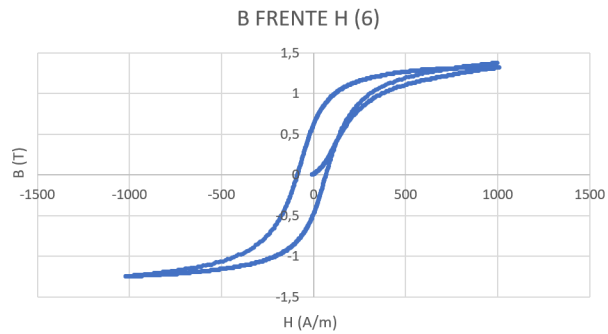


Figura 12: Se representa la inducción magnética frente al campo magnético para la tercera barra, segundo ciclo.

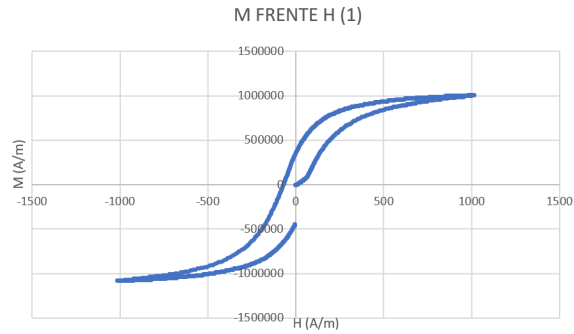


Figura 13: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la primera barra, primer ciclo.

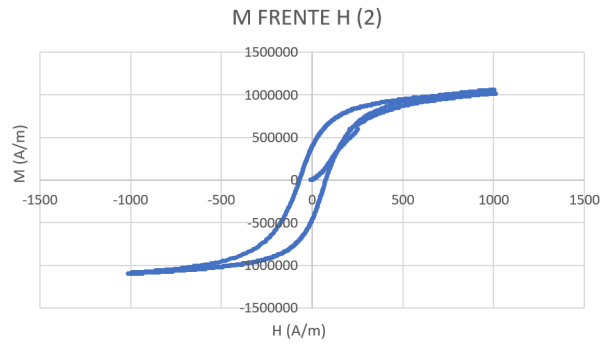


Figura 14: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la segunda barra, primer ciclo.

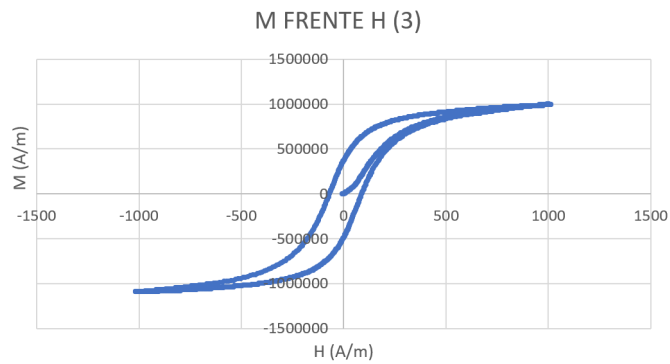


Figura 15: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la tercera barra, primer ciclo.

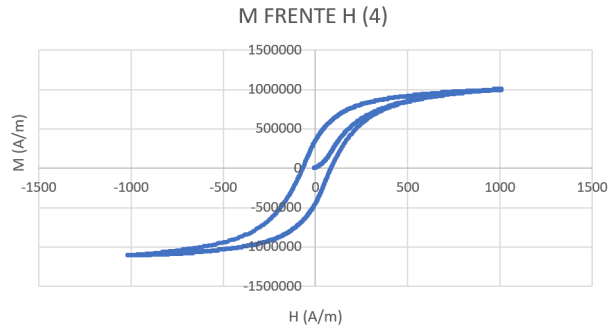


Figura 16: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la primera barra, segundo ciclo.

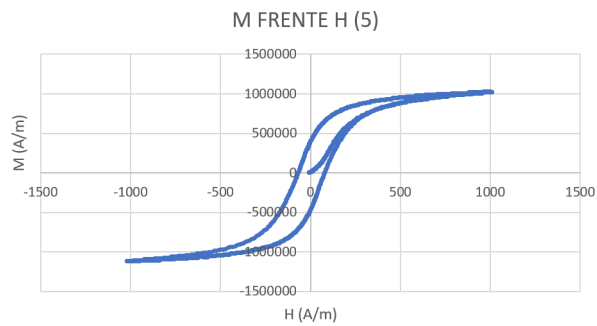


Figura 17: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la segunda barra, segundo ciclo.

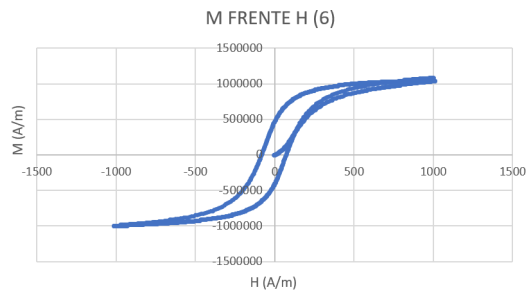


Figura 18: Se representa la magnetización frente al campo magnético para la tercera barra, segundo ciclo.

	μ_r	$M_s (\pm 1)$ A/m	$H_c (\pm 0,01)$ A/m	$\mu_0 M_s (\pm 0,00003)$ T
Barra 1	2780 \pm 40	1003529	79,71	1,26107
Barra 1'	1392 \pm 16	1004518	80,09	1,26231
Barra 2	2300 \pm 30	1045412	72,46	1,31370
Barra 2'	2500 \pm 40	1024458	74,88	1,28737
Barra 3	1910 \pm 50	1003526	84,21	1,26107
Barra 3'	2400 \pm 40	1087242	76,01	1,36627

Tabla 2: Permeabilidad relativa, imanación de saturación, campo coercitivo e inducción magnética para cada barra, y para las dos medidas.

en torno al 50 %, lo que nos puede indicar que habría que repetir la toma de datos, o simplemente que la estimación lineal realizada para hallar el valor de la permeabilidad relativa no es la mejor opción, y que habría que usar un método más exacto.

A pesar de esto, nos salen del mismo orden de magnitud, y el campo coercitivo tiene un error relativo máximo del 10 %, lo que nos deja unos valores experimentales bastante cercanos al teórico.

4.5. C.2.

Los imanes permanentes son aquellos que tienen un campo magnético también permanente, y la fuerza de los mismos dependerá del tamaño y del tipo que sea. Cabe destacar que el imán de neodimio es el más potente que se vende en el mercado en comparación con su tamaño, razón por la cual es tan práctico, y por ello es el más comprado. Presentan una gran remanencia y coercitividad, pero su mayor inconveniente es que tiene una temperatura de trabajo máxima de 220 grados.

Estos imanes están compuestos de neodimio, hierro y boro, y según la forma del imán, los polos norte y sur estarán orientados y colocados de una manera distinta. Por ejemplo, en un bloque de neodimio, los polos nortes y sur se encuentran en las dos caras opuestas más grandes del mismo.

4.6. C.3.

Por encima de la Temperatura de Curie, los materiales son totalmente paramagnéticos. Así, los materiales en la experiencia no quedarían posteriormente magnetizados, con lo cual no se observaría el ciclo de histéresis, al ser ahora un proceso cíclico reversible.

5. Anexo

Aquí presentamos las ecuaciones de los errores utilizadas en la práctica:

$$\Delta(\mu_0 M_s) = \mu_0 \Delta M_s \quad (5.1)$$

$$\Delta H = \frac{N_1}{L} \Delta I + IN_1 \frac{\Delta L}{L^2} \quad (5.2)$$

$$\Delta B = \frac{1}{N_2} \left(\frac{\Delta \phi}{S} + \frac{\phi \Delta S}{S^2} \right) \quad (5.3)$$

$$\Delta M = \frac{\Delta B}{\mu_0} - \Delta H \quad (5.4)$$

$$\Delta S = 2l \Delta l \quad (5.5)$$

Los errores tomados para la permeabilidad relativa no han sido más que el que nos ha dado la estimación lineal de 'Excel' entre la permeabilidad del vacío.

Para el campo coercitivo y la imanación de saturación, se ha tomado el error de la cifra experimental más pequeña.