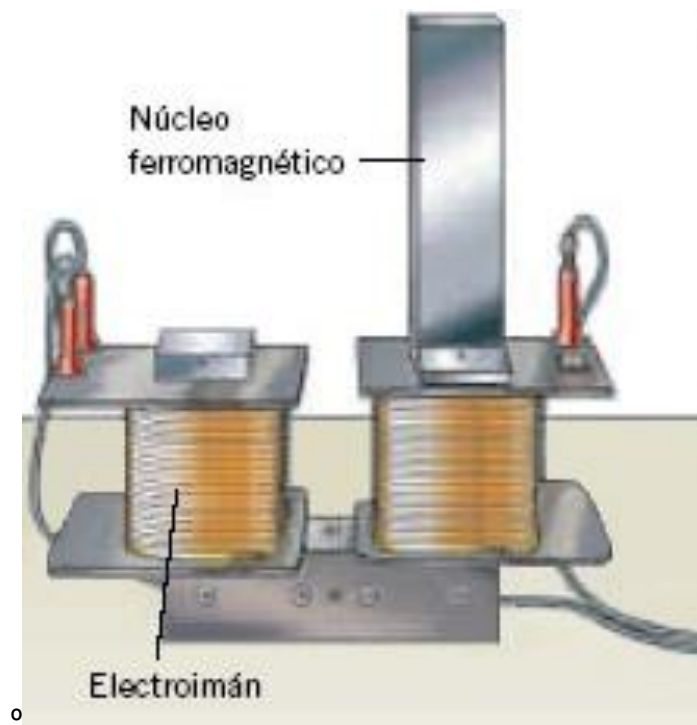




Universidad
Rey Juan Carlos

PÉRDIDA POR HISTÉRESIS DE UN NÚCLEO FERROMAGNÉTICO



Por:

Danko Denchuk

Cristian Fernández Díaz

Alejandro Gómez-Escalonilla

Índice

Fundamento teórico	3
Introducción.....	3
Objetivos	4
Proceso experimental	5
Medidas geométricas y de campos magnéticos	6
Resultados.....	11
Discusión	17
Preguntas	18
Anexo de cálculos.....	19

Fundamento teórico

Introducción

La histéresis es el fenómeno que se produce cuando se modifican las propiedades de un material al someterlo a un estímulo, y estas siguen presentes cuando cesa.

Nos centraremos en la histéresis magnética, la cual tiene lugar en aquellos materiales ferromagnéticos (por ejemplo, el hierro). El ferromagnetismo es el fenómeno físico por el cual se produce un reordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos del material, es decir, que los polos o dominios magnéticos tienden a alinearse en la misma dirección y sentido.

Para poder estudiar la histéresis magnética, es necesario someter al material a un campo magnético externo. Al cesar el campo, no se alcanzará de nuevo la magnetización cero, sino que quedará un campo magnético residual. Es decir, dicho material queda magnetizado. Se puede someter a un campo magnético en dirección contraria para desmagnetizarlo o para cambiar la polaridad de la imanación.

El campo total viene dado por la siguiente expresión:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

Donde \vec{H} corresponde a la excitación magnética y \vec{M} a la magnetización creada por el material. Cuando \vec{M} alcanza el máximo valor decimos que el núcleo está saturado, esto se debe a que cuando todos los dominios están alineados ya no se puede crear más campo.

Este fenómeno se define como el retraso de la inducción magnética respecto al campo magnético que lo acciona. Se debe a que, al aplicar el campo magnético, los imanes o dipolos tienden a orientarse en el sentido del campo, al desaparecer este muchos vuelven a su posición original mientras que otros no lo hacen debido a rozamientos moleculares, conservando parte de su orientación previa y generando un magnetismo residual con cierta inducción magnética.

Capítulo 8

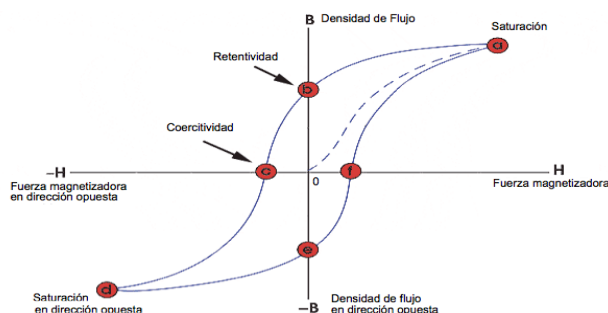
Las pérdidas de histéresis¹ suponen asimismo una pérdida de energía manifestada en forma de calor en los núcleos magnéticos, lo que reduce el rendimiento de los dispositivos. Para reducir al máximo las pérdidas los núcleos se construyen de materiales magnéticos con características especiales (acero a la sílice). Cabe mencionar también la pérdida de potencia, que es directamente proporcional al área de la curva de histéresis.

Objetivos

El objetivo principal de esta práctica es medir el ciclo de histéresis de un núcleo ferromagnético al someterlo a una excitación magnética y estudiar la curva de histéresis.

A partir de los datos anotados en el laboratorio, representamos la curva de magnetización de un material. Esta presenta una zona reversible (mayor esfuerzo eléctrico), una zona lineal (se magnetiza proporcionalmente) y una zona de saturación (donde ya no se puede magnetizar más). Además, en dicha curva aparecerán indicados los valores de:

- B_r : campo remanente producido cuando se anula H , es decir, la inducción magnética se mantiene tras someterlo a un campo magnético cuando ya no hay excitación **(b y e)**.
- H_C : Es el campo coercitivo de excitación que anula el campo remanente, es decir que reduce su imanación hasta 0 **(c y f)**.
- B_s : campo de saturación del circuito magnético, cuando ya no se produce más magnetización **(a y d)**.



Curva de histéresis.

¹ Gracias a la histéresis magnética podemos almacenar información en los platos de los discos duros, ya que el campo induce una magnetización, codificándola en 0 y 1, que permanece en ausencia del campo, que se puede leer posteriormente o invertir aplicando distintos campos.

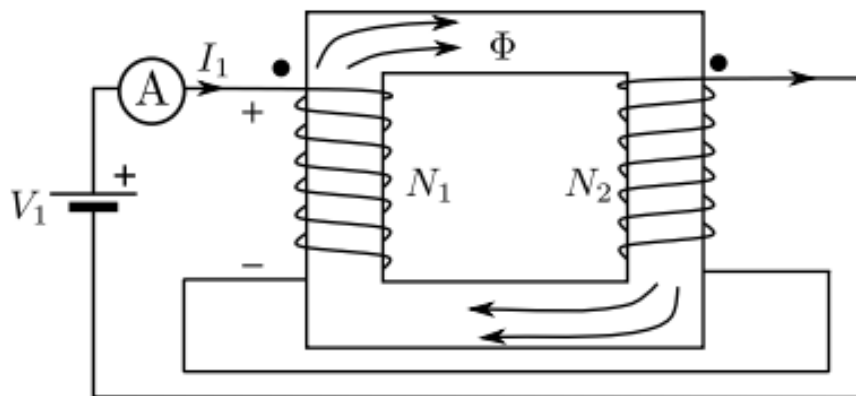
Proceso experimental

Para observar y medir el período de histéresis, utilizaremos un dispositivo experimental simple, que consta de un generador, un circuito magnético con dos bobinas acopladas y un amperímetro. Primero, proporcionamos un voltaje continuo a la bobina primaria. Colocamos un amperímetro en serie con la bobina primaria para medir la corriente. Para maximizar el campo de excitación H del circuito, las dos bobinas están conectadas en serie (el campo magnético debe generarse en la misma dirección).

La ley de Ampere a través del circuito magnético nos proporciona la relación entre corriente y excitación:

$$H \cdot l = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (2)$$

Donde N_1 y N_2 son el número de espiras de cada bobina, l es la longitud promedio del circuito magnético. La corriente I_1 ² se mide con un amperímetro conectado en serie con la fuente de alimentación. Finalmente, medimos el campo magnético de la parte del núcleo colocando una sonda de efecto Hall. Al hacer esto creamos un hueco llamado entrehierro que aumenta la reluctancia equivalente del circuito, d .



Montaje experimental

² I_1 e I_2 son iguales porque las bobinas están en serie.

Medidas geométricas y de campos magnéticos

Estas son las medidas físicas del aparato experimental.

$S \text{ (mm}^2\text{)}$	$l \text{ (mm)}$	$Volumen(m^3)$	N_1	N_2	$d \text{ (mm)}$
884.50 ± 0.01	352.33 ± 0.05	3.12E-04	600	600	1 ± 0.05

Estos son los datos registrados en el laboratorio.

$I \pm 0.01 \text{ (A)}$	$H \left(\frac{A}{m} \right)$	$\pm \varepsilon_H \left(\frac{A}{m} \right)$	$B \pm 1 \text{ (mT)}$
2.05	6982	33	402
1.81	6165	33	385
1.59	5415	33	366
1.40	4768	33	347
1.20	4087	33	326
1.01	3440	34	301
0.80	2725	34	270
0.60	2044	34	231
0.40	1362	34	188
0.21	715	34	126
0.03	102	34	59
-0.03	-102	34	30
-0.20	-681	34	-15
-0.39	-1328	34	-61

Capítulo 8

-0.59	6982	33	-127
-0.80	6165	33	-195
-0.99	5415	33	-241
-1.20	4768	33	-278
-1.39	4087	33	-310
-1.60	3440	34	-338
-1.81	2725	34	-365
-2.02	2044	34	-395
-1.80	1362	34	-376
-1.60	715	34	-362
-1.40	102	34	-336
-1.21	-102	34	-321
-1.01	-681	34	-297
-0.80	-1328	34	-266
-0.60	-2009	34	-230
-0.41	-2725	34	-186
-0.20	-3372	35	-117
-0.01	-4087	35	-46
0.01	-4734	35	-38
0.19	-5449	35	10
0.40	-6165	35	68

Capítulo 8

0.60	6982	33	143
0.80	6165	33	200
1.02	5415	33	250
1.21	4768	33	284
1.39	4087	33	313
1.61	3440	34	347
1.80	2725	34	367
2.01	2044	34	398

Acero macizo

$I \pm 0.01 (A)$	$H \left(\frac{A}{m} \right)$	$\pm \varepsilon_H \left(\frac{A}{m} \right)$	$B \pm 1 (mT)$
1.99	6778	33	739
1.80	6131	33	709
1.61	5483	33	675
1.41	4802	33	616
1.20	4087	33	544
0.99	3372	34	460
0.80	2725	34	379
0.60	2044	34	289
0.41	1396	34	197

Capítulo 8

0.20	6778	33	94
0.04	6131	33	25
-0.04	5483	33	-8
-0.19	4802	33	-59
-0.40	4087	33	-164
-0.61	3372	34	-268
-0.79	2725	34	-348
-1.01	2044	34	-441
-1.21	1396	34	-520
-1.41	681	34	-596
-1.60	136	34	-654
-1.81	-136	34	-700
-1.99	-647	34	-728
-2.00	-1362	34	-730
-1.79	-2078	34	-701
-1.61	-2691	34	-669
-1.40	-3440	35	-610
-1.20	-4121	35	-543
-1.01	-4802	35	-462
-0.80	-5449	35	-376
-0.60	-6165	35	-279

Capítulo 8

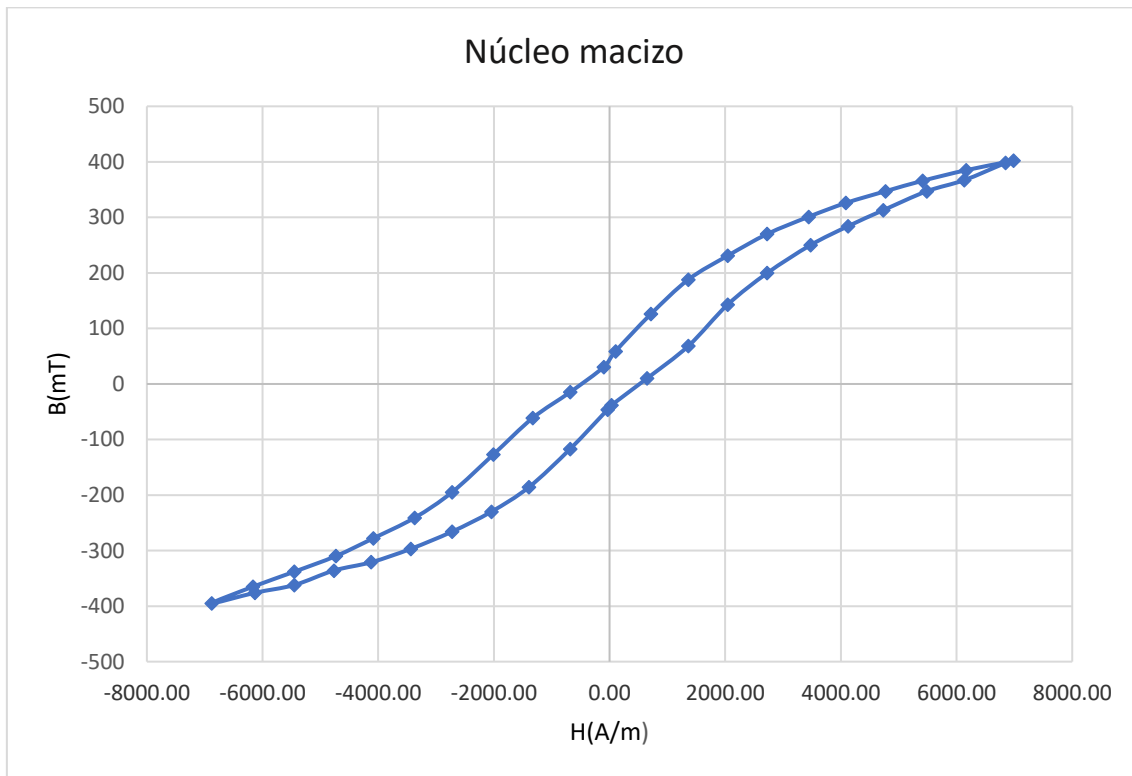
-0.40	6778	33	-180
-0.20	6131	33	-82
-0.05	5483	33	-24
0.06	4802	33	16
0.20	4087	33	66
0.39	3372	34	163
0.59	2725	34	260
0.80	2044	34	354
0.99	1396	34	432
1.21	681	34	523
1.39	136	34	595
1.61	-136	34	661
1.79	-647	34	701
1.99	-1362	34	734

Acero, laminado.

Resultados

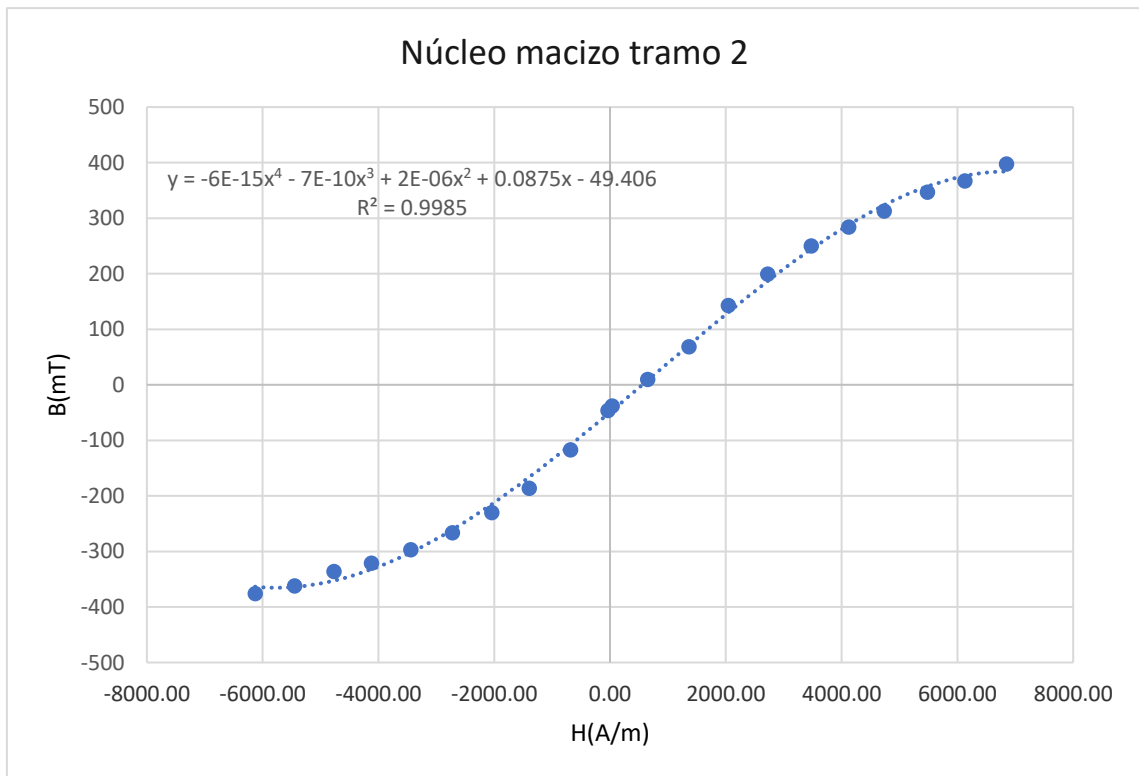
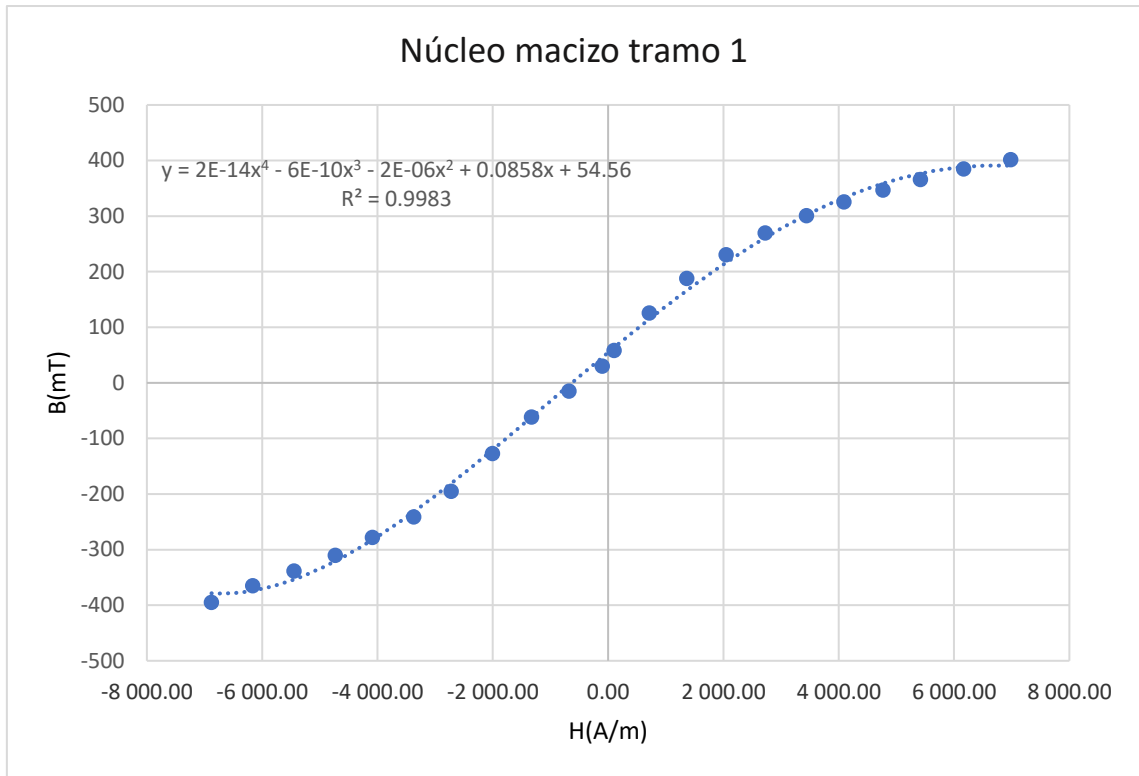
Estas gráficas representan la excitación magnética frente al campo magnético para ambas configuraciones del material. Se ha obtenido la aproximación de la curva mediante un polinomio de orden 4 que se ajusta a cada tramo de la histéresis³. Los coeficientes de correlación cuadrados (R^2) son lo bastante cercanos al valor de 1 como para decir que la aproximación es buena (<5% de error).

Se han intentado introducir las barras de error sin éxito debido a que son tan pequeños que no se aprecian en los gráficos. Se puede encontrar el cálculo de estos en el anexo.



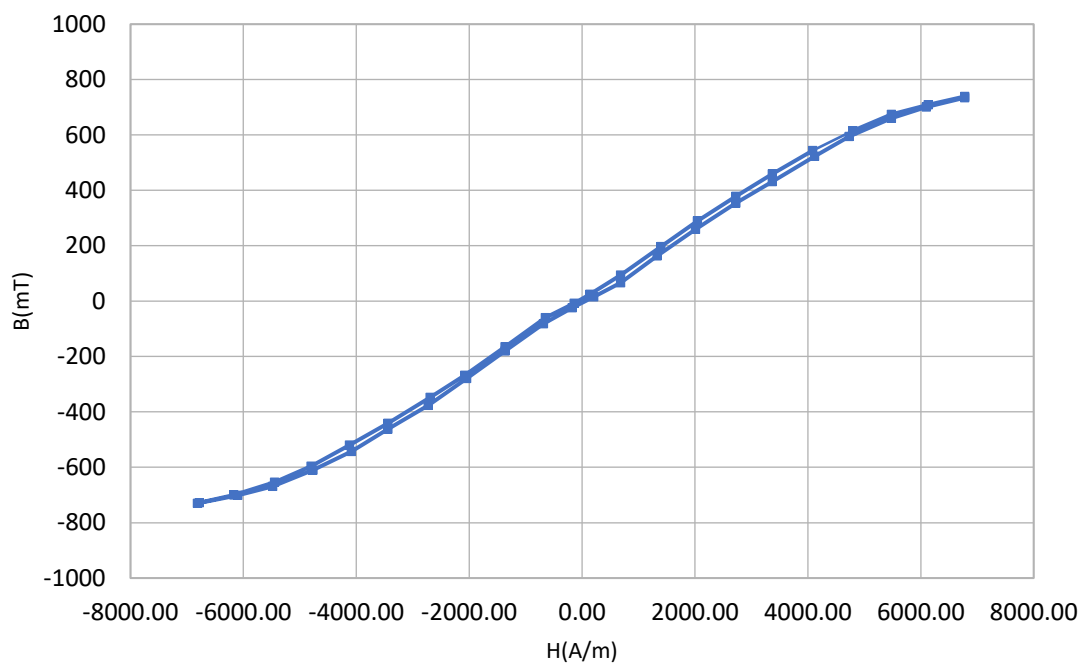
³ Entiéndase que la x de las ecuaciones son H .

Capítulo 8

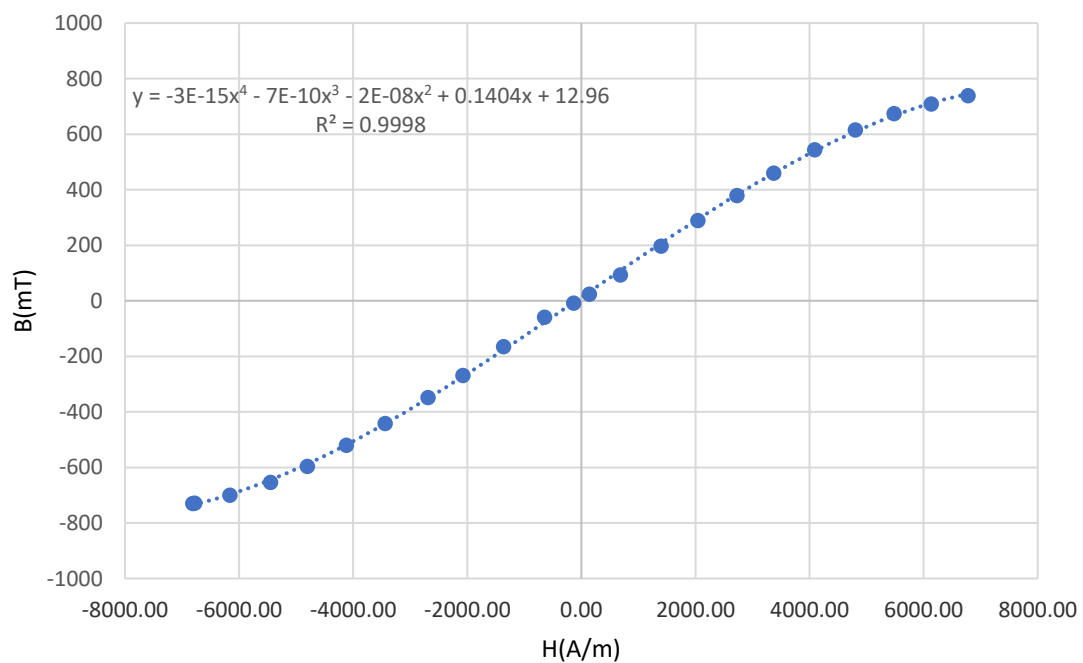


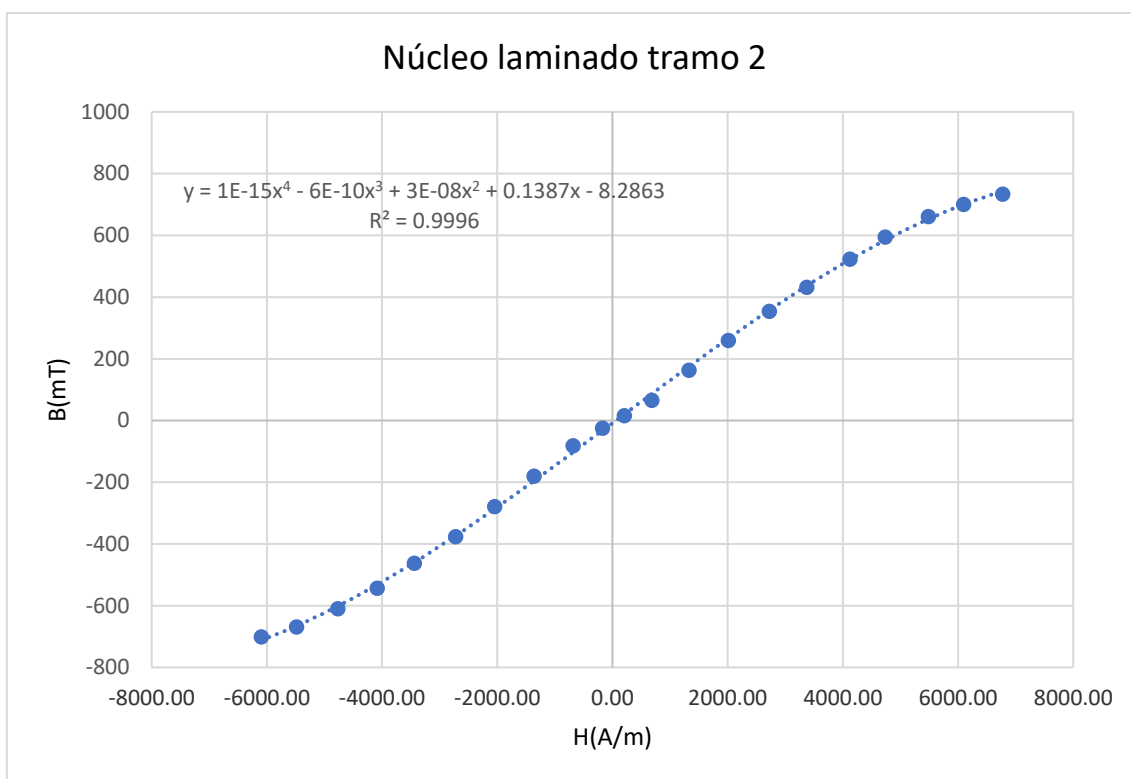
Capítulo 8

Núcleo laminado



Núcleo laminado tramo 1





Capítulo 8

A partir de las gráficas hallamos los valores de:

1. El campo de saturación del material B_s .

El campo de saturación para el material macizo es el punto de campo máximo, en este caso es $B_s = 402 \text{ mT}$

El campo de saturación para el material laminado es el punto de campo máximo, en este caso es $B_s = 739 \text{ mT}$

2. El campo remanente B_r .

El campo remanente se produce cuando se anula la excitación H , en este caso es :

- Macizo: $B_r = 54.56 \text{ mT}$
- Laminado: $B_r = 12.96 \text{ mT}$

También se pueden obtener una aproximación considerando puntos cercanos al cero e interpolando linealmente, ya que el comportamiento en la zona próxima a 0 se puede considerar lineal a efectos prácticos. Se obtiene:

- Macizo: $B_r = 44.16 \text{ mT}$
- Laminado: $B_r = 11.97 \text{ mT}$

3. El campo coercitivo H_c

El campo coercitivo se produce cuando se anula el campo remanente. Aquí lo calculamos para el **tramo de subida**. Al igualar a cero la ecuación de orden 4 obtenemos 4 resultados, escogemos el que sea positivo y guiándonos por las gráficas para que tenga sentido, en este caso es:

- Macizo: $H_c = 558.90 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
- Laminado: $H_c = 59.74 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

Capítulo 8

De igual manera que en apartado anterior, podemos intentar hallar el punto de corte suponiendo un comportamiento lineal quedando:

- Macizo: $H_c = 483.95 \frac{A}{m}$
- Laminado: $H_c = 63.97 \frac{A}{m}$

Resumen	N. Macizo	N. Laminado	Macizo Aprox.	Laminado Aprox.
$B_s (mT)$	402	739	=	=
$B_r (mT)$	54.56	12.96	44.16	11.97
$H_c \left(\frac{A}{m}\right)$	558.90	59.74	483.95	63.97

4. La pérdida en J por ciclo de histéresis

Con Matlab, utilizando la función *polyarea*, obtenemos el área encerrada dentro de las curvas de histéresis:

Área de la curva del bloque macizo (A_1): $810.55 \frac{J}{m^3}$

Área de la curva del bloque laminado (A_2): $245.13 \frac{J}{m^3}$

Para obtener la energía disipada por ciclo debemos emplear:

$$U = Vol \cdot \oint H dB$$

Se multiplica el área de las curvas de histéresis por el volumen del objeto, quedando:

$$U_{macizo} = Vol \cdot A_1 = 0.25 J \quad ; \quad U_{laminado} = Vol \cdot A_2 = 0.08 J$$

Que son las pérdidas energéticas por ciclo de histéresis.

Discusión

Con los resultados obtenidos, podemos observar que las pérdidas aumentan cuanto mayor sea el área encerrada por la curva de histéresis. También es influenciado por el volumen del objeto, a mayor volumen, más pérdidas.

En el circuito con el núcleo de acero macizo hay más pérdidas energéticas que en el núcleo laminado. El campo magnético remanente es menor en el núcleo de acero laminado. El núcleo macizo se satura de campo magnético mucho antes que el núcleo laminado.

Aplicaciones

Por ello se suelen emplear núcleos de acero laminado para la fabricación de motores eléctricos porque son más eficientes, tienen menos pérdidas. No se saturan con campos magnéticos tan bajos como los de núcleo macizo, permitiendo un flujo magnético más intenso. Además, no queda casi nada de magnetización residual que pueda influir en el mal funcionamiento del motor.

Por el otro lado, para la fabricación de electroimanes sería más conveniente utilizar núcleos ferromagnéticos macizos ya que pueden mantener un campo magnético residual que se puede utilizar para interactuar con otros objetos ferromagnéticos, como grúas en chatarrerías.

Otro aspecto es la linealidad de la zona central, muy empleada en la grabación y lectura de cintas magnéticas y discos duros mecánicos. Se emplea un material ferromagnético al que se le aplican flujos intensos para magnetizarlos. Por ejemplo, se puede magnetizar para indicar un 1 y desmagnetizar para indicar un 0. Codificando en binario se puede almacenar información en dichos medios.

Preguntas

1. Suponiendo que alimentamos el núcleo ferromagnético con una corriente alterna de 50Hz que llegue a saturar el circuito, ¿Cuál es la potencia⁴ disipada en pérdidas por histéresis?

En el bloque de **acero macizo** las pérdidas por histéresis magnética serían:

$$0.25 \frac{J}{\text{ciclo}} \cdot 50 \frac{\text{ciclos}}{s} = 12.50 \frac{J}{s}$$

En el bloque de **acero laminado** las pérdidas por histéresis magnética serían:

$$0.08 \frac{J}{\text{ciclo}} \cdot 50 \frac{\text{ciclos}}{s} = 4.00 \frac{J}{s}$$

⁴ $\frac{J}{s}$ es lo mismo que W.

Anexo de cálculos

- Cálculo del volumen

$$V = S \cdot l$$

- Cálculo de la excitación magnética

$$H = \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{l}$$

Ejemplo:

$$H = \frac{600 \cdot 2,05 + 600 \cdot 2,05}{0.35233} = 6982.09 \frac{A}{m}$$

- Cálculo de los resultados

1. Campo remanente ($H_c = 0$):

$$y(0) = 2E-14x^4 - 6E-10x^3 - 2E-06x^2 + 0.0858x + 54.56 =$$

$$y = 54.56 \text{ mT}$$

2. El campo coercitivo ($B_r = 0$):

$$0 = 2E-14x^4 - 6E-10x^3 - 2E-06x^2 + 0.0858x + 54.56$$

$$x = 558.90 \frac{A}{m}$$

- Cálculo de errores

$$\varepsilon_H = \frac{\partial H}{\partial I} \cdot \varepsilon_I - \frac{\partial H}{\partial l} \cdot \varepsilon_l = \frac{2N}{l} \cdot \varepsilon_I - \frac{2NI}{l^2} \cdot \varepsilon_l$$

Ejemplo:

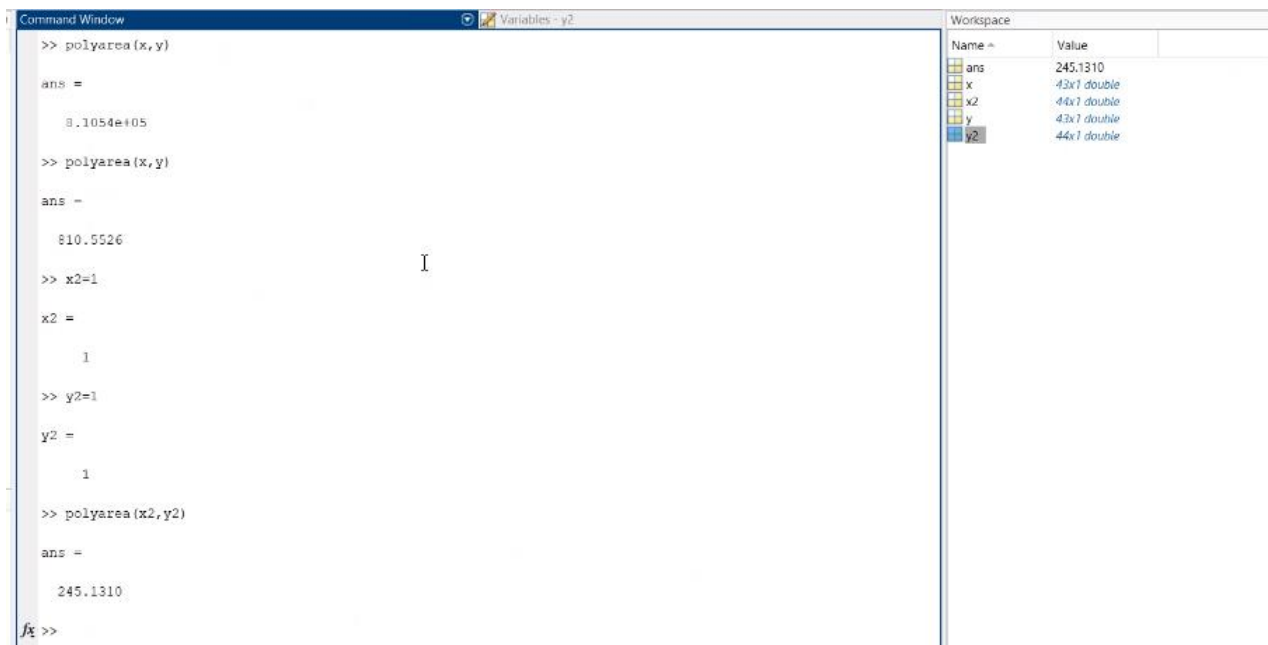
$$\varepsilon_H = \frac{2 \cdot 600}{0.35233} \cdot 0.01 - \frac{2 \cdot 600 \cdot 2.05}{0.35233^2} \cdot 0.00005 = 33.07 \frac{A}{m}$$

Capítulo 8

El error de la intensidad es un error digital que corresponde al error del amperímetro, que es $\varepsilon_I = 0.01 \text{ A}$

El error de la longitud es un error analógico que corresponde al error del calibre que es $\varepsilon_l = 0.05 \text{ mm} = 0.00005 \text{ m}$

- Cálculo *polyarea* Matlab



```
>> polyarea(x,y)
ans =
    8.1054e+05
>> polyarea(x,y)
ans =
    810.5526
>> x2=1
x2 =
     1
>> y2=1
y2 =
     1
>> polyarea(x2,y2)
ans =
    245.1310
fx >>
```

Name	Value
ans	245.1310
x	43x1 double
x2	44x1 double
y	43x1 double
y2	44x1 double