

Informe 8: Histéresis Magnética

Juana Valeria Pinzón* and Sergio Laverde**

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 22 de abril de 2024)

En este informe se investigó la histéresis magnética en materiales ferromagnéticos mediante la realización de una práctica y análisis posterior de datos. Se describió la relación no lineal entre el campo magnético aplicado y la inducción magnética resultante, así como la influencia de la estructura interna y las propiedades magnéticas del material en esta relación. Se utilizó el modelo de Jiles-Atherton para ajustar los datos experimentales y obtener parámetros que caracterizan las propiedades magnéticas del material, como la susceptibilidad magnética máxima (M_s), la histéresis (B_s), el coeficiente de histéresis (α) y el coeficiente de histéresis cuadrático (γ). Se realizaron tomas de datos utilizando diferentes frecuencias para analizar cómo afectan estas variables al comportamiento magnético del material. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más profunda de la histéresis magnética. Como resultado para la energía disipada en forma de calor en la remagnetización promedio de $0,6J$ aproximadamente.

I. INTRODUCCIÓN

La histéresis magnética es un fenómeno que le ocurre a los materiales ferromagnéticos, que muestra una dependencia no lineal entre el campo magnético aplicado H y la inducción magnética resultante B . Esta relación está determinada por la estructura interna de los materiales y sus propiedades magnéticas.

En un material ferromagnético, la relación entre H y B está descrita por la ecuación:

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

donde μ_r es la permeabilidad relativa del material y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío. La permeabilidad relativa μ_r depende del campo magnético aplicado H y del estado previo de magnetización del material.

Cuando un material ferromagnético se magnetiza inicialmente, la inducción magnética B aumenta con el campo aplicado H . Sin embargo, cuando el campo H se reduce a cero, la inducción B no vuelve a cero, sino que permanece en un valor residual. Este fenómeno se conoce como magnetización remanente y se representa como un punto en la curva de histéresis.

La histéresis magnética se representa gráficamente mediante una curva de histéresis, que muestra la relación entre B y H durante un ciclo completo de magnetización y desmagnetización [1]. Esta curva tiene varias regiones y parámetros importantes:

- **Saturación:** Cuando el campo magnético H alcanza un valor máximo, la inducción magnética B alcanza un valor de saturación B_s , donde el material está completamente magnetizado y no puede magnetizarse más.
- **Coercitividad:** Es el valor del campo magnético H necesario para reducir la inducción magnética B a cero después de haber alcanzado la saturación. Representa la resistencia del material a la desmagnetización.
- **Retentividad:** Es el valor de la inducción magnética B cuando el campo H se reduce a cero después de haber alcanzado la saturación. Representa la capacidad del material para retener la magnetización.

La energía disipada en forma de calor debido a la remagnetización del núcleo puede calcularse como el área encerrada por la curva de histéresis en el plano $B - H$, y está relacionada con el área de histéresis [3]. Esta energía disipada por unidad de volumen V se puede ver como:

$$\epsilon = \frac{E}{V} = \int B dH$$

Donde E es la energía total disipada durante el ciclo de histéresis. Esta integral puede ser aproximada experimentalmente utilizando mediciones de corriente y flujo magnético en las bobinas del experimento.

II. MONTAJE Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Inicialmente se procedió a instalar el montaje como se muestra en la figura 1.

* Correo institucional: j.pinzonr@uniandes.edu.co

** Correo institucional: s.laverdeg@uniandes.edu.co

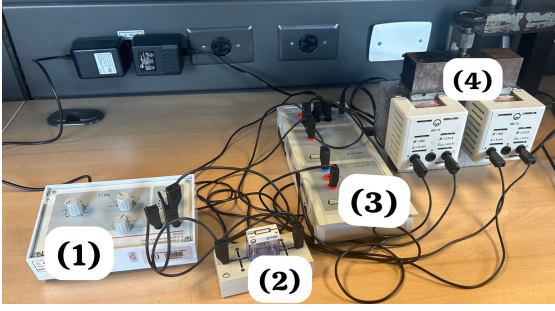


Figura 1. Montaje experimental

(1) Generador de funciones (sinusoidales, de sierra y cuadradas, (2) una resistencia STE de $1\ \Omega$, 2W. (3) un sensor Cassy y finalmente (4) dos bobinas de 500 vueltas con un núcleo de Hierro, el montaje a su vez se encontraba en conexión con un software el cuál permitió visualizar las imágenes de histéresis y los datos correspondientes a estas.

Posteriormente, se procedió a medir la corriente I que genera el campo H y a el voltaje inducido ϵ sobre la otra bobina simultáneamente. Además, con ayuda del software se creó una nueva variable correspondiente a la integral en el tiempo de ϵ y se midió el área transversal de la bobina.

Seguido de esto, se desmagnetizó núcleo y con el generador de señales se estableció una función de diente de sierra con amplitud de $2V$ y una frecuencia de $0,1Hz$. Se obtuvo la curva de histéresis al graficar el flujo magnético Φ_B como función de I . Finalmente, se obtuvieron diferentes curvas cambiando la forma de la onda y la frecuencia.

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la primera parte del análisis, se procedió a realizar las gráficas correspondientes a la corriente vs la intensidad para cada toma y luego las gráficas correspondientes a campo magnético vs inducción magnética, estos resultados se pueden observar en el apartado de Multimedia.

A continuación, se realizó un ajuste para describir la relación entre la corriente eléctrica y el flujo magnético en el material ferromagnético. El modelo de ajuste utilizado fue el modelo de Jiles-Atherton [4], tiene parámetros ajustables que caracterizan las propiedades magnéticas del material. Los parámetros ajustados para cada toma, proporcionaron información a cerca de la susceptibilidad magnética máxima (M_s), la histéresis (B_s), el coeficiente de histéresis (alpha) y el coeficiente de histéresis cuadrático (gamma). Estos parámetros son importantes para entender y caracterizar el comporta-

miento magnético del material. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

■ Parámetros de la curva de histéresis para 0.1Hz:

Cuadro I. Parámetros ajustados para la toma 1 (0.1 Hz)

Parámetro	Valor
M_s	1.5243550567732764
B_s	6.161001051684493
Alpha	6.951123722601742
Gamma	3.819459252056248

En la primera toma, el valor de M_s es alto, lo que indica una mayor capacidad del material para magnetizarse. Además, el valor de B_s es positivo y alto, lo que sugiere una mayor retención de magnetización después de retirar el campo magnético externo. Los valores de Alpha y Gamma son también altos, indicando una histéresis rígida y amplia.

Cuadro II. Parámetros ajustados para la toma 2 (0.1 Hz)

Parámetro	Valor
M_s	40.492700856139095
B_s	18.51776678160988
Alpha	372.7921390460053
Gamma	-45.1007638982737

Para esta segunda toma, observamos valores mucho más altos para M_s y B_s en comparación con la toma anterior. Esto indica una capacidad significativamente mayor del material para magnetizarse y una retención de magnetización más fuerte. Los valores de Alpha y Gamma también son altos, lo que sugiere una histéresis muy rígida y amplia en este caso.

Cuadro III. Parámetros ajustados para la toma 3 (0.1 Hz)

Parámetro	Valor
M_s	-66.57548924248584
B_s	-39.76920716416254
Alpha	833.1205644941249
Gamma	103.21524164261467

En la tercera toma, nuevamente observamos valores negativos para M_s y B_s . Los valores de Alpha y Gamma son más altos que en las tomas anteriores, indicando una histéresis aún más rígida y amplia en comparación con las otras tomas.

■ **Parámetros de la curva de histéresis para 1Hz:**

Parámetro	Valor
Ms	0.592057694513014
Bs	0.5814050207972304
Alpha	5.747573264210034
Gamma	1.1709830211702117

Cuadro IV. Parámetros ajustados para la toma 1 (1 Hz)

En la primera toma, observamos que el valor de Ms es relativamente bajo, lo que indica que el material no tiene una capacidad muy alta para magnetizarse. Sin embargo, el valor de Bs es cercano al de Ms, lo que sugiere que el material retiene bastante magnetización incluso después de retirar el campo magnético externo. Los valores de Alpha y Gamma son normales, lo que significa que la histéresis del material no es totalmente rígida ni amplia.

Parámetro	Valor
Ms	-74.31426826559975
Bs	-24.72099028269752
Alpha	2428.835891248388
Gamma	51.45007856483134

Cuadro V. Parámetros ajustados para la toma 2 (1 Hz)

Para esta segunda toma, observamos valores negativos para Ms y Bs, lo que podría ser una inversión en la dirección de magnetización o de la orientación del eje de medición. Los valores de Alpha y Gamma son más altos que en la primera toma, lo que significa que la histéresis del material es mucho más rígida y amplia en este caso.

Parámetro	Valor
Ms	-105.60045818645726
Bs	-273.6668677204857
Alpha	5259.316404042805
Gamma	155.00946138956863

Cuadro VI. Parámetros ajustados para la toma 3 (1 Hz)

En la tercera toma, nuevamente observamos valores negativos para Ms y Bs. Los valores de Alpha y Gamma son aún más altos que en la toma 2, lo que indica una histéresis aún más rígida y amplia en comparación con las otras dos tomas.

Para la segunda parte del análisis, se encontró la energía disipada en forma de calor en la remagnetización para las 6 curvas obtenidas. Primero se obtuvieron los

Datos	Energía disipada
Sierra: 2V, 0.1Hz	$(0,42 \pm 0,13)\text{J}$
Sinoidal: 2V, 0.1Hz	$(0,22 \pm 0,08)\text{J}$
Cuadrada: 2V, 0.1 Hz	$(0,25 \pm 0,16)\text{J}$
Sierra: 2V, 1Hz	$(0,77 \pm 0,05)\text{J}$
Sinoidal: 2V, 1Hz	$(0,56 \pm 0,02)\text{J}$
Cuadrada: 2V, 1 Hz	$(1,40 \pm 0,05)\text{J}$

Cuadro VII. Energía disipada en forma de calor en la remagnetización.

En la tabla se muestran los valores de energía perdida en forma de calor para cada toma de datos realizada.

valores de inducción magnética (B) y de campo magnético (H) mediante las ecuaciones 1 y 2 respectivamente. Luego, se procedió a graficar las curvas de Histéresis B vs H como se observa en las figuras 2 a 7. Todo ello para que fuese posible encontrar la energía disipada en forma de calor en la remagnetización mediante la ecuación 3 en la cual las integrales se obtuvieron mediante el método de integración del trapecio. Los resultados se muestran en la tabla VII.

De acuerdo con el criterio de precisión descrito en la sección V A, se obtuvo precisión solamente en las 3 últimas tomas de datos.

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, en este informe, se analizó la histéresis magnética en materiales ferromagnéticos. Se describió la relación no lineal entre el campo magnético aplicado y la inducción magnética resultante, así como la influencia de la estructura interna y las propiedades magnéticas del material.

Se utilizó el modelo de Jiles-Atherton para ajustar los datos experimentales y obtener los parámetros que caracterizan las propiedades magnéticas del material, como la susceptibilidad magnética máxima (Ms), la histéresis (Bs), el coeficiente de histéresis (alpha) y el coeficiente de histéresis cuadrático (gamma). Estos parámetros proporcionaron información sobre el comportamiento magnético del material, como su capacidad para magnetizarse, retener la magnetización y la rigidez de la histéresis.

Se realizaron tomas de datos utilizando diferentes frecuencias para analizar cómo afectan estas variables al comportamiento magnético del material. Los resultados mostraron que, en general, las curvas de histéresis presentaban valores de Ms y Bs significativamente diferentes para diferentes frecuencias, lo que indica una variación en la capacidad de magnetización y retención de magnetización del material con la frecuencia del campo

magnético aplicado.

Además, se calculó la energía disipada en forma de calor, que en promedio fue de $0,6J$, durante el ciclo de histéresis para cada toma de datos. Los resultados mostraron que la energía disipada variaba con la forma de onda y la frecuencia del campo magnético aplicado, lo que sugiere que estos parámetros también influyen en la eficiencia de conversión de energía en el material ferromagnético.

Uno de los errores evidenciados en la práctica es que no se desmagnetizó el núcleo de hierro apropiadamente. Esto se evidencia en las gráficas 2 a 7 como las curvas de histéresis no están centradas en el origen del sistema de coordenadas.

V. ANEXOS

A. Criterios

- Precisión: $\frac{\sigma}{X_{exp}} \leq 0,1$
- Exactitud: $|X_{real} - X_{exp}| \leq 2,5 \cdot \sigma$

VI. APÉNDICE DE CÁLCULO

- Inducción magnética:

$$B = -\frac{\Phi}{NA}, A = 0,001764m^2, N = 500 \quad (1)$$

- Campo magnético:

$$H = \frac{NI}{L}, L = 0,11m, N = 500 \quad (2)$$

- Energía por unidad de volumen dispersada:

$$\epsilon = \frac{E}{V} = \int BdH \quad (3)$$

$$\sigma_\epsilon = \sqrt{\left| \frac{\int (B - \bar{B})^2 dH}{H_{max} - H_{min}} \right|}$$

VII. MULTIMEDIA

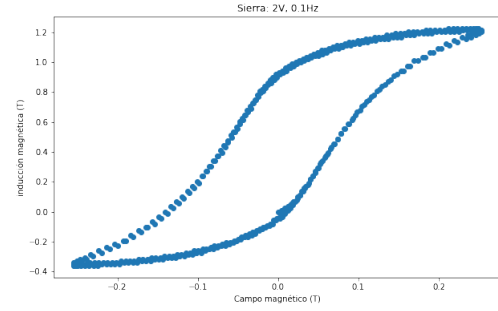


Figura 2. Función sierra a 2V y 0.1Hz

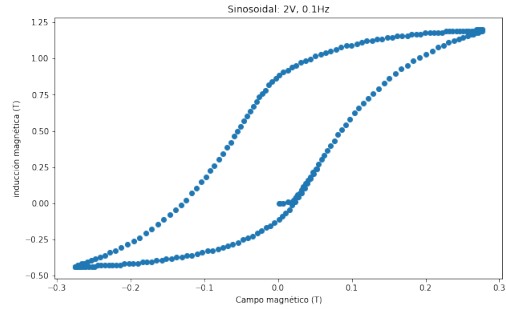


Figura 3. Función sinusoidal a 2V y 0.1Hz

- [1] Hyperphysics, 2024.
- [2] D. de Física de la Universidad de los Andes. Experimentos rotativos - guías. 2022.
- [3] J. W. Rohl. Modern physics from alpha to z0. [https://sun.bao.ac.cn/hsos_data/Meeting_report/Stark_resources/ebook%20White,%20Introduction%20to%20Atomic%20Spectra%20\(1934\) \(ASIN%20B000HKNGN6\).pdf](https://sun.bao.ac.cn/hsos_data/Meeting_report/Stark_resources/ebook%20White,%20Introduction%20to%20Atomic%20Spectra%20(1934) (ASIN%20B000HKNGN6).pdf), 1934.

- [4] universidad de sevilla. *Modelo de Jiles-Atherton*. 2004.

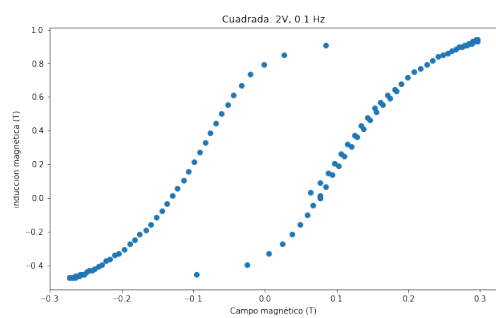


Figura 4. Función cuadrada a 2V y 0.1Hz

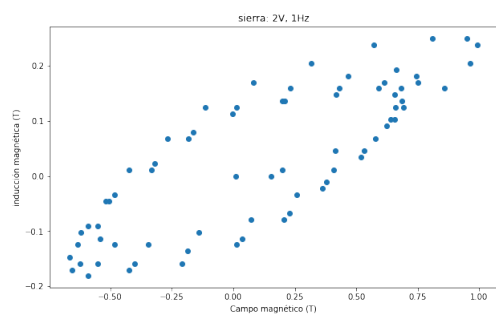


Figura 5. Función sierra a 2V y 1Hz

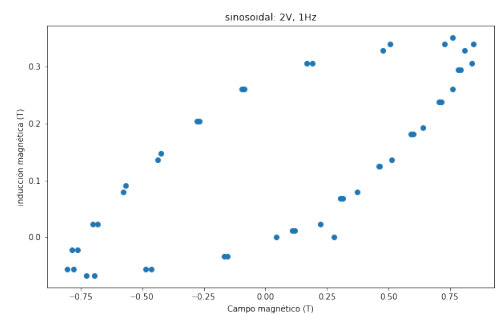


Figura 6. Función sinusoidal a 2V y 1Hz

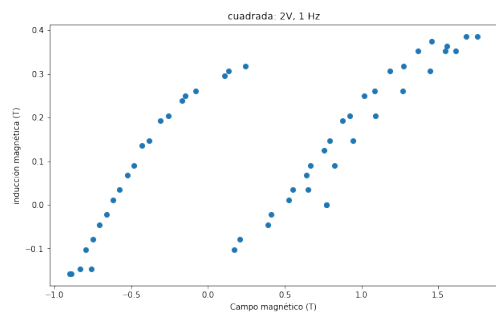


Figura 7. Función cuadrada a 2V y 1Hz

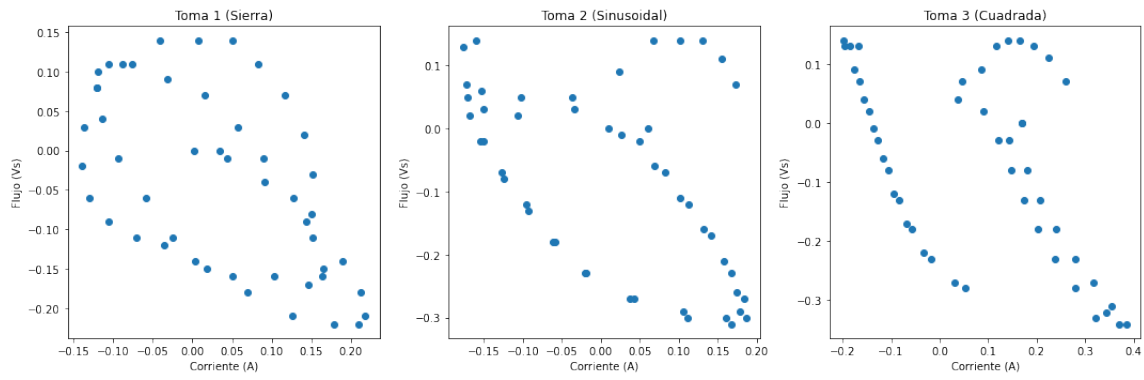


Figura 8. Corriente vs flujo. Función sierra, sinusoidal y cuadrada a 2V y 1Hz

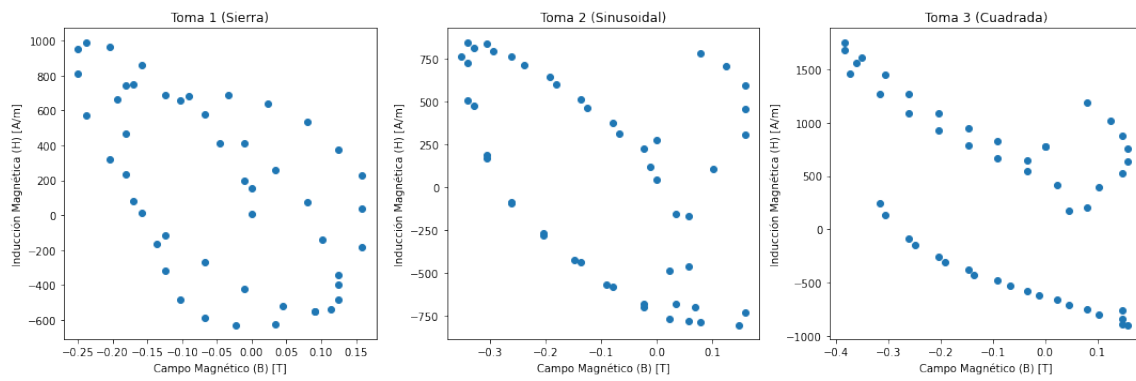


Figura 9. Campo magnético vs Inducción magnética. Función sierra, sinusoidal y cuadrada