

Clase 3 – TIM 71

Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

10 de marzo de 2025

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

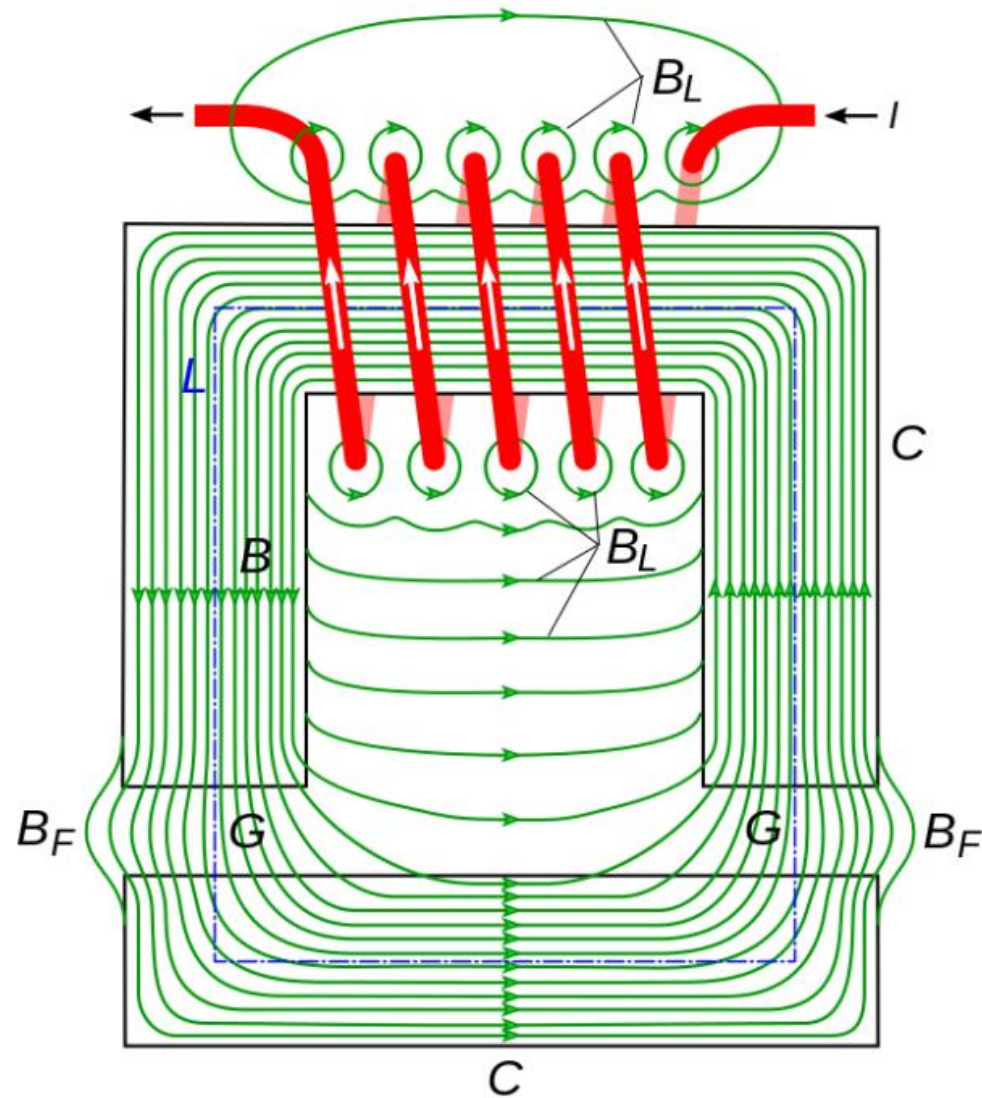
$$E = mc^2$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt}$$

Plan de clase

1. Repaso:
 1. Campos H y B
2. El campo magnético (1.4 Ch)
 1. Comportamiento magnético de los materiales
 2. Pérdidas en un núcleo ferromagnético
 3. Histéresis



Simulación de las líneas de campo en un circuito magnético con 2 entrehierros:

Funcionamiento de los imanes ([video](#))



1. Introducción a la Permeabilidad Magnética

- **Relación entre B y H :**

$$B = \mu H$$

- B : Densidad de flujo magnético (T).
- H : Intensidad del campo magnético (A-v/m).
- μ : Permeabilidad magnética (H/m).

- **Permeabilidad relativa (μ_r):**

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

- μ_0 : Permeabilidad del espacio libre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
- En materiales ferromagnéticos, μ_r puede ser hasta 6000 veces mayor que μ_0 .

2. Curva de Magnetización (B vs H)

- **Descripción de la curva:**

- 1. **Región no saturada:**

- Pequeños incrementos en H producen grandes aumentos en B .
 - La permeabilidad ($\mu = \frac{B}{H}$) es alta y casi constante.

- 2. **Rodilla de la curva:**

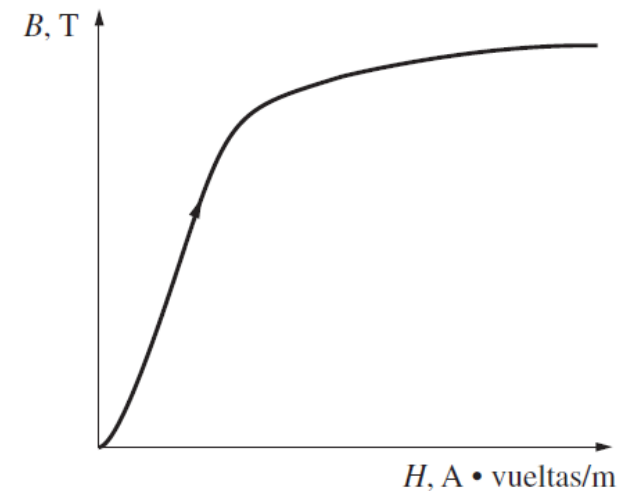
- Zona de transición entre la región no saturada y saturada.

- 3. **Región saturada:**

- Incrementos en H producen cambios mínimos en B .
 - La permeabilidad disminuye drásticamente.

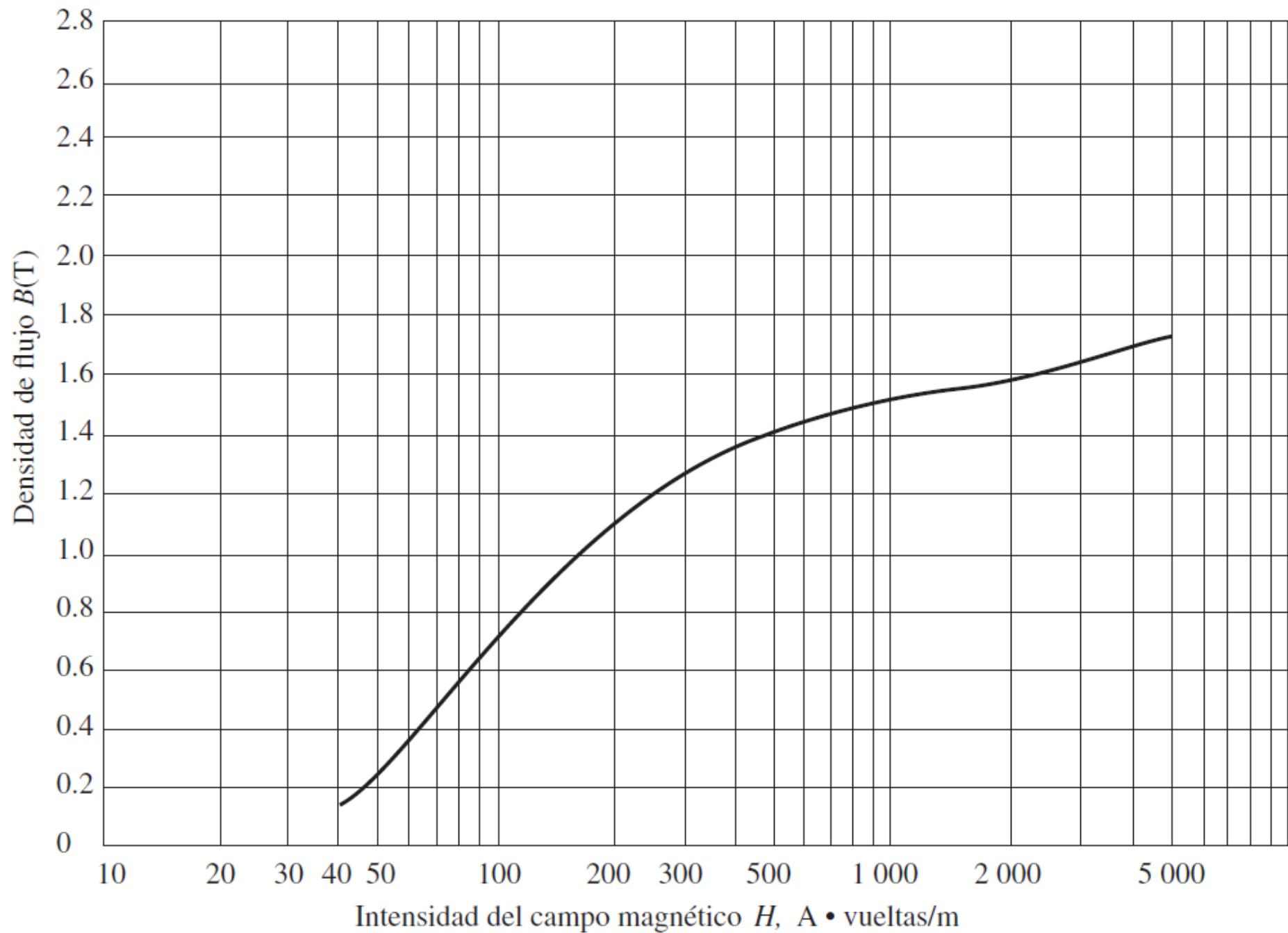
- **Gráfica típica:**

- B vs H (lineal y logarítmica).
 - μ_r vs H (muestra cómo μ_r aumenta y luego disminuye).



3. Saturación Magnética

- **Definición:**
 - Estado en el que un aumento en H no produce un aumento significativo en B .
 - El material ha alcanzado su máxima capacidad de magnetización.
- **Implicaciones en máquinas eléctricas:**
 - Los núcleos se diseñan para operar cerca de la **rodilla de la curva**.
 - Esto maximiza el flujo sin entrar en saturación, donde B ya no es proporcional a H .



c)

FIGURA 1-10 a) Curva de magnetización con cd de un núcleo ferromagnético. b) Curva de magnetización en términos de densidad de flujo e intensidad del campo magnético. c) Curva de magnetización detallada de una típica pieza de acero.

EJEMPLO 1-4

Encuentre la permeabilidad relativa del material ferromagnético típico, cuya curva de magnetización se muestra en la figura 1-10c), cuando *a)* $H = 50$, *b)* $H = 1\,00$, *c)* $H = 500$ y *d)* $H = 1\,000$ A • vueltas/m.

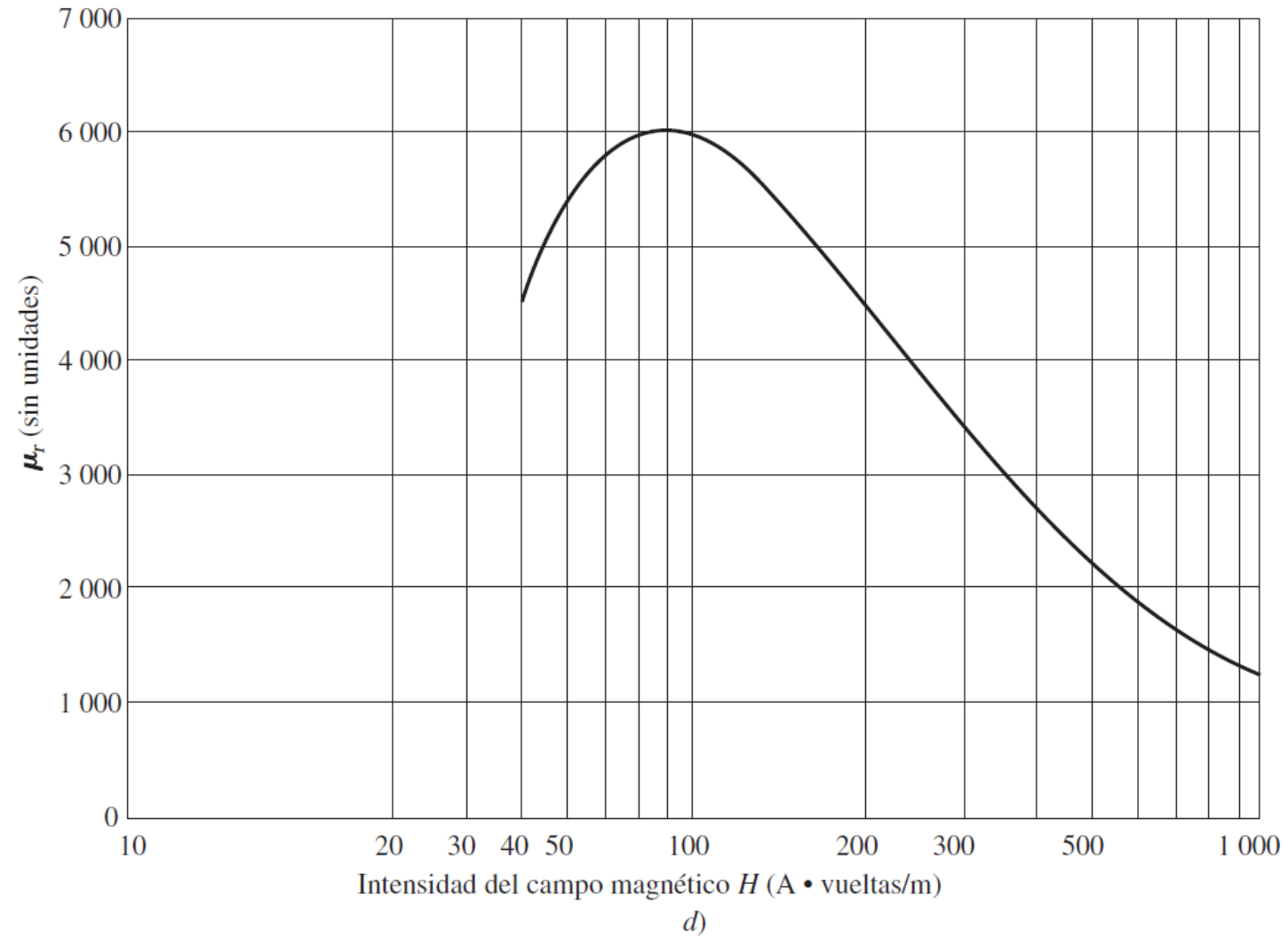
a) Cuando $H = 50$ A • espiras/m, $B = 0.25$ T, entonces

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.25 \text{ T}}{50 \text{ A} \cdot \text{espiras/m}} = 0.0050 \text{ H/m}$$

y

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0.0050 \text{ H/m}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}} = 3\,980$$

Notar que hay que aproximar los valores a partir de la tabla
Se pide hallar los valores restantes



Repetir el ejemplo anterior (Ch. 1.4) usando la siguiente curva y observar que es otro material

Flujo Magnético (Φ) en un Núcleo

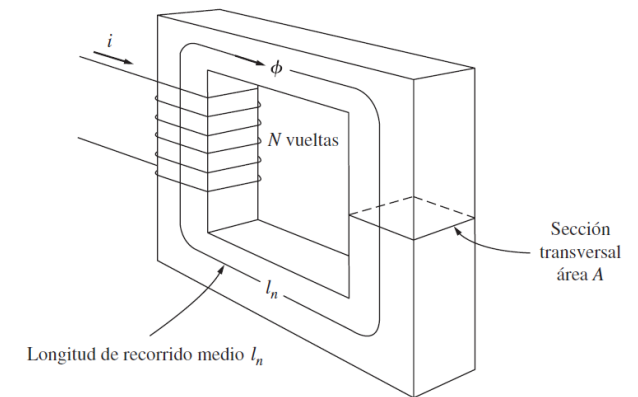
- **Fórmula general:**

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \mathcal{F}\mathcal{P}$$

- **Ejemplo en núcleo ferromagnético:**

$$\Phi = \frac{\mu N i A}{l_n}$$

- μ : Permeabilidad del núcleo.
- Ni : Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$).
- A : Área transversal.
- l_n : Longitud media del núcleo.



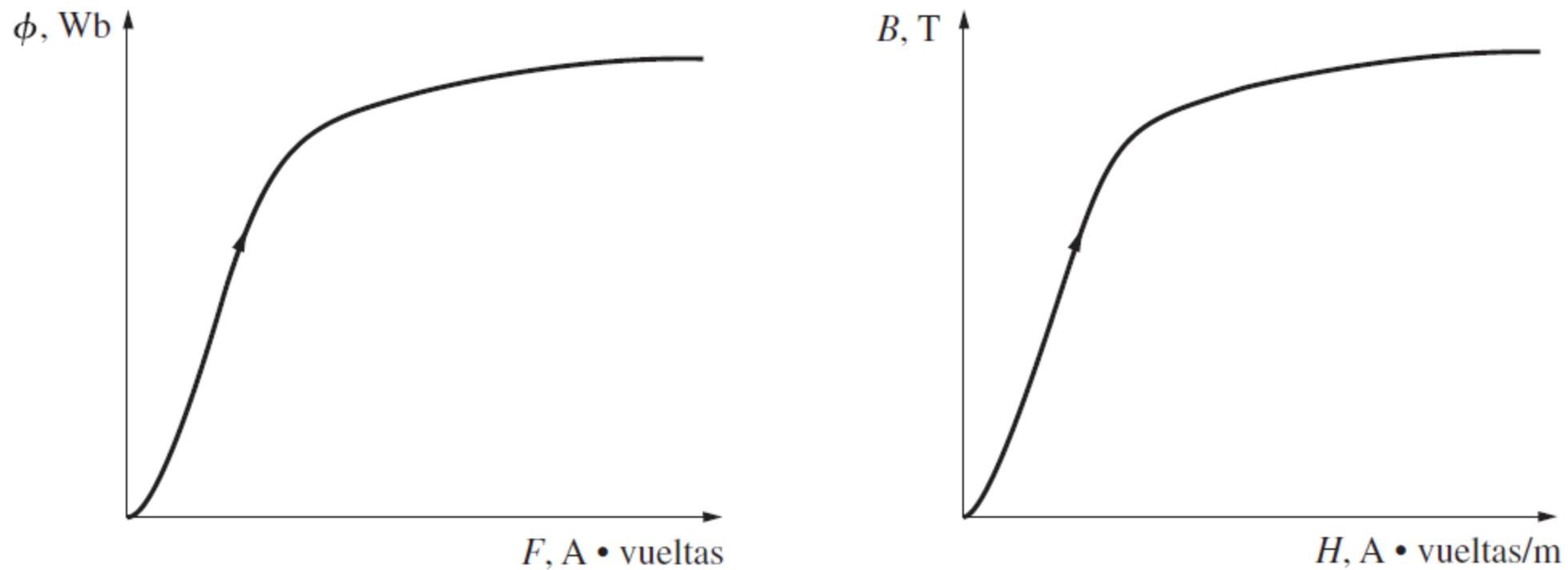


FIGURA 1-10 a) Curva de magnetización con cd de un núcleo ferromagnético. b) Curva de magnetización en términos de densidad de flujo e intensidad del campo magnético. c) Curva de magnetización detallada de una típica pieza de acero.

4. No Linealidad de los Materiales Ferromagnéticos

- **Comportamiento no lineal:**
 - La permeabilidad (μ) no es constante; varía con H .
 - En la región no saturada, μ es alta y casi constante.
 - En la región saturada, μ disminuye significativamente.
- **Consecuencias:**
 - El flujo (Φ) no es proporcional a la fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$) en la región saturada.
 - Esto afecta el diseño y operación de máquinas eléctricas y transformadores.

EJEMPLO 1-5

Un núcleo magnético cuadrado tiene una longitud media de 55 cm y un área de sección transversal de 150 cm^2 . Una bobina de 200 vueltas de alambre está enrollada en una de las columnas del núcleo, el cual está hecho de un material cuya curva de magnetización se muestra en la figura 1-10c).

- a) ¿Cuánta corriente se requiere para producir un flujo de 0.012 Wb en el núcleo?
- b) ¿Cuál es la permeabilidad relativa del núcleo para esa corriente?
- c) ¿Cuál es su reluctancia?

Solución

a) La densidad de flujo requerida en el núcleo es

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.012 \text{ Wb}}{0.015 \text{ m}^2} = 0.8 \text{ T}$$

De la figura 1-10c), la intensidad del campo magnético requerida es

$$H = 115 \text{ A} \cdot \text{espiras/m}$$

De la ecuación (1-20), la fuerza magnetomotriz necesaria para producir esta intensidad de campo es

$$\begin{aligned}\mathcal{F} &= Ni = Hl_n \\ &= (115 \text{ A} \cdot \text{espiras/m})(0.55 \text{ m}) = 63.25 \text{ A} \cdot \text{espiras}\end{aligned}$$

Entonces, la corriente requerida es

$$i = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{63.25 \text{ A} \cdot \text{espiras}}{200 \text{ espiras}} = 0.316 \text{ A}$$

b) La permeabilidad del núcleo para esta corriente es

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.8 \text{ T}}{115 \text{ A} \cdot \text{espiras/m}} = 0.00696 \text{ H/m}$$

Por lo tanto, la permeabilidad relativa es

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0.00696 \text{ H/m}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}} = 5\,540$$

c) La reluctancia del núcleo es

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi} = \frac{63.25 \text{ A} \cdot \text{espiras}}{0.012 \text{ Wb}} = 5\,270 \text{ A} \cdot \text{espiras/Wb}$$

5. Aplicaciones en Máquinas Eléctricas

- **Transformadores y motores:**

- Se diseñan para operar cerca de la **rodilla de la curva de magnetización**.
- Esto asegura un flujo alto sin saturación, manteniendo la eficiencia.

- **Importancia de la no linealidad:**

- La no linealidad afecta la inductancia, la respuesta dinámica y las pérdidas en el núcleo.
- Debe considerarse en el diseño para evitar distorsiones y pérdidas excesivas.

6. Resumen

1. **Permeabilidad (μ):** Relaciona B y H , pero no es constante en materiales ferromagnéticos.
2. **Curva de magnetización:** Muestra cómo B varía con H , con regiones no saturada, rodilla y saturada.
3. **Saturación:** Estado en el que B ya no aumenta significativamente con H .
4. **No linealidad:** La permeabilidad varía con H , afectando el flujo y el diseño de máquinas.
5. **Aplicaciones:** Los núcleos se diseñan para operar cerca de la rodilla, maximizando el flujo sin saturación.

Clase 3 (Continuación): Pérdidas de Energía en un Núcleo Ferromagnético

Objetivo: Entender las pérdidas de energía en núcleos ferromagnéticos debido a la histéresis y las corrientes parásitas, y su impacto en el diseño de máquinas eléctricas.

1. Introducción a las Pérdidas en el Núcleo

- **Fuentes de pérdidas:**

1. **Pérdidas por histéresis:** Debidas a la no linealidad y retraso en la magnetización del material.
2. **Pérdidas por corrientes parásitas (Foucault):** Debidas a corrientes inducidas en el núcleo por campos magnéticos variables.

- **Importancia:**

- Estas pérdidas reducen la eficiencia de máquinas eléctricas y transformadores.
- Deben minimizarse en el diseño para mejorar el rendimiento.

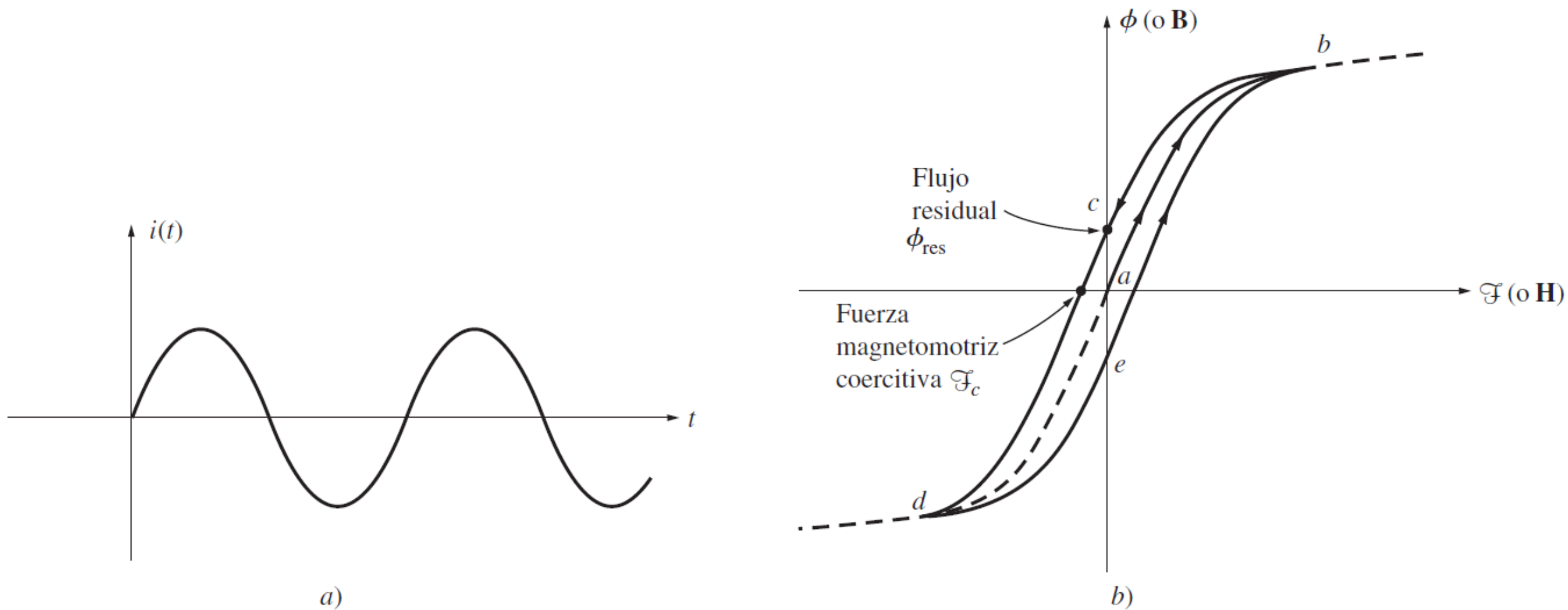


FIGURA 1-11 Curva o lazo de histéresis trazado por el flujo en un núcleo cuando se le aplica la corriente $i(t)$.

2. Histéresis Magnética

- **Definición:**

- Fenómeno en el que la magnetización de un material ferromagnético depende de su historia previa.
- Se representa mediante un **lazo de histéresis** en la curva B vs H .

- **Lazo de histéresis:**

- **Trayectoria ab:** Aumento de corriente → Aumento de flujo (curva de magnetización).
- **Trayectoria bcd:** Disminución de corriente → Disminución de flujo (no sigue la misma curva).
- **Trayectoria deb:** Aumento de corriente nuevamente → Flujo sigue otra curva.

- **Energía perdida por ciclo:**

- El área encerrada por el lazo de histéresis representa la energía perdida en forma de calor.
- Fórmula:

$$W_h = \oint H dB$$

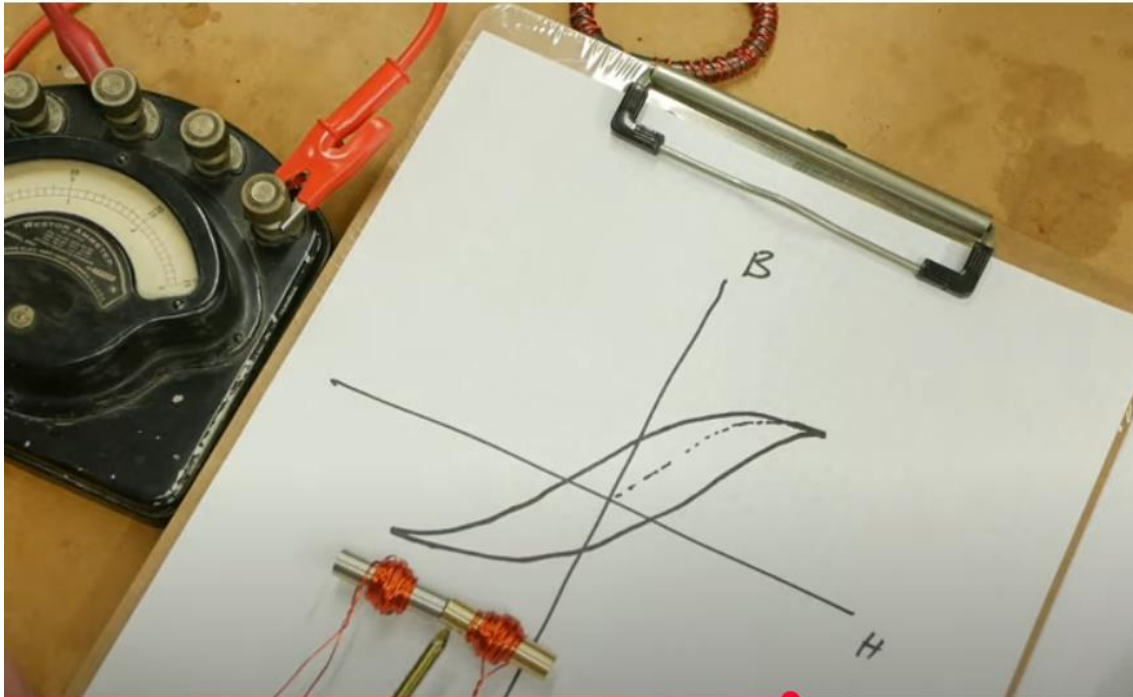
- W_h : Energía perdida por ciclo (J/m^3).



Preguntas:

- **¿Cómo afecta la fuerza coercitiva al diseño de imanes permanentes?**
- **Alta fuerza coercitiva:**
 - Materiales con alta H_c son ideales para imanes permanentes, ya que mantienen su magnetización incluso bajo influencias externas (ej: campos opuestos, golpes).
 - Ejemplos: Ferritas, aleaciones de neodimio-hierro-boro (NdFeB).
- **Baja fuerza coercitiva:**
 - Materiales con baja H_c pierden fácilmente su magnetización.
 - No son adecuados para imanes permanentes, pero son útiles en núcleos de transformadores (ej: acero al silicio).
- **Diseño de imanes:**
 - Se eligen materiales con alta H_c y B_r para maximizar la retención de magnetización.

Demo experimental ([video](#))

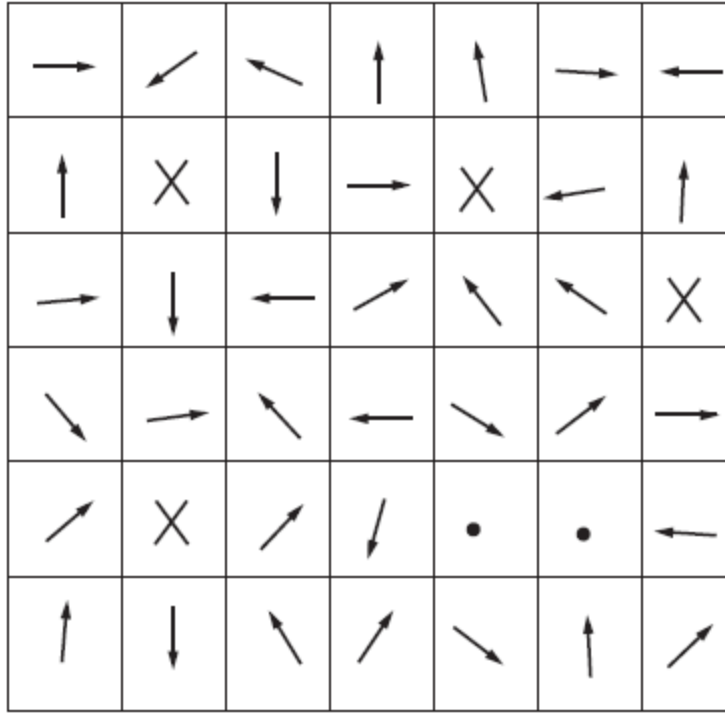


Diapositiva 3a: Flujo Residual y Fuerza Coercitiva

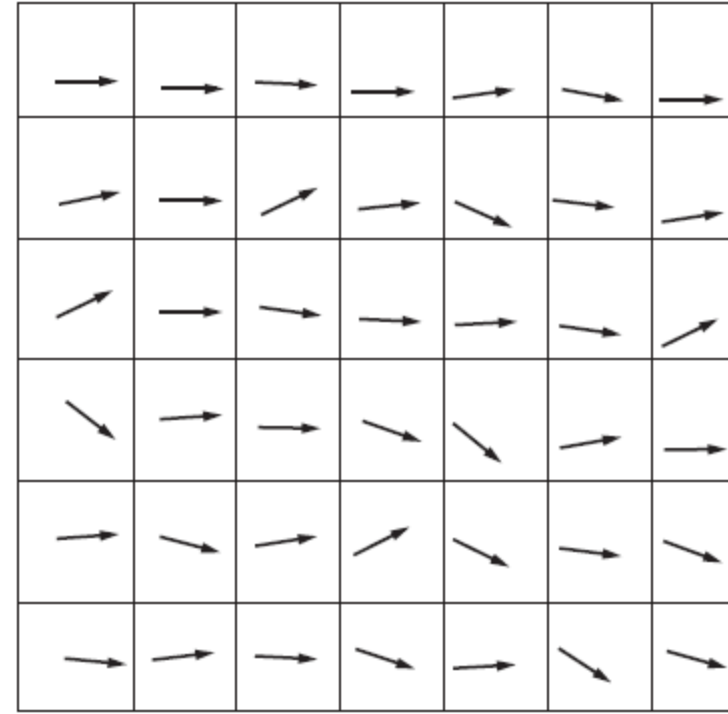
- **Flujo residual (B_r):**
 - Flujo magnético que permanece en el núcleo después de retirar la fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$).
 - Es la base de los **imanes permanentes**.
- **Fuerza coercitiva (H_c):**
 - Fuerza magnetomotriz necesaria para reducir el flujo a cero.
 - Se aplica en dirección opuesta al campo original.
- **Trayectoria del flujo:**
 1. **abc:** Aplicación y retiro de $\mathcal{F}$.
 2. **cd:** Aplicación de $\mathcal{F}$ en dirección opuesta para desmagnetizar.

Diapositiva 3b: Dominios Magnéticos

- **Estructura de los dominios:**
 - Regiones microscópicas donde los átomos tienen sus campos magnéticos alineados.
 - Cada dominio actúa como un **imán permanente** pequeño.
- **Sin campo externo:**
 - Dominios orientados al azar → Material no magnetizado.
- **Con campo externo:**
 - Dominios se alinean con el campo → Material magnetizado.



a)



b)

FIGURA 1-12 a) Dominios magnéticos orientados al azar. b) Dominios magnéticos alineados en presencia de un campo magnético externo.

Videos: dominios magneticos

Real picture of
changing
magnetic domain
walls

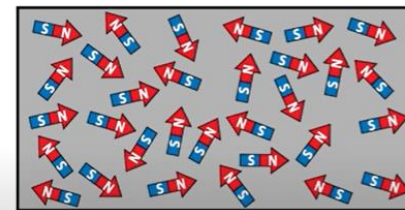


[Ver](#) los dominios alinearse

[Escuchar](#) los dominios alinearse

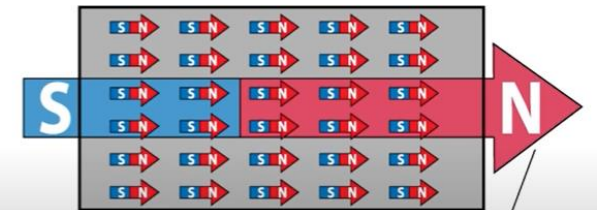
Magnetized Domains

Domains before
magnetization
~ random directions



Unmagnetized material

Domains after
magnetization
~ align in same direction



Magnetized material

Preguntas:

- ¿Por qué los dominios no vuelven a su orientación aleatoria al retirar el campo externo?
- **Estabilidad de los dominios:**
 - Una vez alineados, los dominios tienden a mantenerse en esa posición debido a las fuerzas internas del material.
 - Esto crea el **flujo residual** y es la base de los imanes permanentes.
- **Falta de energía:**
 - Los dominios requieren energía para cambiar su orientación.
 - El campo magnético externo proporciona esta energía durante la magnetización, pero no hay una fuente de energía para revertir el proceso al retirar el campo.

Diapositiva 3c: Alineación de Dominios y Saturación

- **Proceso de alineación:**

1. Dominios orientados en la dirección del campo crecen.
2. Átomos adyacentes cambian su orientación para alinearse con el campo.
3. Efecto de retroalimentación positiva aumenta el flujo magnético.

- **Saturación:**

- Casi todos los dominios están alineados.
- Incrementos adicionales en $\mathcal{F}$ producen poco aumento en B .

Diapositiva 3d: Origen de la Histéresis

- **Retención de alineación:**
 - Al retirar el campo externo, los dominios no vuelven a su orientación aleatoria.
 - Se requiere energía para desalinearlos.
- **Causa de la histéresis:**
 - Los dominios permanecen alineados debido a la falta de energía para revertir su orientación.
 - Esto crea el **flujo residual** y la necesidad de una **fuerza coercitiva**.

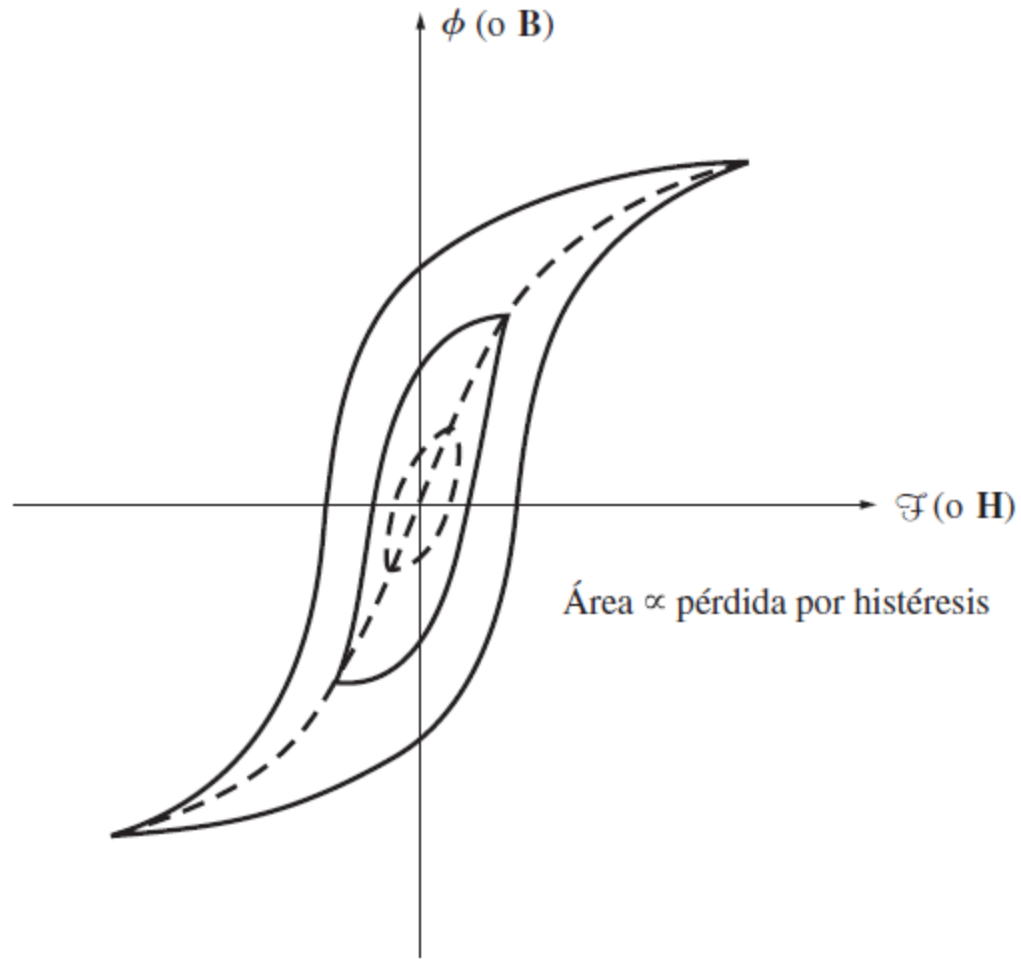


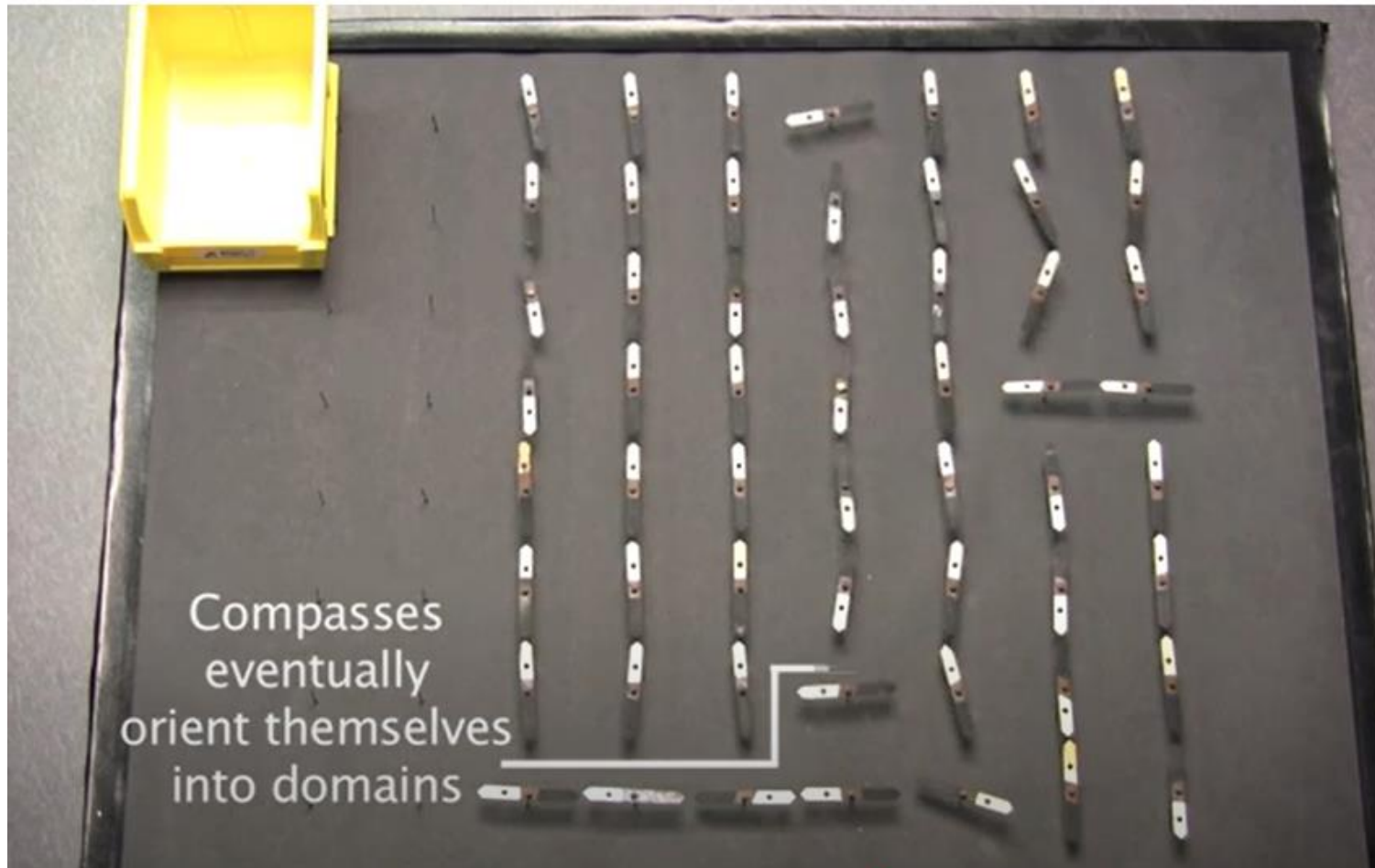
FIGURA 1-13 Efecto del tamaño de las variaciones de la fuerza magnetomotriz en la magnitud de las pérdidas por histéresis.

Fórmula:

$$W_h = \oint H dB$$

▪ W_h : Energía perdida por ciclo (J/m^3).

Video: modelo macroscopico



Diapositiva 3e: Pérdida de Magnetización

- **Fuentes de energía para desalinear dominios:**

1. Fuerza magnetomotriz en dirección opuesta.
2. Choques mecánicos (golpes o caídas).
3. Calor (aumento de temperatura).

- **Consecuencia:**

- Un imán permanente puede perder su magnetización si se expone a estas fuentes de energía.
-

Video: máquina térmica magnética



[Video previo](#) (imantando un imán)

Diapositiva 3f: Resumen de Histéresis

1. **Flujo residual (B_r):** Flujo que permanece después de retirar $\mathcal{F}$.
2. **Fuerza coercitiva (H_c):** $\mathcal{F}$ necesaria para desmagnetizar el material.
3. **Dominios magnéticos:** Regiones de átomos alineados que explican la magnetización.
4. **Saturación:** Estado en el que casi todos los dominios están alineados.
5. **Histéresis:** Retención de alineación de dominios debido a la falta de energía para revertirla.