



Departamento de Física
Universidad de Jaén

Magnetismo

❖ **Campo Magnético**

❖ **Inducción Electromagnética**

❖ **Campo Magnético en la materia**



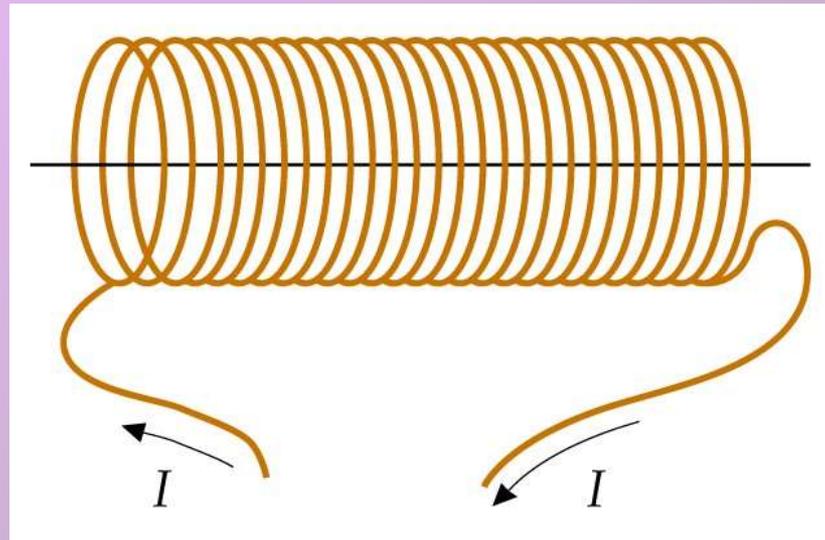
1- Introducción

- Las propiedades magnéticas de la materia dependen de las interacciones entre campos Magnéticos y Momentos Dipolares magnéticos de las órbitas electrónicas, o de estos entre sí.
- En un solenoide teníamos:

$$\phi_0 = \bar{\mathbf{B}}_0 \cdot \bar{\mathbf{S}}$$

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \frac{\mathbf{I}}{L}$$

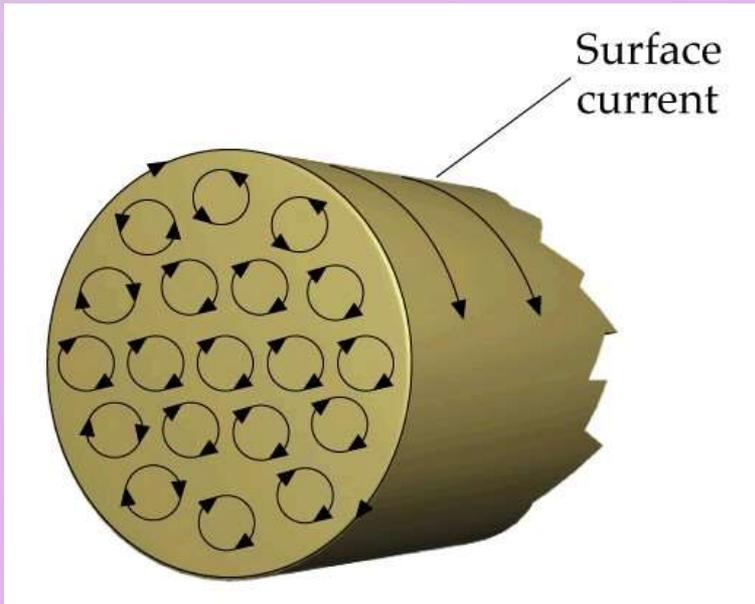
$$\oint \bar{\mathbf{B}}_0 \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \mu_0 I_{\text{libres}}$$



1- Introducción

- Al introducir el material en el solenoide vemos que:
- Las órbitas electrónicas del material se orientan debido al campo aplicado, por tanto, tendremos una I inducida por magnetización.

$$\phi = \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{S}}$$



$$\oint \bar{\mathbf{B}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \mu_0 (I_{\text{libres}} + I_{\text{magnet}})$$

- Podemos llamar al momento dipolar magnético de cada molécula:

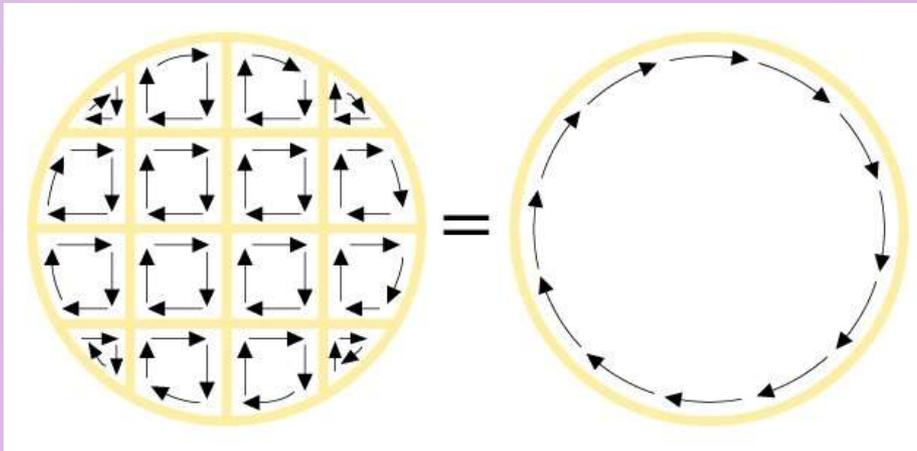
$$\bar{\mathbf{m}} = I \cdot \bar{\mathbf{S}}$$

1- Introducción

- Definimos el **Vector de Magnetización**:

$$\bar{\mathbf{M}} = \frac{\sum \bar{\mathbf{m}}_i}{V} = n \bar{\mathbf{m}}$$

Siendo 'n', el nº de moléculas por unidad de volumen.



$$\sum \bar{\mathbf{m}}_i = I_m \cdot \bar{\mathbf{S}}_{\text{barra}}$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \frac{\sum \bar{\mathbf{m}}_i}{V} = \frac{I_m \cdot \bar{\mathbf{S}}}{\bar{\mathbf{S}} \cdot \bar{\mathbf{l}}} = \frac{I_m}{\bar{\mathbf{l}}}$$

$$\oint \bar{\mathbf{M}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = I_{\text{magnet}}$$

Ley de Ampère para M

1- Introducción

- Como teníamos: $\oint \bar{\mathbf{B}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \mu_0 (I_{\text{libres}} + I_{\text{magnet}})$

$$\oint \bar{\mathbf{B}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \mu_0 (I_{\text{libres}} + \oint \bar{\mathbf{M}} \cdot d\bar{\mathbf{l}}) \Rightarrow \oint \left(\frac{\bar{\mathbf{B}}}{\mu_0} - \bar{\mathbf{M}} \right) \cdot d\bar{\mathbf{l}} = I_{\text{libres}}$$

- Definimos el **Vector Intensidad Magnética**: $\bar{\mathbf{H}} = \frac{\bar{\mathbf{B}}}{\mu_0} - \bar{\mathbf{M}}$

$$\boxed{\oint \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = I_{\text{libres}}} \quad (\text{Amp/m})$$

Ley de Ampère para H

Si no hay M: $\boxed{\bar{\mathbf{B}} = \mu_0 \bar{\mathbf{H}}}$

En algunos libros:

H → campo magnético.

B → vector inducción magnética
o densidad de flujo.

2 – Tipos de Materiales

- En general la magnetización de un material es proporcional al campo magnético aplicado: $\bar{M} \propto \bar{H} \Rightarrow \bar{M} = \chi \bar{H}$

La Cte. de proporcionalidad se llama **Susceptibilidad Magnética**. Es adimensional pues M y H tienen las mismas unidades.

Como:
$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) = \mu_0 (\bar{H} + \chi \bar{H}) = \mu_0 (1 + \chi) \bar{H}$$

- Definimos la **Permeabilidad Magnética** del material:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$$

$$\bar{B} = \mu_0 \mu_r \bar{H}$$

2 – Tipos de Materiales

- Clasificamos los materiales en función de los valores de χ :

- $\chi < 0 \Rightarrow \mu < \mu_0 \rightarrow$ **Diamagnéticas**
- $\chi > 0 \Rightarrow \mu > \mu_0 \rightarrow$ **Paramagnéticas**
- $\chi \gg 0 \Rightarrow \mu \gg \mu_0 \rightarrow$ **Ferromagnéticas**

- Efectos de un campo aplicado sobre un material:

- **Distorsión:** cuando aplicamos B , aparece un momento dipolar magnético inducido (m_i); este se puede producir en la dirección de B o en dirección contraria.
- **Orientación:** los m_i ya existentes se alinean en la dirección de B .

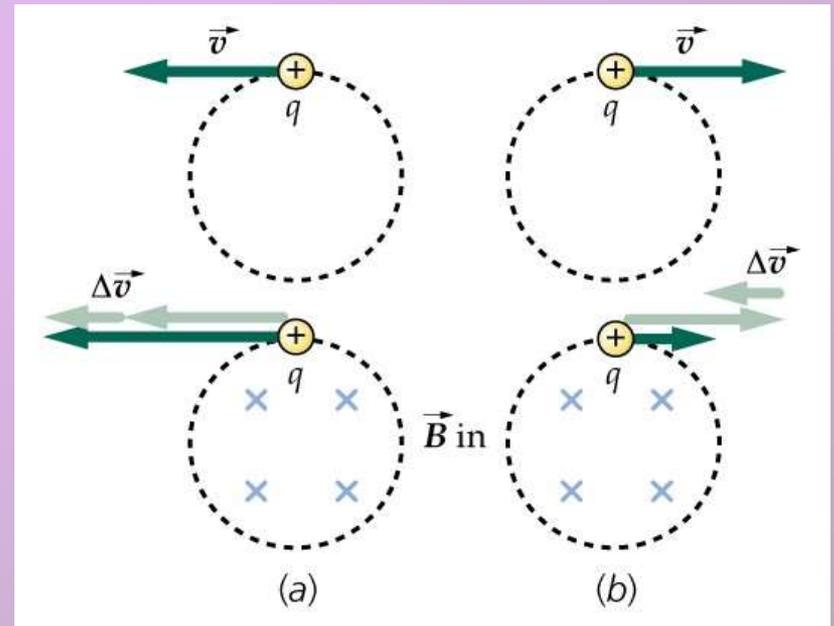
3 – Diamagnéticas

• Inicialmente: $\vec{m}_i = 0 \Rightarrow \vec{M} = 0$

- Lo que sucede es que los momentos dipolares magnéticos atómicos son nulos por estar los electrones moviéndose en órbitas aleatorias.

- Como $\chi < 0 \Rightarrow$ al aplicar un B se produce distorsión contraria:

- Aumenta el flujo hacia dentro de las orbitas

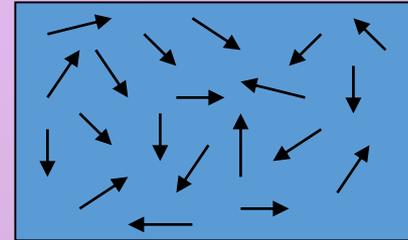


• Según la L. De Lenz, se inducirán corrientes opuestas a la variación de flujo. La única forma posible es aumentando la velocidad de las cargas.

4 – Paramagnéticas

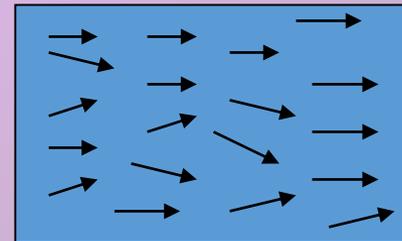
- Inicialmente: $\vec{m}_i \neq 0$

Pero están todos desordenados por la agitación térmica, con lo cual: $\vec{M} = 0$



- Al aplicar un campo externo puede haber distorsión y sobre todo orientación

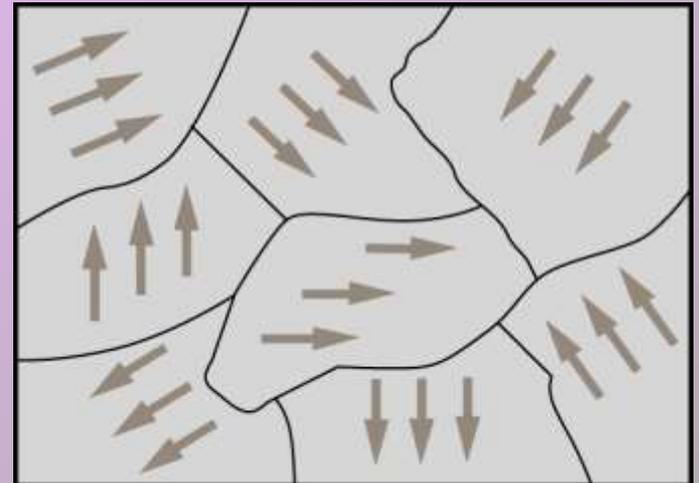
⇒ el material se imana.



- Si la temperatura aumenta la orientación disminuye, por tanto, χ depende de la Temperatura.
- Al suprimir el campo externo la orientación desaparece y vuelve al estado inicial.

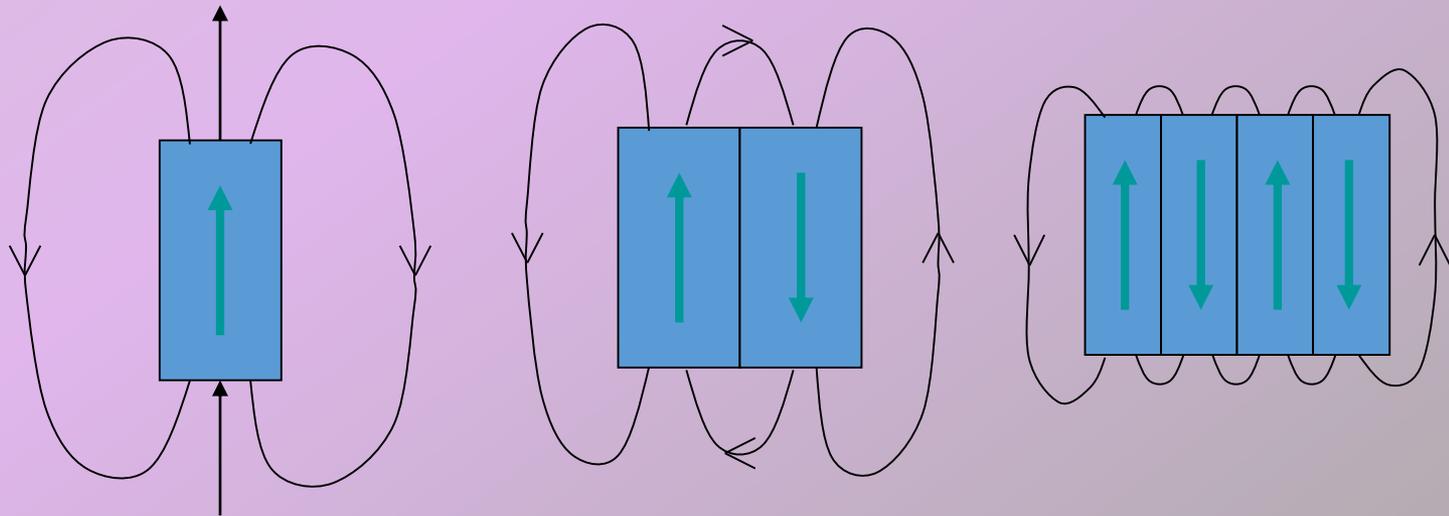
5 – Ferromagnéticas

- En ausencia de campos externos puede presentar imanación nula o muy elevada.
- Además la imanación no es lineal y depende de su historia magnética.
- Existen zonas con momentos magnéticos dipolares orientados que se denominan **Dominios Magnéticos**.
- La agitación térmica no es suficiente para desorientar los m_i dentro de cada dominio.



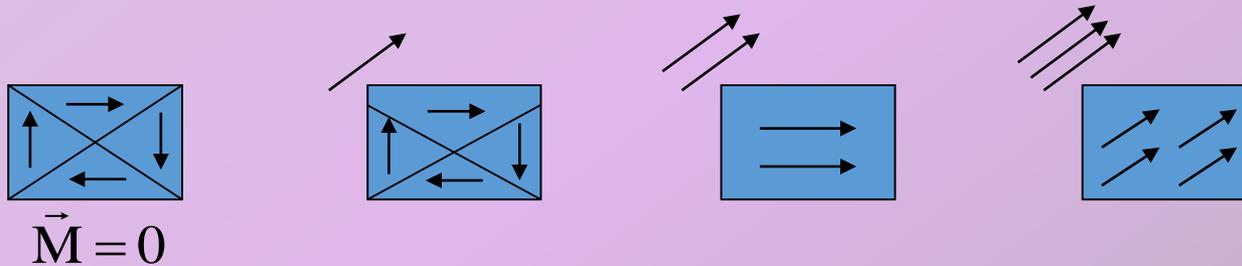
5 – Ferromagnéticas

- Los materiales ferromagnéticos, como cualquier sistema, tienden a estados de mínima energía:
- La orientación de los m_i hace menor la interacción energética entre ellos.
- Pero, por otro lado, un solo dominio tiene mucha energía magnética.



6 – Histéresis

- Al aplicar campo magnético en un material ferromagnético uno de los dominios resulta favorecido:

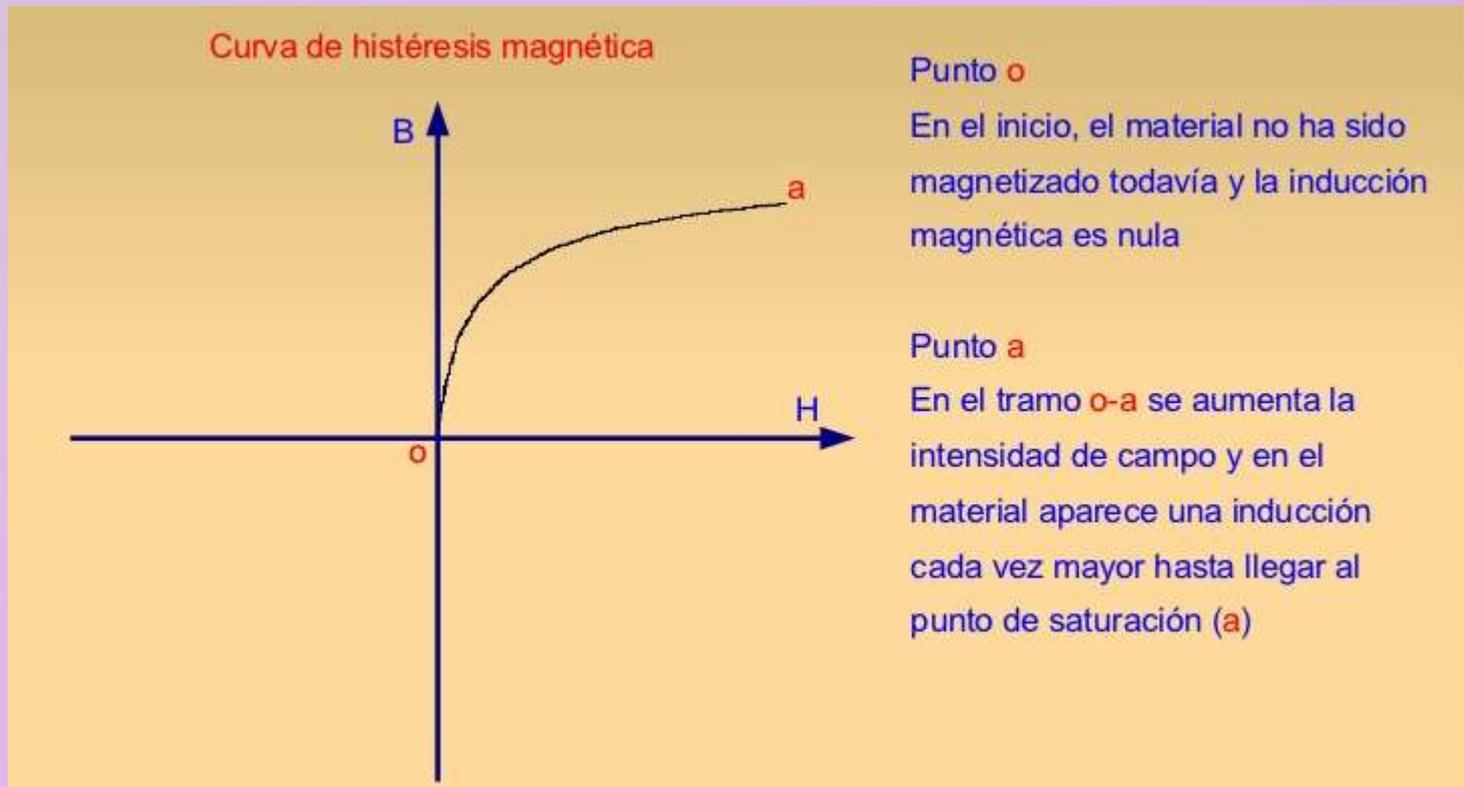


- Al suprimir el campo quedará un magnetismo remanente:



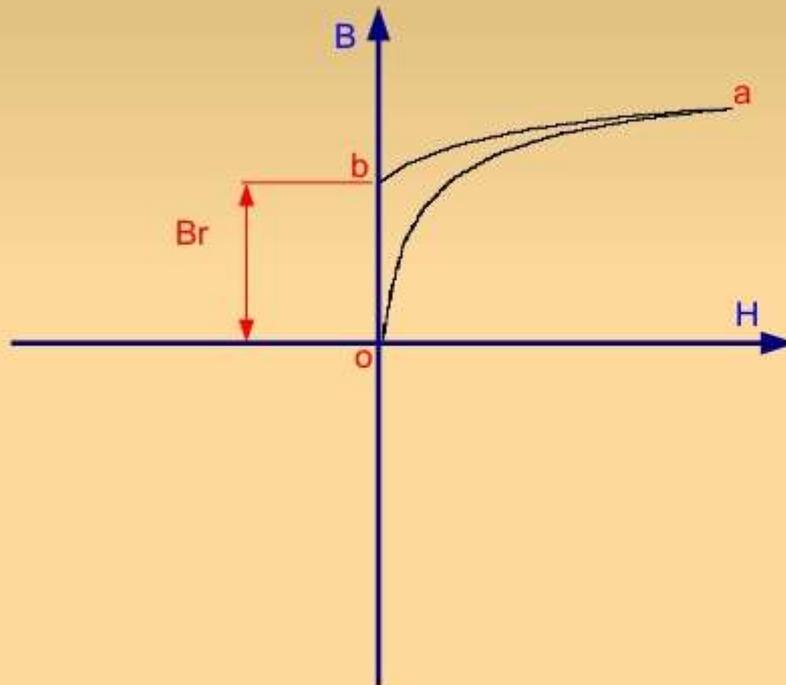
- Podemos representar esta evolución en el llamado **Ciclo de Histéresis**

6 – Histéresis



6 – Histéresis

Curva de histéresis magnética



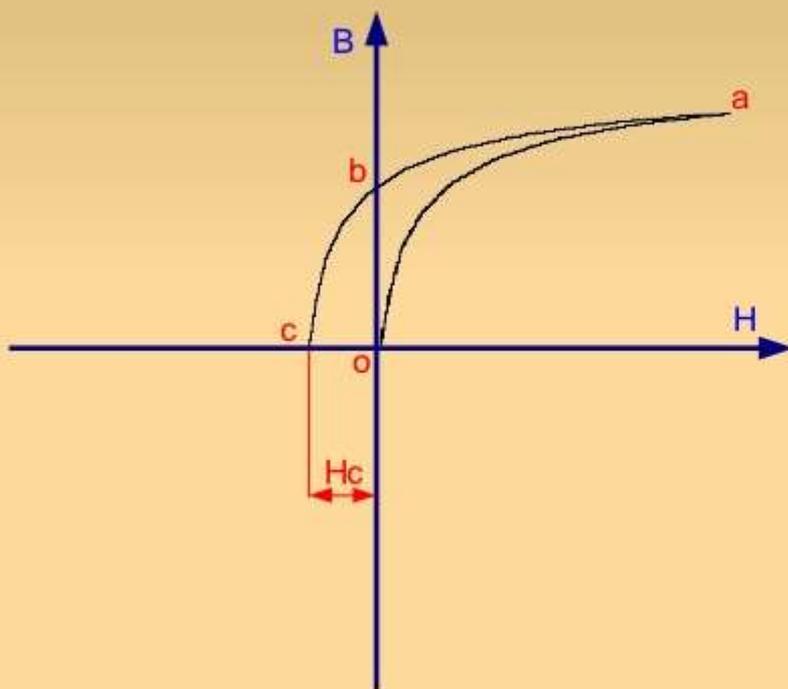
Punto b

En el tramo **a-b** se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce pero en una proporción menor que antes.

En el Punto **b** se ha anulado la intensidad de campo pero el material manifiesta todavía un cierto **magnetismo remanente (Br)**

6 – Histéresis

Curva de histéresis magnética

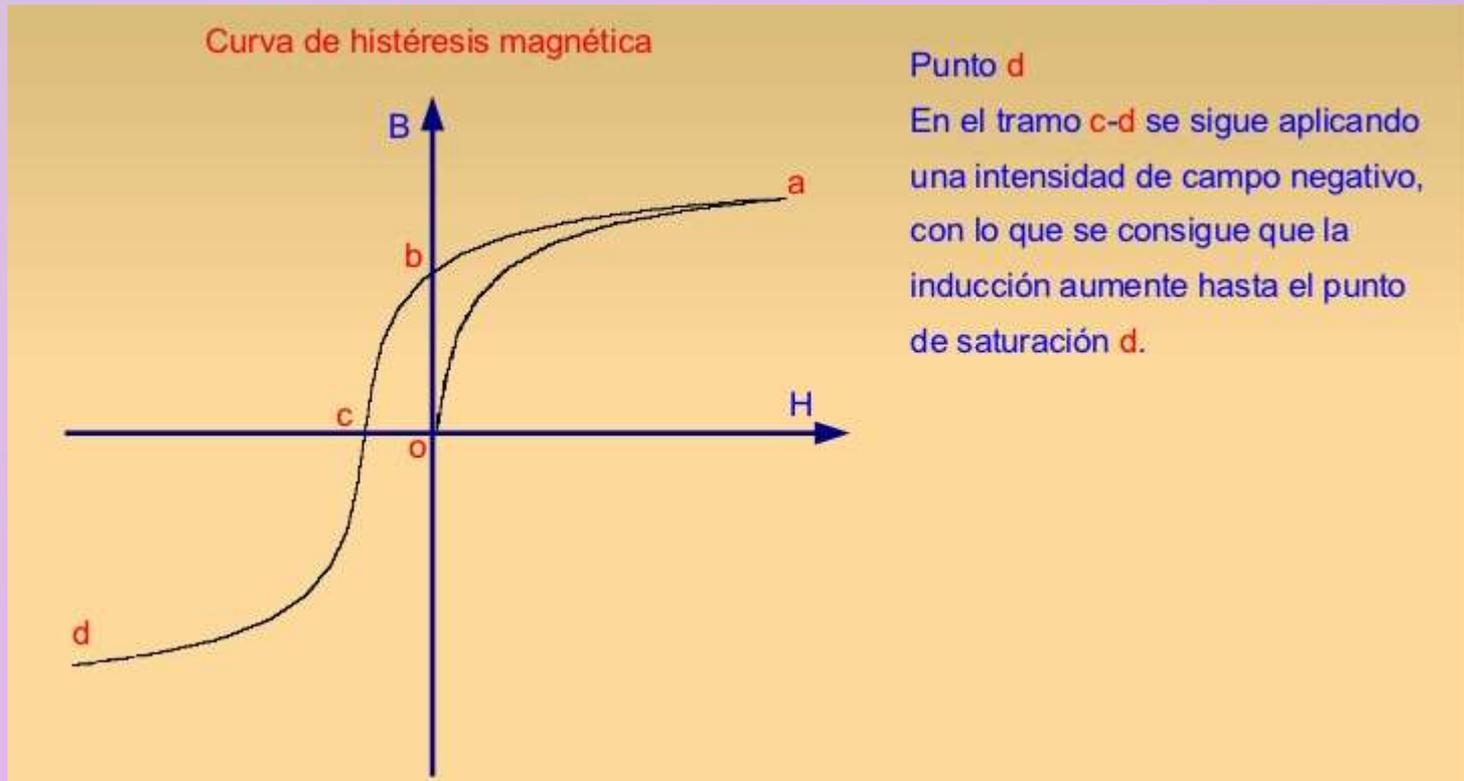


Punto c

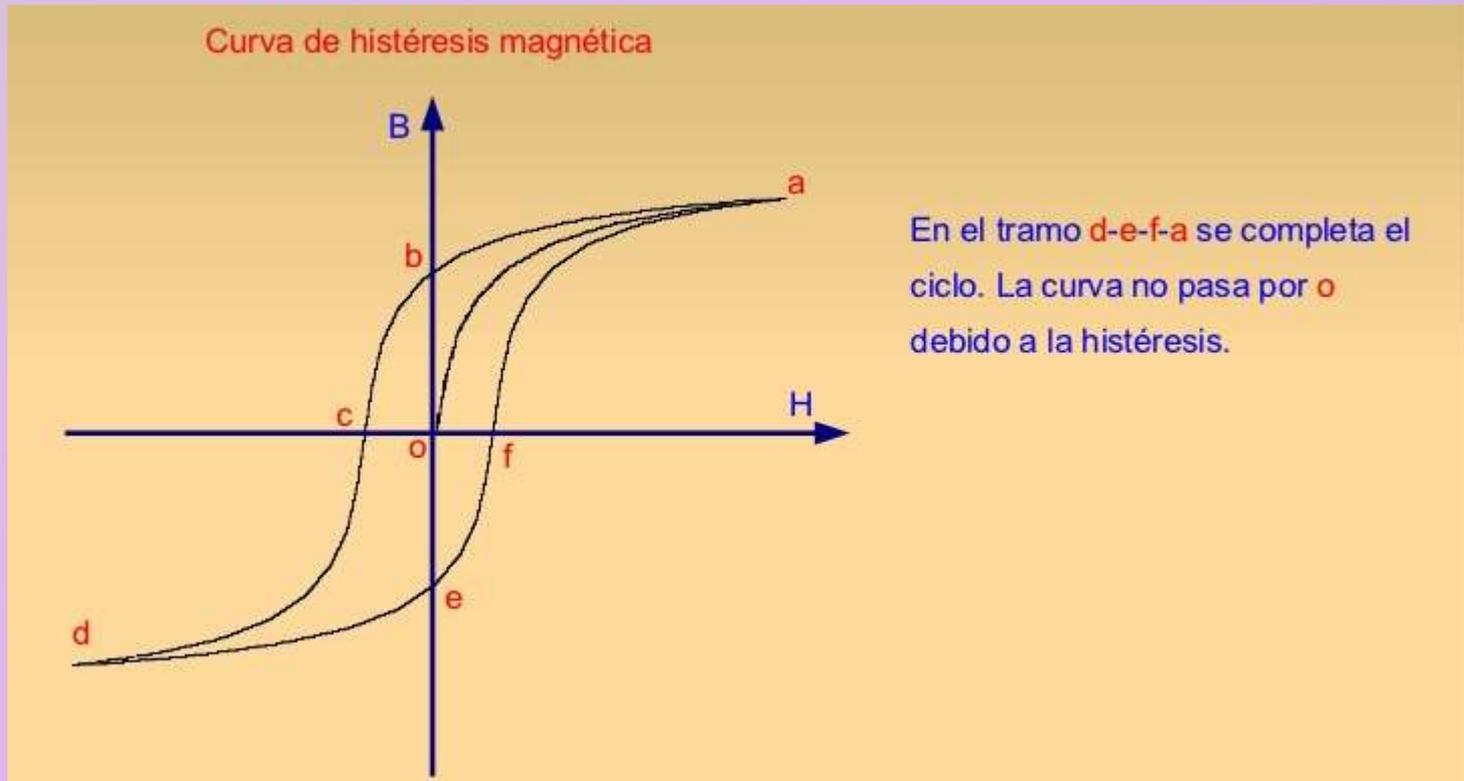
En el tramo $b-c$ se invierte el sentido del campo magnético (la corriente en la bobina circula en sentido contrario).

En el Punto c la inducción B es cero, se ha eliminado el **magnetismo remanente** y para ello ha sido necesario aplicar una intensidad H_c , llamada **campo coercitivo**.

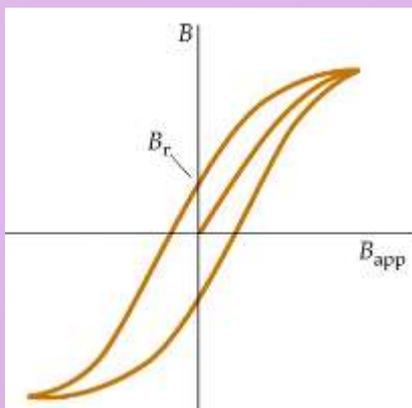
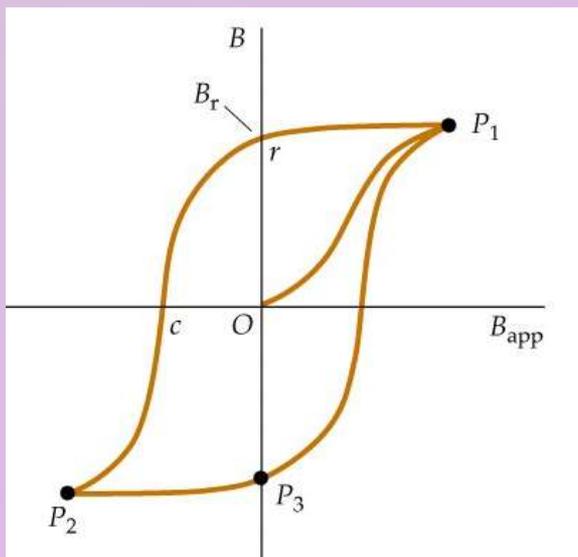
6 – Histéresis



6 – Histéresis



6 – Histéresis



- P_1 → Máxima imanación posible
 - B_r → Magnetismo remanente al suprimir B_{app}
 - OC → Campo coercitivo, necesario para suprimir la imanación remanente.
 - P_2, P_3 y OC' → Idem opuestos.
-
- El área encerrada representa la pérdida energética, disipada en forma de calor.