

TEMA 5: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

- Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz
- Inducción por movimiento. Generador de C. Alterna
- Autoinducción
- Energía del campo magnético
- Introducción al magnetismo en la materia



Michael Faraday 1791-1867

Magnetismo en la materia: Permeabilidad

VECTOR MAGNETIZACIÓN

- La magnetización **M** de un material es una magnitud vectorial definida como el momento dipolar magnético del material por unidad de volumen:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}$$

- Si el material está uniformemente imantado y **m** es el momento dipolar magnético por átomo o molécula y *n* el número de átomos por unidad de volumen, la magnetización es:

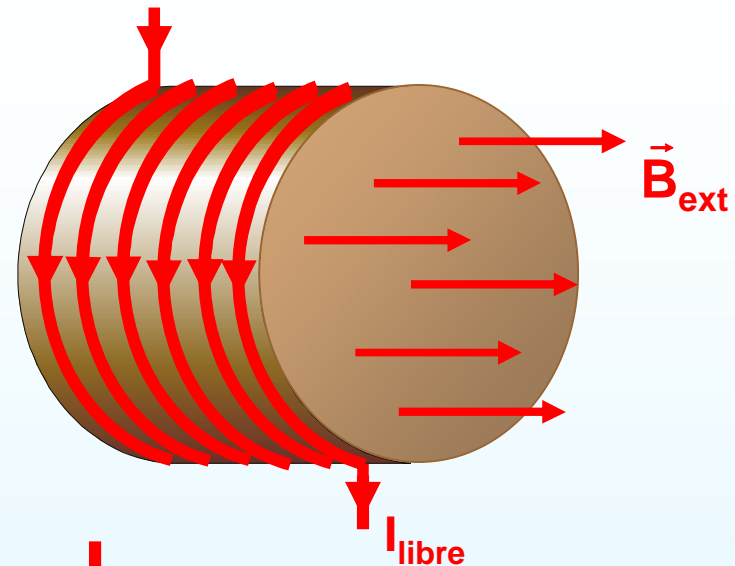
$$\vec{M} = n\vec{m}$$

- M** tiene dimensiones de corriente por unidad de longitud [A/m en S.I.]

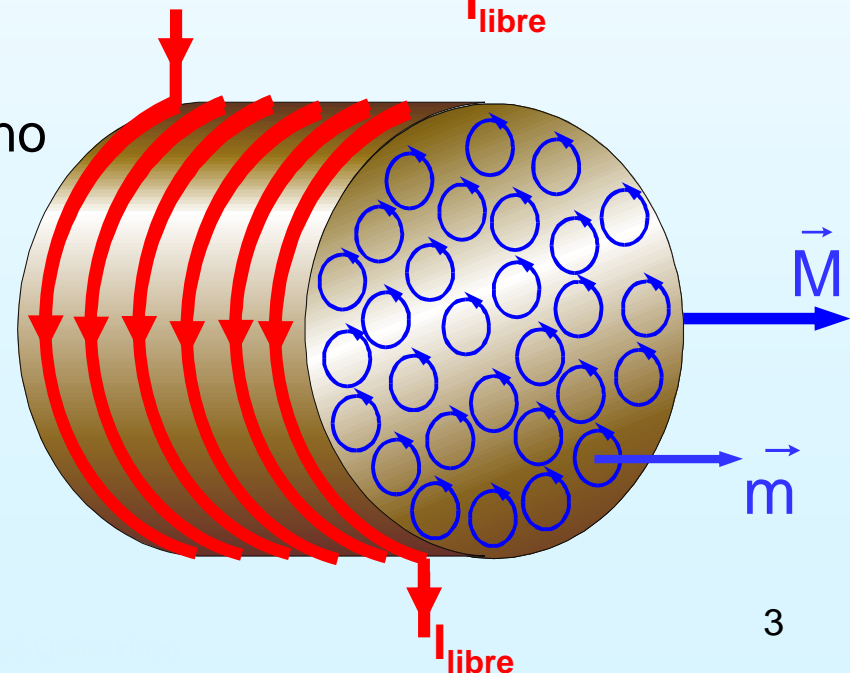
Magnetismo en la materia

MAGNETIZACIÓN DE UN MATERIAL

Introducimos un cierto material en el interior de una bobina. Al circular corriente I_{libre} por la bobina aplicamos un campo magnético sobre el material.



Al aplicar un campo magnético externo \vec{B}_{ext} , los dipolos magnéticos constituidos por los electrones se reorientan y el material queda magnetizado: $\vec{M} \neq \vec{0}$.



Magnetismo en la materia

El campo total dentro del solenoide será por tanto la suma del **campo externo aplicado** y del **campo debido a la magnetización** del material:

$$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_{mag}$$

Contribuciones debidas a las **corrientes libres** (electrones moviéndose en un conductor) y a las **corrientes ligadas** (debidas a la magnetización del material).

Introducimos una nueva magnitud: el vector campo magnetizante (o intensidad magnética) **H**, definido como:

$$\vec{B}_{ext} = \mu_0 \vec{H}$$

H sólo depende de las corrientes libres
[Amperio/metro]

H y **M** tienen las mismas dimensiones (Amperio/metro) por lo que:

$$\vec{B}_{mag} = \mu_0 \vec{M} \quad \longrightarrow \quad \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

Magnetismo en la materia

En general se tiene que el campo total en un material viene dado por:

$$\vec{B} = \mu \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

Donde μ es la permeabilidad y μ_r la permeabilidad relativa del material:

Si el medio material no tiene propiedades magnéticas, entonces el campo total es igual al aplicado:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = \vec{B}_{ext} \quad (\text{ya que } \mu_r = 1)$$

como $B = \mu_0 n I$ en el interior del solenoide, resulta que: $H = n I$

Susceptibilidad magnética: χ_m

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

Magnetismo en la materia

Clasificación de los materiales en función de sus características magnéticas:

DIAMAGNÉTICOS

PARAMAGNÉTICOS

FERROMAGNÉTICOS

ANTIFERROMAGNÉTICOS

FERRIMAGNÉTICOS

Magnetismo en la materia

MATERIALES DIAMAGNÉTICOS

- Sus átomos o moléculas presentan un momento dipolar individual igual a cero ($\vec{m} = 0$)
- Al aplicar B_{ext} , se induce un momento dipolar opuesto al sentido del campo externo, de forma que la sustancia presenta una pequeña magnetización

$$\vec{M} \propto -\vec{B}_{\text{ext}}$$

Al retirar B_{ext} desaparece M

En los materiales diamagnéticos $\mu < \mu_0$

MATERIALES PARAMAGNÉTICOS

- Sus átomos o moléculas tienen uno o más electrones desapareados, por lo que presentan un momento dipolar individual distinto de cero ($\vec{m} \neq 0$)
- No obstante, su orientación al azar determina que la magnetización del material en ausencia de un campo magnético sea nula.

Magnetismo en la materia

MATERIALES PARAMAGNÉTICOS

- Al aplicar B_{ext} , los dipolos magnéticos individuales se orientan en el sentido del campo externo para alcanzar la energía mínima
- Los vectores **M** y **B** están relacionados por la ley de Curie:

$$\vec{M} = C \frac{\vec{B}_{ext}}{\mu_0 T} \quad C : \text{constante de Curie}$$

válida mientras el material no se encuentre a baja temperatura T y B_{ext} no sea excesivamente intenso.

Al retirar B_{ext} desaparece M

En los materiales paramagnéticos $\mu > \mu_0$

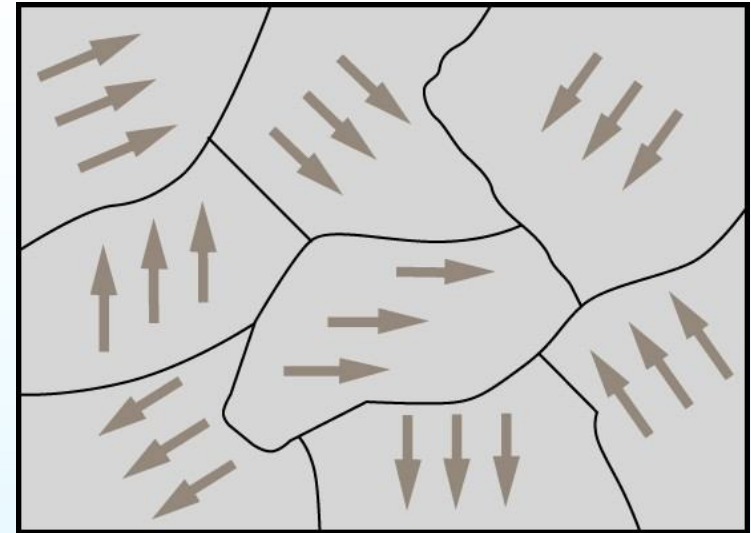
Magnetismo en la materia

MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

- Sus átomos o moléculas también presentan

$$\vec{m} \neq 0$$

pero no se orientan al azar, sino que se alinean en el mismo sentido por zonas (dominios magnéticos).



- Cuando los dominios magnéticos son orientados preferentemente en una dirección mediante la aplicación de un campo externo, la muestra adquiere una **intensa magnetización**.

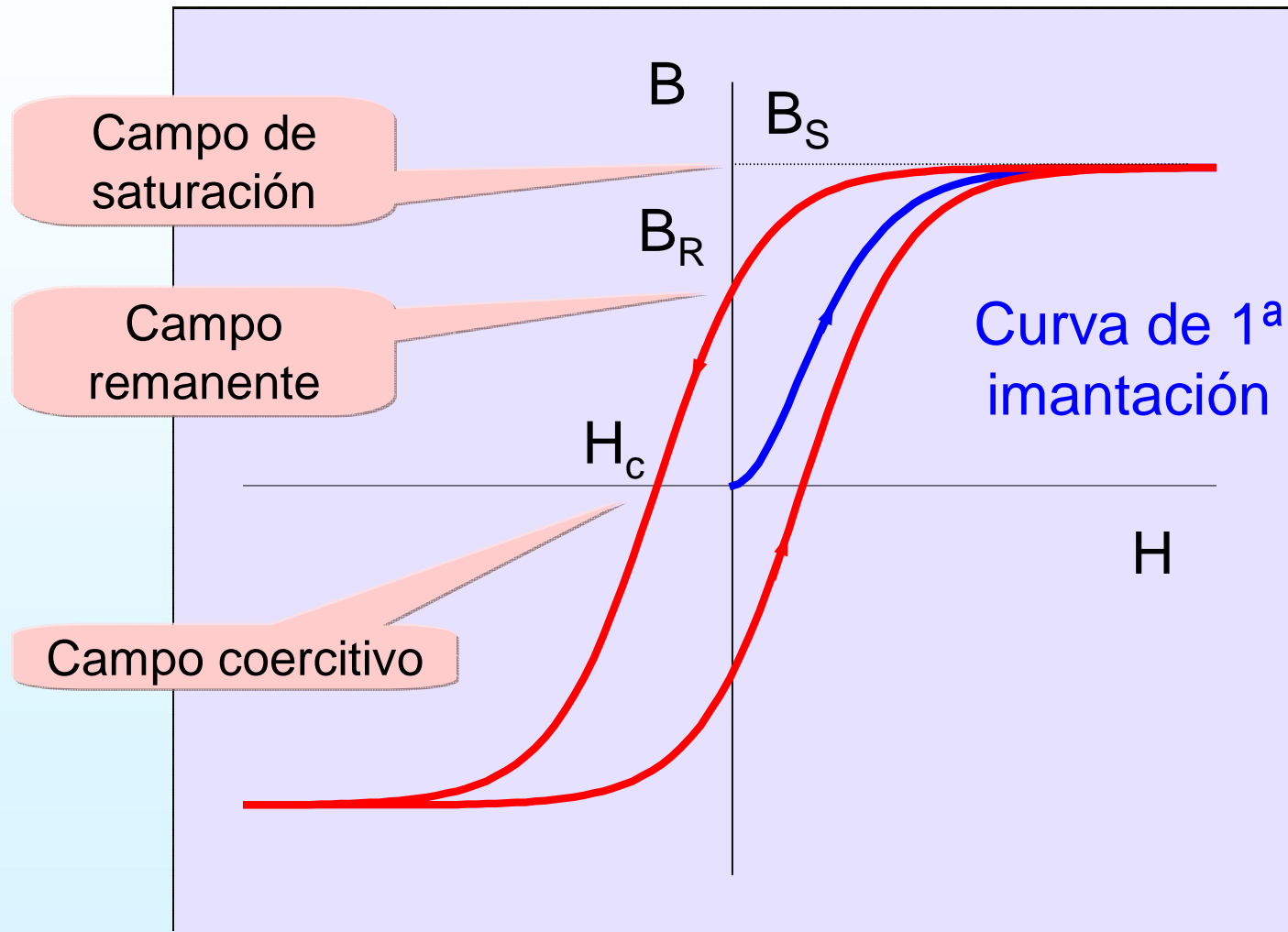
Magnetismo en la materia

MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

- En un material ferromagnético la magnetización no es proporcional al B_{ex} aplicado, no presentan un comportamiento lineal
- El valor del campo magnético en una sustancia ferromagnética en un momento determinado depende del tratamiento previo al que ha sido sometido, siendo gobernado por su **ciclo de histéresis** (curva de imanación cerrada), característica de cada sustancia
- En materiales ferromagnéticos duros, la magnetización persiste una vez retirado el campo magnético externo dando lugar a **imanes permanentes**
- Por encima de una cierta temperatura (T_c , **temperatura de Curie**), los ferromagnéticos se convierten en paramagnéticos.

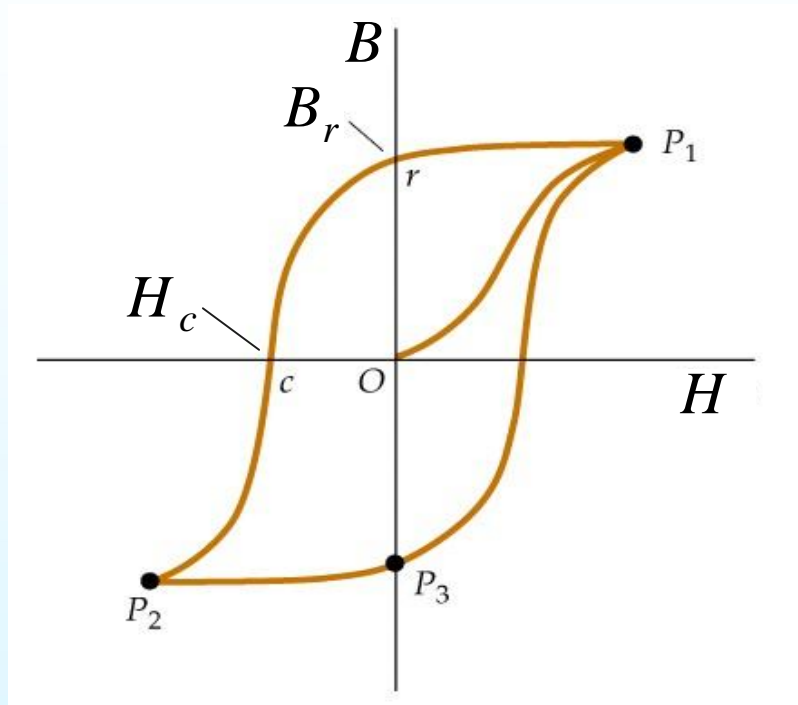
Magnetismo en la materia

CICLO DE HISTÉRESIS



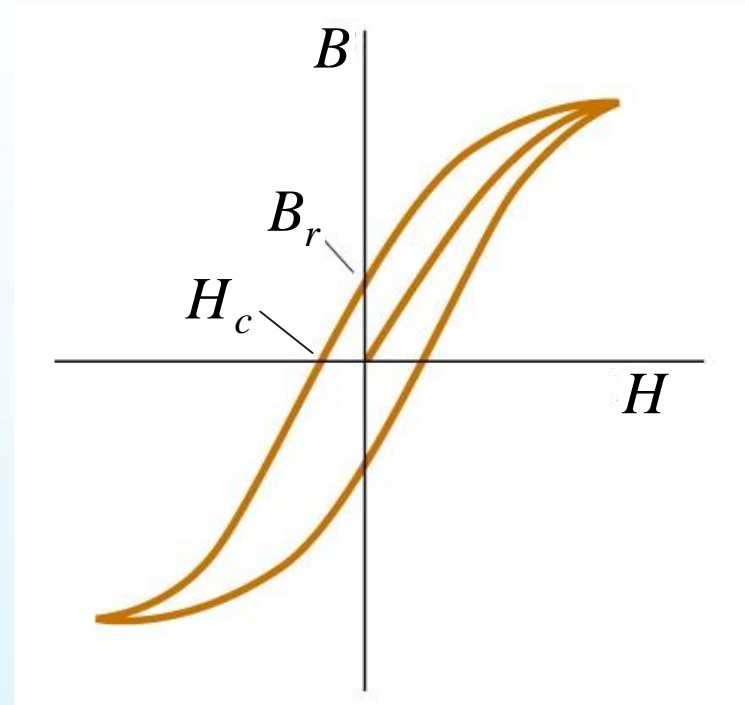
Magnetismo en la materia

CICLO DE HISTÉRESIS



Ferromagnético “duro” : $B_r \gg$

Aplicación: memoria magnética
imanes permanentes



Ferromagnético “blando” : $B_r \ll$

Aplicación: núcleo del transformador
(en realidad se usan ferrimagnéticos)

Magnetismo en la materia

MATERIALES ANTIFERROMAGNÉTICOS $\vec{m} \neq 0$

- Pero \vec{m} , todos ellos de la misma magnitud, se orientan en sentidos opuestos entre cada dos átomos o moléculas contiguas, de forma que su magnetización total es nula.

MATERIALES FERRIMAGNÉTICOS $\vec{m} \neq 0$

- Dentro de cada dominio, el momento dipolar magnético de moléculas contiguas es antiparalelo, pero es mayor en uno de los dos sentidos. Por tanto, la magnetización total es diferente de cero.
- Se conocen como **ferritas**, y son los únicos imanes naturales.
- Son aislantes eléctricos. Esto los hace interesantes para núcleo de transformadores, cabezales de lectura/escritura en discos magnéticos.

Magnetismo en la materia

Permeabilidad magnética relativa de diversos materiales

Sustancia	μ_r
Bismuto	0,99983
Mercurio	0,999968
Oro	0,999964
Plata	0,99998
Plomo	0,999983
Cobre	0,999991
Agua	0,999991

Diamagnéticos

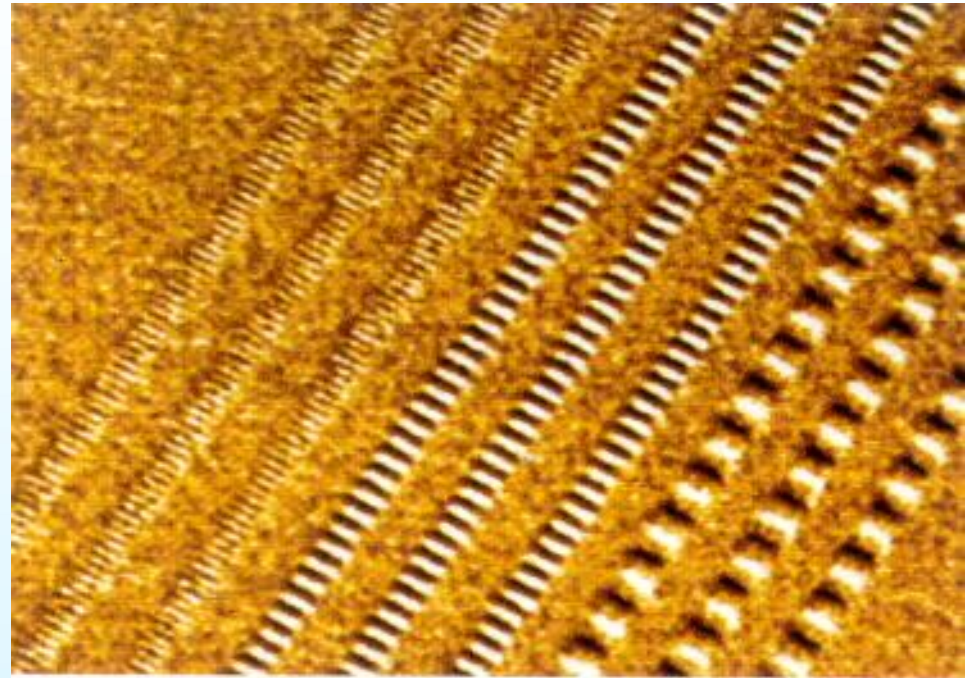
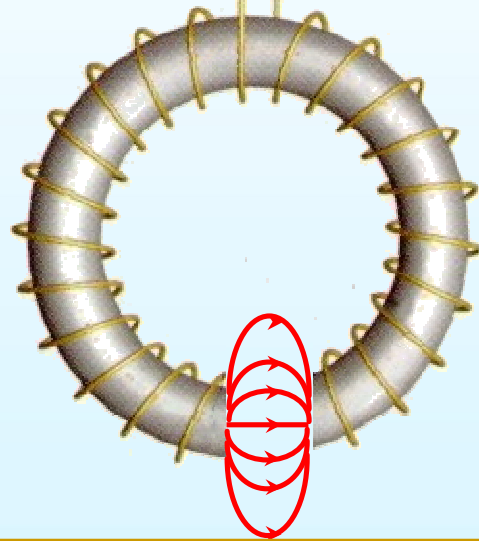
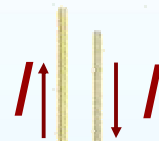
Sustancia	μ_r
Vacío	1
Aire	1,00000036
Aluminio	1,000021
Volframio	1,000068
Paladio	1,00082
Cobalto	250
Níquel	600
Hierro comercial	6000
Hierro alta pureza	$2 \cdot 10^5$
Supermalloy (79% Ni, 5 % Mo)	10^6

Paramagnéticos

Ferromagnéticos

- En materiales diamagnéticos y paramagnéticos χ_m es muy pequeño, por lo que para estos materiales $\mu_r \approx 1$.

Aplicaciones: grabación de información en soportes magnéticos



1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0

Lectura en soportes magnéticos por inducción

