

Electrotecnia 2º Bachillerato

Magnetismo en la materia

1. Vector inducción magnética en el vacío. B_0
2. Excitación magnética H .
3. Inducción magnética en la materia B
4. Imanación o magnetización M
5. Comportamiento de la materia frente a los campos magnéticos. Susceptibilidad, permeabilidad y permeabilidad relativa.
6. Teorema de Ampère en la materia
7. Magnetismo en la materia. Diamagnetismo. Paramagnetismo. Ferromagnetismo
8. Circuito magnético

1. Vector inducción magnética en el vacío. B_0

Las leyes que rigen el campo magnético creado por una corriente en un punto del espacio son las leyes de Biot y Savart y el Teorema de Ampère.

$$\vec{B}_0 = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

Ley de Biot y Savart

$$\oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum i_{abreza}$$

Teorema de Ampère

2. Excitación magnética H .

Se define el vector excitación magnética H al vector cociente entre el vector B_0 y la permeabilidad del vacío

$$H = B_0 / \mu_0$$

Observa que H depende de la intensidad de la corriente y de la geometría del conductor.

Excitación magnética

$$\vec{H} = \int_L \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i_{abreza}$$

3. Inducción magnética en la materia B

El campo magnético en un punto de un medio material viene dado por el vector inducción magnética B que supondremos como suma de la inducción magnética en el vacío B_0 más la inducción magnética debido al medio material B_M .

$$B = B_0 + B_M$$

4. Imanación o magnetización M

Se define imanación o magnetización de un material M al cociente entre la inducción magnética debido al medio material B_M y la permeabilidad del vacío. Utilizando los conceptos de excitación magnética e imanación podemos escribir

$$M = B_M / \mu_0$$

$$B = B_0 + B_M = \mu_0 H + \mu_0 M$$

5. Comportamiento de la materia frente a los campos magnéticos. Susceptibilidad, permeabilidad y permeabilidad relativa.

Las sustancias, atendiendo a su comportamiento frente a los campos magnéticos pueden clasificarse en:

Diamagnéticas: La presencia de estos materiales disminuye levemente el valor del campo magnético.

Paramagnéticas: La presencia de estos materiales aumenta levemente el valor del campo magnético.

Ferromagnéticas: La presencia de estos materiales aumenta considerablemente el valor del campo magnético.

Susceptibilidad magnética X

En el caso de las sustancias dia y paramagnéticas la imanación $\mathbf{M}$ es proporcional a la excitación magnética $\mathbf{H}$. Se denomina susceptibilidad magnética X a la relación entre $\mathbf{M}$ y $\mathbf{H}$. Atendiendo a lo anterior podemos escribir

$$\mathbf{M} = X \cdot \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \cdot X \cdot \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + X) \mathbf{H}$$

Permeabilidad magnética μ . Si hacemos $\mu = \mu_0 (1 + X)$ resulta

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$$

Permeabilidad relativa de un medio con relación al vacío μ_r .

Si efectuamos el cociente B/B_0 obtenemos $B/B_0 = \mu \cdot H / \mu_0 \cdot H = \mu / \mu_0 = \mu_r$

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

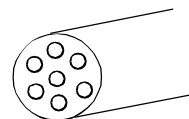
En la tabla siguiente figuran las características de los valores introducidos para distintos tipos de sustancias.

	Relación B/B_0	Permeabilidad μ	Permeabilidad relativa μ/μ_0	Susceptibilidad magnética X	Substancias
Diamagnéticas	$B/B_0 < 1$	$\mu < \mu_0$	$\mu_r < 1$	$X < 0$	N_2, H_2, Bi
Paramagnéticas	$B/B_0 > 1$	$\mu > \mu_0$	$\mu_r > 1$	$X > 0$	O_2, Cu
Ferromagnéticas	$B/B_0 \gg 1$	$\mu \gg \mu_0$	$\mu_r \gg 1$ de 20 a 40000	$X \gg 0$ No constante	Fe, Co, Ni y sus aleaciones

6. Teorema de Ampère en la materia

Ampère supuso que la materia debería estar constituida por corrientes eléctricas elementales que serían las responsables de los efectos magnéticos producidos por los medios materiales. Las denominó corrientes amperianas i_M .

Si imaginamos un cilindro en el seno de un $\mathbf{B}_0$ en la dirección del eje con corrientes elementales como las representadas resultaría una corriente neta por la superficie del mismo y nula en su interior.



$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \oint (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M) \cdot d\mathbf{l} = \oint \mathbf{B}_0 \cdot d\mathbf{l} + \oint \mathbf{B}_M \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot \sum i_{\text{abreza}} + \mu_0 \cdot \sum i_M = \mu_0 (\sum i_{\text{abreza}} + \sum i_M)$$

7. Magnetismo en la materia

Los movimientos de los electrones alrededor del núcleo son corrientes eléctricas elementales que poseen un momento magnético de valor $\mathbf{m} = i \cdot \mathbf{S}$ (espiras circulares cuyo radio es el de la órbita)

Asimismo existe un momento magnético de spin debido a la rotación del electrón alrededor de su eje.

El momento magnético de la sustancia será la suma de todos los momentos magnéticos y su relación con la magnetización o imanación $\mathbf{M}$ es: $\mathbf{M} = n \cdot \mathbf{m}$ siendo n el nº de espiras por unidad de volumen.

7a. Diamagnetismo

Todas las sustancias se comportan como diamagnéticas $B < B_0$ a causa de la interacción de un campo magnético externo B_0 con las corrientes elementales. Este fenómeno sólo lo percibimos en aquellas sustancias que no tienen un momento magnético neto por anularse todos ellos por estar todos sus electrones apareados. Si todos los momentos magnéticos se anulan entre sí la sustancia es diamagnética. Si un electrón de momento magnético $\mathbf{m}$ que gira alrededor del núcleo se le somete a un campo magnético $\mathbf{B}_0$ en la dirección de $\mathbf{S}$, siente una fuerza que le modifica su velocidad y por tanto su momento magnético. La modificación se opone al campo magnético $\mathbf{B}_0$ por lo que aumenta $\mathbf{m}$ en sentido contrario a $\mathbf{B}_0$.

Modelicemos la situación para ver que efectivamente es así.

- Considera dos cargas iguales moviéndose en trayectorias circulares de radio R y en sentido contrario debido a la fuerza eléctrica del núcleo.

La primera representaría un electrón moviéndose en sentido antihorario, lo que equivale a una carga positiva moviéndose en sentido horario. La otra sería moviéndose al revés.

El momento magnético $\mathbf{m}$ de cada una apunta en los sentidos indicados

Aplicamos el 2º principio de la dinámica a cada una y resulta

$$F_e = m \cdot v_0^2 / R = m \cdot \omega_0^2 \cdot R \quad (1)$$

Apliquemos un campo magnético $\mathbf{B}_0$ perpendicular al papel y hacia adentro. Ambas cargas se ven sometidas además de la fuerza eléctrica a una fuerza magnética tal y como se representa en el esquema siendo $F_m = q \cdot v_0 \cdot B$

Si aplicamos el 2º principio a la nueva situación y aceptamos que sólo cambia ω y no el radio R resulta para la primera de ellas:

$$F_e - F_m = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

$$F_e - q \cdot v_0 \cdot B = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad \text{y utilizando } F_e \text{ de (1) nos queda}$$

$$m \cdot \omega_0^2 \cdot R - q \cdot \omega_0 \cdot R \cdot B = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

Despejando, reordenando y aceptando que ω no cambia mucho

$$-q \cdot \omega_0 \cdot R \cdot B = m \cdot \omega^2 \cdot R - m \cdot \omega_0^2 \cdot R = m \cdot R (\omega + \omega_0) \cdot (\omega - \omega_0) = m \cdot R \cdot 2 \cdot \omega_0 \cdot \Delta\omega$$

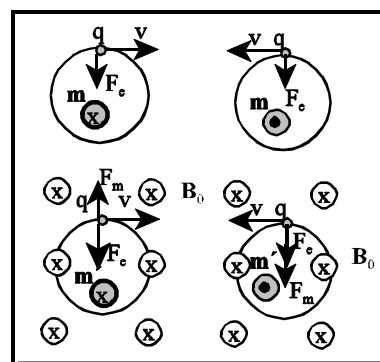
Despejando nos queda que la velocidad angular cambia según: lo cual nos indica:

- Que la velocidad angular de la carga disminuye, o sea que disminuye la intensidad de corriente lo que hace que el momento magnético $\mathbf{m} = i \cdot \mathbf{S}$ que tenía la dirección y sentido de $\mathbf{B}_0$ adquiere un valor $\mathbf{m}'$ menor del que tenía en ausencia de $\mathbf{B}$, $\mathbf{m}' < \mathbf{m}$ lo que nos lleva a que $\mathbf{B} < \mathbf{B}_0$.

Un análisis semejante con la carga que se movía en sentido contrario lleva a que $\Delta\omega > 0$ aumenta por tanto la intensidad i y por lo que $\mathbf{m}' > \mathbf{m}$. Como el momento magnético de la espira es de sentido contrario a $\mathbf{B}_0$ y aumenta, implica que $\mathbf{B} < \mathbf{B}_0$.

Por consiguiente $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M < \mathbf{B}_0$. Las sustancias diamagnéticas separan las líneas de $\mathbf{B}$

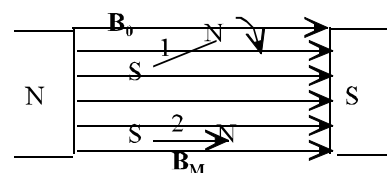
-El diamagnetismo es una propiedad de la materia independiente de la temperatura.



7b. Paramagnetismo

Lo presentan aquellas sustancias en las que no se anulan todos los momentos magnéticos (sustancias con electrones desapareados). También tienen comportamiento diamagnético pero se ve anulado por el mayor efecto del paramagnetismo.

Se produce por la orientación de los dipolos magnéticos en el seno de $\mathbf{B}_0$ que hace que $B > B_0$.



Observa en el diagrama que un imán (o espira) 1 en el campo $\mathbf{B}_0$ se orienta tal y como queda reflejado en 2.

Los campos magnéticos $\mathbf{B}_0$ y $\mathbf{B}_M$ tienen al misma dirección y sentido por lo que $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M > \mathbf{B}_0$

Las sustancias paramagnéticas juntan las líneas de $\mathbf{B}$.

El paramagnetismo disminuye exponencialmente con la temperatura debido a la agitación térmica.

7c. Ferromagnetismo

Dominios: Zonas del material en la que los momentos magnéticos se orientan ante una excitación externa.

Imanes temporales: Los dominios desaparecen rápidamente al desaparecer la excitación externa.

Imanes permanentes: Los dominios desaparecen más lentamente.

- El ferromagnetismo disminuye al aumentar la temperatura. Si $T > T_{\text{curie}}$ el material se hace paramagnético.

Saturación: A partir de un cierto valor de excitación externa el valor de B deja de aumentar por mucho que aumente aquella.

Histéresis magnética: Ciclo de histéresis $B = f(H)$.

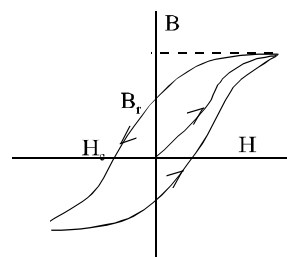
El esquema adjunto denominado ciclo de histéresis magnética representa la relación entre el campo magnético en un material ferromagnético y la excitación magnética.

Desde la situación inicial que vamos sometiendo al material a una excitación magnética H hasta un cierto valor para a continuación disminuir la misma. Al ir disminuyendo la excitación hasta eliminarla los valores de B no son los mismos que en la fase de aumento. Una vez desaparecida la excitación, cuando $H = 0$, queda un magnetismo remanente B_r .

Para eliminar el magnetismo remanente es necesario aplicar una excitación denominada crítica H_c de sentido contrario a la que produjo la imanación.

Cuanto mayor es el área del ciclo mayores son las pérdidas caloríficas aspecto que será de gran importancia en distintos instrumentos (Transformadores)

La permeabilidad magnética relativa de las sustancias ferromagnéticas no es constante y oscila entre unos 20 y 40000.



8. Circuito magnético

Se denomina circuito magnético al recorrido seguido por las líneas de inducción magnética B. Es de utilidad para estudiar la respuesta magnética de un circuito.

Considera un toroide de longitud media L y sección S que tiene un conductor con N espiras enrollado por el que pasa una corriente i.

El flujo magnético que atraviesa una sección del anillo de Rowland (toroide) es.

$$\Phi_m = B \cdot S = \mu (N \cdot i / L) S$$

Siendo las unidades

Φ_m Flujo magnético (weber) ; fmm

(ampère·vuelta); Reluctancia $R = L/\mu \cdot S$ (Ampère ·vuelta/weber)

Podemos establecer una semejanza entre la ley anterior y la ley de Ohm si relacionamos.

Intensidad de la corriente con Flujo magnético

Fuerza electromotriz con Fuerza magnetomotriz

Resistencia $R_{\text{hilo}} = L/\sigma \cdot S$ con Reluctancia $R = L/\mu \cdot S$

Esta ley nos permite resolver circuitos magnéticos de modo análogo a los eléctricos.

Así podremos resolver toroides con uno o más entrehierros, con materiales distintos...

(Reluctancias en serie o en paralelo

$$\text{Flujo magnético} = \text{Fuerza magnetomotriz} / \text{Reluctancia}$$

$$\Phi_m = N \cdot i / (L / \mu \cdot S)$$

$$\text{Intensidad} = \text{Fem} / \text{Resistencia}$$

$$i = E/R$$