

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Magnetismo

1. EVIDENCIAS EXPERIMENTALES - FUERZAS ENTRE IMANES

Conocida desde la antigüedad la existencia de la piedra imán (Fe_3O_4) Magnetita y sus propiedades fue Coulomb el primero en formular una ley para el magnetismo análoga a la del campo eléctrico.

$$F = K_m \frac{p p'}{r^2}$$

Donde p y p' son las cargas magnéticas del imán que están prácticamente concentradas en sus extremos, como se puede ver la situación es similar al campo eléctrico salvo por la diferencia de que los polos magnéticos son inseparables.

Se puede definir por tanto una Intensidad del Campo Magnético B (Inducción Magnética) que será:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{p'} = K_m \frac{p}{r^3} \vec{r}$$

Las unidades de B son la Tesla (T) que se define como la intensidad de un campo que produce una fuerza de un Newton sobre una carga de un culombio que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de un metro por segundo. (Esta definición se justificará mas adelante)

EXPERIENCIA DE OERSTED

Oersted observo que si situábamos una brújula en la proximidad de un conductor por el que puede circular corriente y paralela a él, al cerrar el circuito la aguja giraba 90° .

De ello dedujo que una corriente eléctrica origina un campo magnético perpendicular a la corriente

Esta experiencia fue trascendental y dio origen al estudio del electromagnetismo.

De forma inmediata se empezó a estudiar la relación entre las cargas eléctricas en movimiento y la producción de Campos magnéticos., en ello resultó de trascendental importancia la Ley de Biot y Savart y sus consecuencias que pasamos a desarrollar.

Tema: Campo Magnético

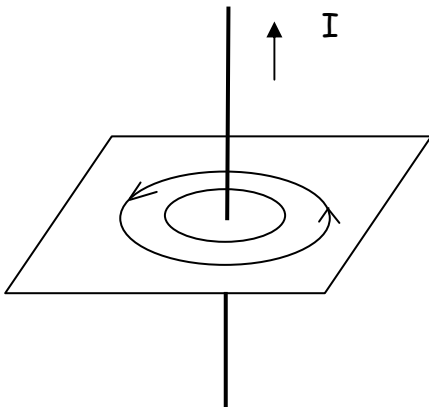
2.LEY DE BIOT Y SAVART - CAMPO CREADO POR UNA CORRIENTE RECTILINEA

Una corriente eléctrica I crea un campo magnético de valor:

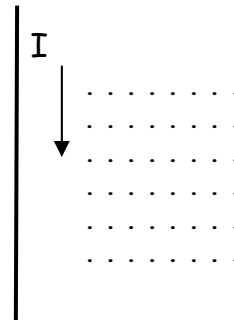
$$B = \mu \frac{I}{2\pi r}$$

μ Permeabilidad magnética del medio, para el caso del vacío

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

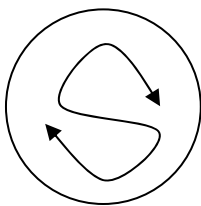


El sentido de las líneas de campo B vendrá dado por la regla de la mano derecha o regla del sacacorchos. El campo para representarlo en el plano de utilizan puntos si las líneas entran en el plano del papel y cruces si salen

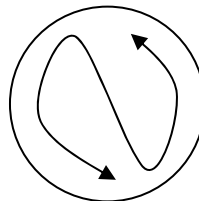


3. CAMPO CREADO POR UNA CORRIENTE CIRCULAR

Cuando la corriente circula por una espira el valor del campo magnético en el centro de la espira es:



$$B = \mu \frac{I}{2r}$$



El sentido de las líneas de campo vendrá dado por la regla del sacacorchos, si la corriente gira en el sentido de las agujas del reloj será un polo Sur, y Norte en sentido contrario.

Cuando la corriente circula un conjunto de espiras es decir un Solenoide el valor del campo magnético en el interior del solenoide es:

$$B = \mu \frac{N}{l} I$$

Tema: Campo Magnético

4. FUERZAS ENTRE CORRIENTES "Ley de Ampere"

Ampere estudio de forma experimental la acción entre dos elementos de corriente y obtuvo lo siguiente.

La fuerza de interacción entre dos elementos infinitesimales de corriente es:

- ✓ Directamente proporcional al producto de las intensidades $I_1 I_2$
- ✓ Directamente proporcional a su longitud $dl_1 dl_2$
- ✓ Inversamente proporcional al cuadrado de las distancias que las separan
- ✓ Directamente proporcional a una función del ángulo (cos) que forman las corrientes entre si.

5. ACCIÓN DE UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME SOBRE UNA CARGA MÓVIL "Fuerza de Lorentz"

Si consideramos una partícula de carga q que se mueve con velocidad \vec{v} en un campo magnético de intensidad \vec{B} la fuerza \vec{F} que actúa sobre la partícula será:

- ✓ Directamente proporcional al valor de la carga q
- ✓ Directamente proporcional al módulo de la velocidad v
- ✓ Directamente proporcional al módulo de la intensidad del campo magnético B
- ✓ Perpendicular a los vectores \vec{B} y \vec{v} , es decir tiene la dirección del producto vectorial ($\vec{v} \times \vec{B}$)
- ✓ Su sentido es el dado por el de avance de un sacacorchos que gira en el sentido que va de v a B por el camino mas corto si la carga es positiva y el opuesto si es negativa.

Por tanto la expresión de la Fuerza de Lorentz es: $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

Si además hay un campo eléctrico la expresión sería: $\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Por lo tanto para el cálculo del módulo será: $F = q v B \text{ sen } \alpha$ donde α es el ángulo que forman v y B

Si consideramos que v y B son perpendiculares se podría despejar B de la siguiente forma:

$$B = \frac{F}{|q| v} \quad \text{Expresión que se utilizó para definir la Tesla}$$

Para ver la dirección y sentido del vector F se puede utilizar la Regla de la Mano izquierda:
Dedo corazón - velocidad, dedo índice-Campo, dedo pulgar- Fuerza.

Esta Fuerza de Lorentz influirá en el movimiento de cargas en un campo magnético, vamos a estudiar varios casos:

$$\vec{F} = q \cdot \begin{vmatrix} i & j & k \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

Otra forma de ver la dirección de B es aplicar el cálculo mediante el determinante.

❖ Partícula perpendicular a la Intensidad de Campo B

Como F es perpendicular a \vec{v} se producirá un movimiento circular uniforme con una aceleración cuyo módulo

será: $a_c = \frac{v^2}{R}$, igualando la Fuerza de Lorentz a la Fuerza centrípeta quedará:

$$|q| v B = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \text{Simplificando se obtiene } \Rightarrow R = \frac{mv}{|q|B} \quad \text{expresión del radio del movimiento a partir del}$$

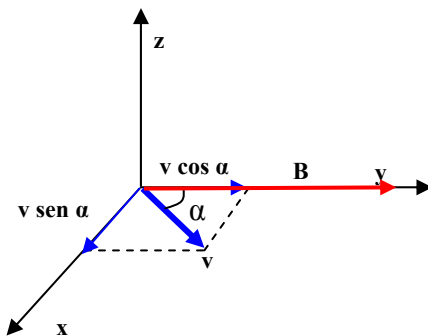
cual se pueden calcular la velocidad angular ω (también llamada frecuencia Ciclotrónica) y el periodo T

$$\omega = \frac{|q|}{m} B$$

$$T = \frac{2\pi m}{|q| B}$$

❖ Partícula cuya velocidad forma ángulo α con la Intensidad de Campo B

Como la fuerza solo actúa sobre la componente de la velocidad perpendicular al campo y no sobre la paralela dará lugar a un movimiento helicoidal, con un paso de hélice de valor $d = \frac{v \sin \alpha}{\omega} = \frac{v \sin \alpha}{\frac{|q|}{m} B} = \frac{v m \sin \alpha}{|q| B}$



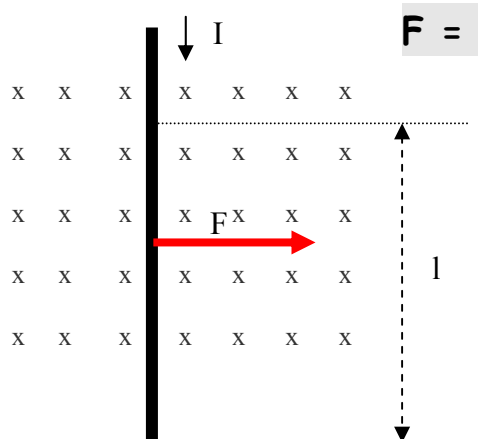
6. FUERZA EJERCIDA POR UN CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN CONDUCTOR

Si consideramos que una corriente es un flujo de cargas que se mueven con velocidad v y que por tanto:

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{y} \quad v = \frac{l}{t} \quad \Rightarrow \quad q \cdot v = I \cdot l$$

Según esto en este caso la expresión de la Fuerza será:

$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}$ y su módulo $F = I l B \sin \alpha$ que en el caso de B perpendicular a la corriente quedará:



$$F = I l B$$

El campo B está representado por flechas que entran perpendicularmente en el plano del papel.

Otra forma de ver la dirección de B es aplicar el cálculo mediante el determinante.

Si se aplica esto al caso de varios conductores paralelos se puede ver la acción entre dos corrientes:

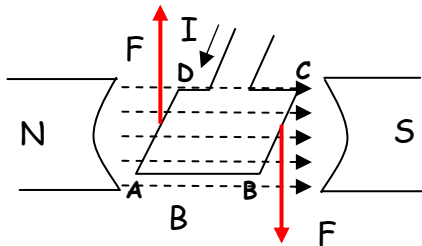
- En el caso de corrientes del mismo sentido los conductores se atraen.
- En el caso de sentidos contrarios los conductores se repelen.

$$f = \frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d}$$

Valor de la Fuerza por unidad de longitud entre dos conductores situados a una distancia d

Tema: Campo Magnético

7. ACCIÓN DE UN CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN CIRCUITO CERRADO



Según lo visto en el apartado anterior, sobre la espira que se encuentra en el interior del campo magnético B aparecerán fuerzas en cada uno de los cuatro lados cuyos valores serán:

Sobre AB y CD serán 0 por ser el $\sin \alpha = 0$

Sobre BC y AD será $F = BIl$ fuerzas iguales y de sentidos contrarios que dan lugar a un par de fuerzas de momento:

$$M = B I l \times l' = B I S$$

Donde S es la superficie de la espira.

Según va girando la espira $M = B I S \cos \phi$

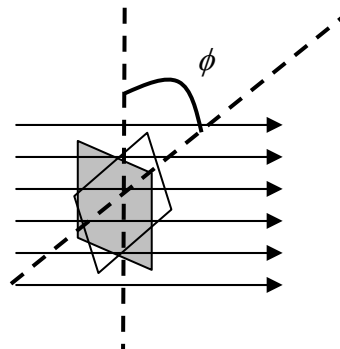
Si la corriente cambia de sentido cada media vuelta, seguirá girando continuamente (motor eléctrico)

8. FLUJO MAGNÉTICO

Se llama flujo magnético al número de líneas de campo que atraviesan una determinada superficie.

$$\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad \Phi = B \cdot S \cdot \cos \phi$$

donde ϕ es el ángulo entre la superficie perpendicular y la oblicua al campo



Unidades del Flujo \Rightarrow Weber = Tesla \cdot m²

9. LEY DE LENZ

Partiendo del experimento de Oersted se empezó a investigar sobre la posibilidad de producir corrientes eléctricas mediante campos Magnéticos, obteniéndose los siguientes resultados:

- Cuando se abre o cierra un circuito en presencia de otro cerrado y próximo se induce en el segundo una corriente eléctrica.
- La corriente inducida se incrementa si ambos circuitos están arrollados en forma de bobinas en torno a un mismo núcleo de hierro dulce.
- Si se hace girar un circuito cerrado en el campo magnético de un imán de forma que varíe el número de líneas de fuerza que cortan al circuito se induce en él una corriente eléctrica.

De todo lo anterior se pueden deducir varias cosas:

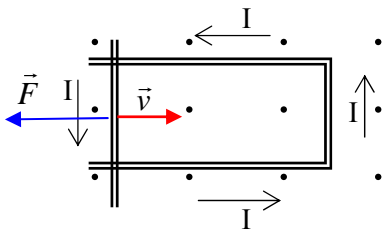
- ✓ La variación de flujo magnético a través de un circuito es la responsable de la aparición de la corriente inducida.
- ✓ La Intensidad de la corriente aumenta cuanto más rápidamente varíe el flujo.

Tema: Campo Magnético

Todo ello quedó resumido en la Ley de Lenz- Henri

La variación del flujo magnético que atraviesa un circuito crea una fuerza electromotriz inducida que es proporcional a la velocidad de variación del flujo y con un sentido que se opone a la causa que la produce.

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



La experiencia de Henry con la varilla deslizante sobre el marco metálico sobre un campo magnético perpendicular da lugar a la aparición de una corriente en el sentido indicado.

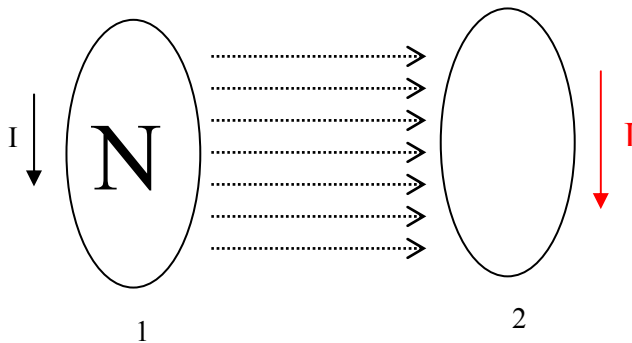
- Los electrones al mover la varilla se mueven según v, luego habrá una fuerza de Lorente que establecerá la corriente en el sentido indicado, esa corriente da lugar a la aparición de la Fuerza F que se opone al movimiento de la varilla.
- La Intensidad de la corriente inducida según la Ley de Ohm será:

- Como $F = I l B$ el trabajo será $W = F \cdot e = B I l \cdot e$

Es decir $W = B \cdot I \cdot S$ luego $\varepsilon = \frac{W}{q} = \frac{B \cdot I \cdot S}{I \cdot t} = \frac{\Phi}{t}$ por tanto

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = - \frac{\Delta\Phi}{R \Delta t}$$

Como se puede haber visto la Ley de Lenz no es más que otra variante del principio de acción y reacción, de forma que las corrientes siempre se generan de forma que tienden a compensar las variaciones de flujo que las originan.



La corriente de la espira 1 genera un campo como el indicado en la figura, si se aumenta su intensidad aparecerá una corriente en la espira 2 en sentido contrario para compensar el aumento de Flujo.

GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA

Un generador de corriente alterna consta de una bobina plana formada por N espiras que gira con una velocidad angular ω en el seno de un campo magnético uniforme B. La variación de flujo que se va produciendo con el giro induce una fuerza electromotriz ε en la bobina.

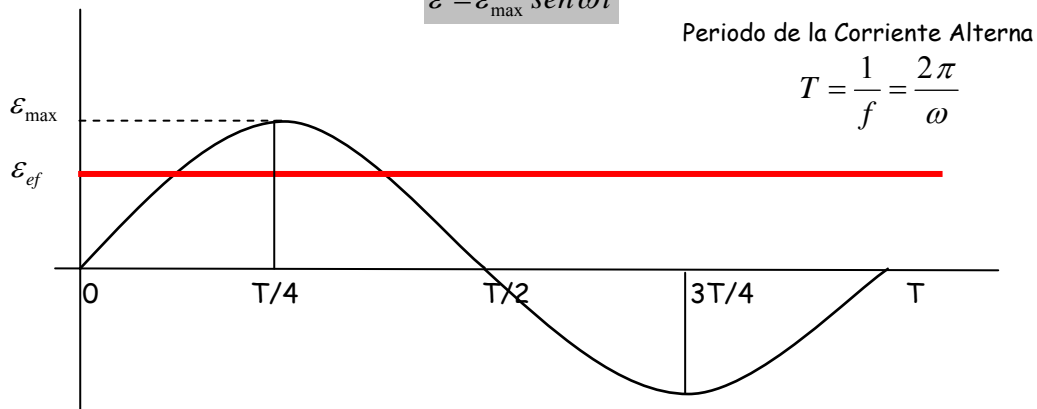
El Flujo en un instante dado vendrá dado por la expresión: $\Phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \omega t$ luego según la Ley de Lenz la fuerza electromotriz inducida será:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = - N B S (- \sin \omega t) \omega \Rightarrow \varepsilon = N B S \omega \sin \omega t$$

Tema: Campo Magnético

Luego considerando que $\epsilon_{\max} = N B S \omega$ la fuerza electromotriz inducida en un alternador tendrá la expresión:

$$\epsilon = \epsilon_{\max} \text{sen } \omega t$$



Tiempo	0	T/4	T/2	3T/4	T
Flujo Φ	Máximo	cero	Máximo	cero	máximo
F. Elec. Induc. ε	0	+	0	-	0

La fuerza electromotriz cambia de signo a partir de T/2 al invertirse la posición de la espira la corriente circula en la espira de forma que compense el aumento o la disminución de flujo.

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Fuerza electromotriz eficaz: el la fuerza electromotriz que tendría una corriente

continua que tuviese el mismo efecto Joule que la corriente alterna a través de la misma resistencia , análogamente se puede definir las diferentes magnitudes eléctricas V e I.

BOBINAS - AUTOINDUCCIÓN

Cuando una bobina se conecta a un circuito por el que circula corriente continua crea un campo magnético, como consecuencia se produce una variación del flujo magnético a través de la bobina que da lugar a una fuerza electromotriz inducida (**autoinducción**), que se opone al paso de la corriente.

Considerando el caso de un solenoide el campo creado sería:

$$B = \mu \frac{N}{l} I \quad \text{por lo tanto el Flujo será} \quad \Phi = N B S = \mu N^2 \frac{S}{l} I \quad \text{según esto}$$

El Flujo es proporcional a la intensidad de corriente I, el coeficiente de proporcionalidad se designa con la letra **L** y se denomina **Coefficiente de Autoinducción**:

$$L = \mu N^2 \frac{S}{l} \Rightarrow \Phi = LI$$

Teniendo en cuenta lo anterior y la Ley de Lenz la fuerza electromotriz autoinducida sería:

$$\epsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

La unidad de autoinducción es el Henrio (H) que es la autoinducción de un circuito que crea una fuerza electromotriz de un voltio cuando la intensidad que circula varía en un amperio por segundo.