

Tema 04: Inducción electromagnética.



0401. Inducción de la corriente eléctrica.

En el tema anterior hemos visto:

1. Cómo las corrientes eléctricas crean campos magnéticos.
2. Cómo los campos magnéticos afectan a las corrientes eléctricas.

En esta parte completaremos la visión anterior estudiando cómo pueden obtenerse corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos.

El fenómeno de la inducción electromagnética es de capital importancia en la sociedad actual. La inmensa mayoría de la electricidad que usamos en nuestras casas y en nuestras fábricas se produce por inducción electromagnética.

A) EXPERIENCIAS DE FARADAY Y HENRY

Faraday en Inglaterra y Henry en USA realizaron independientemente una serie de investigaciones para conocer si es posible obtener corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos.

Faraday realizó varias experiencias que pusieron de manifiesto la conexión entre la electricidad y el magnetismo. Dos de ellas son las más importantes.

PRIMERA EXPERIENCIA DE FARADAY: Movimiento de un imán en el interior de una bobina. En ella se conectaron los extremos de una bobina a un galvanómetro y se introduce y se extrae un imán de la bobina. Se observa que:

- Al mover el imán se produce una corriente que sólo dura mientras se mantiene el movimiento.
- El sentido de la corriente depende de si el imán se acerca o aleja de la bobina.
- La mera presencia del imán no produce corriente eléctrica.
- Se producen idénticos resultados si el imán se mantiene fijo y se mueve la bobina.
- También se produce el mismo fenómeno si sustituimos el imán por otro circuito por el que circula una corriente.

SEGUNDA EXPERIENCIA DE FARADAY: Cierre y apertura de un circuito eléctrico. En ella se sitúan cerca una bobina conectada a un galvanómetro y un circuito provisto de generador e interruptor. Se observa que:

- Al cerrar el interruptor se produce una brevísima corriente eléctrica en la bobina de sentido contrario a la que circula por el circuito.
- Al abrir el interruptor se produce una brevísima corriente eléctrica en la bobina en sentido opuesto a la del caso anterior.

EXPERIENCIA DE HENRY: Henry observó que si un conductor se mueve perpendicularmente a un campo magnético, aparece una diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

El origen de la fuerza electromotriz inducida se explica de la siguiente manera: supongamos un conductor vertical que se encuentra en un campo magnético uniforme, perpendicular al plano del papel y entrando hacia él. Si se desplaza el conductor hacia la derecha con una velocidad v , los electrones libres del metal quedan sometidos a una fuerza, $F = q \cdot v \cdot B$ que los desplaza hacia abajo (regla de la mano izquierda).

Se origina así un exceso de carga negativa en el extremo inferior y de carga positiva en el superior y, por tanto, se establece una diferencia de potencial entre ambos extremos, $V_m - V_n$, de sentido hacia arriba. Si el conductor forma un circuito cerrado con otros conductores, la corriente inducida establecida circula hacia arriba por su interior, como corresponde al sentido convencional adoptado para una pila.

A las corrientes que se generan en las condiciones anteriores se les llama corrientes inducidas y al conjunto de fenómenos que hemos visto, fenómenos de inducción.

B) FLUJO MAGNÉTICO

El flujo magnético se define de forma similar al caso eléctrico, es decir:

$$\Phi_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Siendo α el ángulo formado por el vector campo y el vector superficie. La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional se denomina weber (Wb) y equivale a $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$. En ocasiones se usa como unidad de campo magnético el Wb/m^2 equivalente al tesla.

El significado físico del flujo magnético es el número de líneas de campo que atraviesan una superficie. Es cero cuando los vectores B y S son perpendiculares y máximo cuando son paralelos. Si los vectores están expresados en componentes puede calcularse como:

$$\Phi = B_x S_x + B_y S_y + B_z S_z$$

Una característica importante del campo magnético y que lo diferencia de los campos eléctrico y gravitatorio es que su flujo a través de una superficie cerrada es siempre cero:

$$\Phi_m = 0 \quad \Phi_e = \frac{q}{\epsilon} \quad (\text{Teorema de Gauss})$$

Ello se debe a que no existen polos magnéticos aislados y por tanto las líneas del campo magnético son siempre cerradas (todas las líneas que salen vuelven a entrar y las que entran vuelven a salir).

C) LEY DE FARADAY-HENRY

El hecho común a todas las experiencias en que aparecen corrientes inducidas es que existe una variación del flujo magnético con el tiempo, a través del circuito en el que aparecen dichas corrientes. Puede enunciarse cualitativamente la ley de Faraday-Henry diciendo que: "Siempre que el flujo magnético a través de un circuito varíe con el tiempo, aparecerán en él corrientes inducidas."

Para caracterizar la corriente inducida con una magnitud física parece lógico emplear la intensidad. Sin embargo ésta depende de la resistencia del conductor y es más conveniente emplear la fuerza electromotriz (\mathcal{E}). Teniendo esto en cuenta podemos expresar la ley de Faraday-Henry mediante la siguiente ecuación:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_m / dt$$

D) LEY DE LENZ

"El sentido de la corriente inducida es tal, que se opone a la causa que la produce."

Si acercamos el polo norte de un imán a una espira el flujo magnético a través de ella aumenta; para oponerse a este aumento la espira genera una corriente eléctrica que crea un campo magnético opuesto al del imán (la espira se comporta como un polo norte).

Esta ley tiene que ver con la conservación de la energía. Si la corriente inducida tuviera sentido opuesto, el imán y la espira se atraerían produciéndose más corriente. Se realizaría un trabajo sobre el imán y se produciría corriente eléctrica. Las cosas ocurren de modo que, para acercar el imán a la espira, tenemos que realizar un trabajo externo. Este trabajo es el que se convierte en energía eléctrica. Cuanto mayor sea el trabajo que realicemos, mayor será la energía eléctrica producida en forma de corriente.

0402. Producción de corrientes alternas.

La importancia de la inducción electromagnética reside en que puede transformar energía mecánica en energía eléctrica. Pueden obtenerse corrientes alternas mediante una bobina que gira en el seno de un campo magnético:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_m / dt = - d(B \cdot S) / dt = - d(B \cdot S \cdot \cos \alpha) / dt = - B \cdot S \cdot d(\cos \alpha) / dt$$

Si la bobina gira con una velocidad angular ω constante e inicialmente los vectores B y S están orientados en el mismo sentido ($\alpha_0 = 0$), el ángulo que formarán ambos vectores, transcurrido cierto tiempo, será $\alpha = \omega \cdot t$.

$$\mathcal{E} = - B \cdot S \cdot d(\cos \omega t) / dt = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

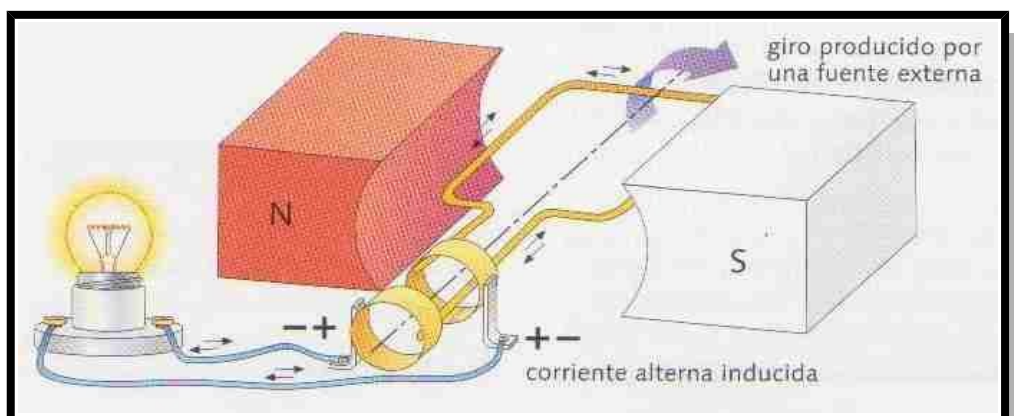
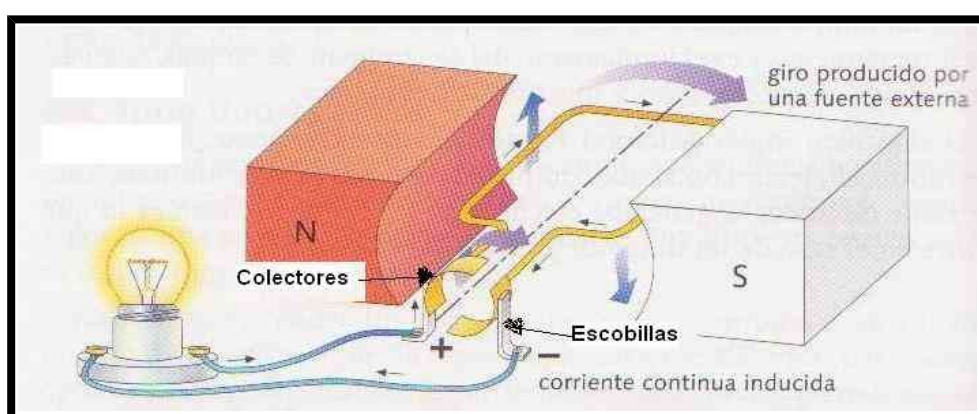
Que puede escribirse en la forma:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot \sin \omega t$$

donde $\mathcal{E}_0 = B \cdot S \cdot \omega$

Esta fuerza electromotriz presenta las siguientes características:

- El valor de la fem varía con el tiempo, el valor de \mathcal{E} en cualquier instante recibe el nombre de fem instantánea.
- El valor de la fem varía periódicamente, el periodo es $T = 2\pi/\omega$.
- El valor máximo de la fem es $\mathcal{E}_0 = B \cdot S \cdot \omega$.
- El signo de la fem cambia dos veces a lo largo de un periodo. El sentido de la corriente cambia 2·f veces por segundo.
- El mecanismo descrito es el fundamento de un alternador; un generador de corriente alterna que transforma la energía mecánica necesaria para girar la bobina en energía eléctrica.

**Alternador****Dinamo**

0403. Autoinducción e inducción mutua.

AUTOINDUCCIÓN

El fenómeno de la inducción también puede detectarse utilizando un único circuito. Si por alguna causa varía la intensidad de la corriente, el campo magnético también lo hará, ello modifica el flujo magnético y produce una corriente autoinducida. El fenómeno se llama autoinducción.

Supongamos un circuito con un interruptor. En el instante en que se cierra el interruptor el valor de la intensidad varía desde cero hasta un valor dado por la ley de Ohm:

$$I = \varepsilon / R$$

Mientras la intensidad aumenta, el campo magnético varía y se autoinduce una corriente de sentido opuesto a I (contracorriente). Ello implica que se tarda cierto tiempo hasta que la corriente se estabiliza en el valor previsto por la ley de Ohm. Cuando el interruptor se abre la corriente se interrumpe bruscamente. La variación de intensidad se traduce en la aparición de una corriente autoinducida que se opone a dicho cambio (extracorriente). Sin embargo la corriente no puede circular al estar el circuito abierto y se origina una ddp entre los extremos del conductor. En muchos casos se manifiesta como una chispa.

INDUCTANCIA O COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN

El campo magnético creado por una corriente es proporcional a la intensidad y por tanto el flujo magnético también:

$$\Phi_m = L \cdot I$$

L es el coeficiente de proporcionalidad y se llama inductancia, coeficiente de autoinducción o simplemente autoinducción. La unidad del Sistema Internacional se llama **Henrio (H)**. Todo circuito posee cierta autoinducción que depende de sus características geométricas. Se representa por:

$$\text{La f.e.m inducida es: } \varepsilon = -d\Phi_m/dt = -d(L \cdot I)/dt = -L dI/dt$$

En el caso de una bobina de N espiras y longitud l :

$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I / l$$

El flujo que atraviesa una espira será:

$$\Phi_m = B \cdot S = \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot S / l$$

Y a través de todas las espiras:

$$\Phi_m = \mu_0 \cdot N^2 \cdot I \cdot S / l$$

de donde

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot S / l$$

INDUCCIÓN MUTUA

Si tenemos dos circuitos muy próximos se afectan mutuamente, de tal forma que si por el primer circuito circula una corriente I_1 , el campo magnético creado por esta corriente origina un flujo magnético Φ_2 a través del segundo circuito.

El flujo magnético Φ_2 es proporcional a la intensidad que circula por el primer circuito I_1 :

$$\Phi_2 = M_{12} \cdot I_1$$

De igual manera, si por el segundo circuito circula una corriente I_2 , genera un flujo magnético Φ_1 a través del primer circuito:

$$\Phi_1 = M_{21} \cdot I_2$$

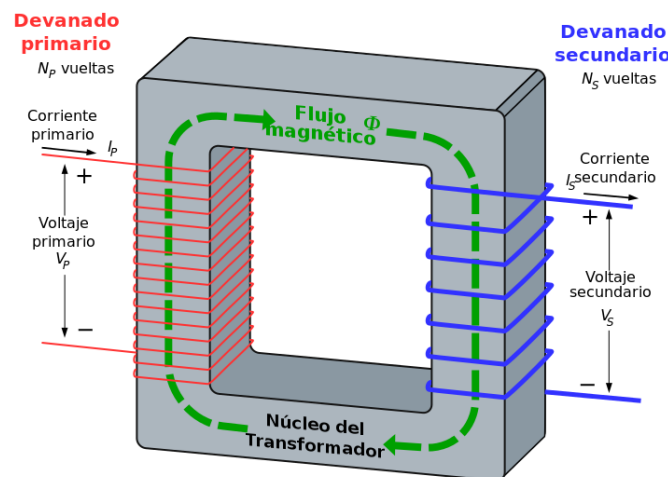
Se puede demostrar que M_{21} y M_{12} son iguales. Son una constante que recibe el nombre de coeficiente de inducción mutua o inductancia mutua. Depende de las características físicas de los circuitos y de su posición y orientación relativas.

La aplicación más importante de la inducción mutua son los transformadores. Son dispositivos capaces de variar la tensión y la intensidad de una corriente eléctrica casi sin pérdidas de energía.

Un transformador está formado por dos bobinas enrolladas alrededor de un núcleo común de hierro dulce. Por una de ellas (circuito primario) se hace circular una corriente alterna de entrada, que produce un flujo magnético variable y, por tanto, una fuerza electromotriz inducida en la otra bobina (circuito secundario).

En los transformadores se cumple la relación:

$$V_2 / V_1 = I_1 / I_2 = N_2 / N_1$$



0404. Síntesis electromagnética. Ecuaciones de Maxwell.

Según hemos visto existe una relación entre electricidad y magnetismo.

Una carga eléctrica en movimiento crea tanto un campo eléctrico como uno magnético. Si la carga q se mueve en el vacío (constantes ϵ_0 y μ_0) con velocidad \mathbf{v} , crea dos campos dados por:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{u}_r \quad \text{y} \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \mathbf{v}}{r^2} (\vec{u}_t \times \vec{u}_r)$$

Sustituyendo la expresión de E en B , resulta:

$$\vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \vec{v} \times \vec{E}$$

Que puede expresarse como: $\vec{B} = \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}$, siendo $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

La constante c coincide con la velocidad de la luz en el vacío.

Los campos eléctricos y magnéticos son dos aspectos diferentes de una misma característica fundamental de la materia: la carga eléctrica. Por ello suele hablarse de campo electromagnético.

Todos los fenómenos electromagnéticos pueden sintetizarse en cuatro ecuaciones que fueron propuestas por Maxwell, de modo que a partir de ellas pueden deducirse todas las ecuaciones eléctricas y magnéticas.

Las Ecuaciones de Maxwell son:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon}$$

"Si en un campo eléctrico consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo eléctrico total que la atraviesa es igual a la carga eléctrica total existente en su interior dividido por la permitividad del medio."

Esta ley permite deducir la Ley de Coulomb y es la base de la electrostática.

- Ley de Gauss para el campo magnético.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

"Si en un campo magnético consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo magnético que la atraviesa es siempre igual a cero."

Como consecuencia de esta ley las líneas de campo magnético son cerradas y no existen polos magnéticos aislados.

- Ley de Faraday-Henry.

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

"Toda variación del flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado produce en él una corriente eléctrica inducida."

Dicho de otra forma, los campos magnéticos variables producen a su alrededor campos eléctricos.

- Ley de Ampère-Maxwell.

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

"Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y también por campos eléctricos variables."