

Electrotecnia 2º Bachillerato

Inducción electromagnética

Fenomenología

Ley de Farady-Lenz

Cálculo de la fem inducida en un circuito

Aplicaciones: Generador de corriente alterna (alternador). Micrófonos

Autoinducciones o bobinas. Coeficiente de autoinducción

Inducción mutua. Coeficiente

Aplicación al transformador. Corrientes de Foucault

**Fenomenología.** Estudio de los fenómenos que producen corriente por inducción.

Material: Bobinas, Imanes, Galvanómetros, Núcleos de Fe, Hilos conductores

a- Imán + Bobina

Mover un imán acercando y alejando los polos N y S a una bobina conectada a un galvanómetro.

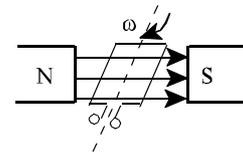
Mover un núcleo de Fe entre el imán y la bobina .

b-Dos bobinas

Conectar una bobina a una fuente de corriente continua y moverla en las proximidades de la bobina anterior.

Variar mediante un reostato la I que circula por la bobina.

Realizar las experiencias con y sin núcleo de Fe entre las bobinas.



Ley de Farady-Lenz

*Ley de Faraday* : Siempre que varía el flujo magnético que atraviesa un conductor aparece en éste una fuerza electromotriz fem inducida

$$\varepsilon = -d \Phi_m / dt$$

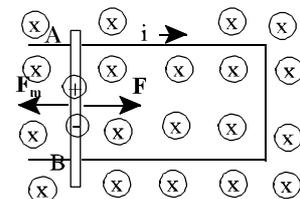
*Ley de Lenz* : La corriente inducida tiene un sentido tal que siempre se opone a la variación del flujo magnético lo que por otra parte es necesario para que se cumpla el principio de conservación de la energía.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_m}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Cálculo de la fem inducida en un circuito.

Considera el circuito representado formado por una barra conductora AB de longitud L que vamos a mover con velocidad constante en contacto con unos conductores el seno de un campo de inducción magnética **B** constante perpendicular al papel. La barra cierra el circuito.

Las cargas + y - de la barra se ven sometidas a una fuerza hacia arriba y hacia abajo respectivamente por estar moviéndose la barra en el seno de un campo magnético lo cual implica una separación de cargas , una fem o una corriente i si el circuito como en el caso representado está cerrado.



Si por la barra circula una corriente i y se mueve con v = cte está sometida a una  $F_m$  que resulta  $F = F_m$  por el segundo principio de la dinámica.

El trabajo elemental realizado por la fuerza F será :

$$dW = F \cdot dx = i \cdot L \cdot B \cdot dx$$

y la fem que es la energía por unidad de carga resulta

$$\varepsilon = \frac{dW}{dq} = \frac{i \cdot L \cdot B \cdot dx}{dq} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{L \cdot B \cdot dx}{dq} = B \cdot L \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\varepsilon = -d \Phi_m / dt$$

El signo menos es debido a que la corriente se opone a la variación de flujo magnético.

Si moviéramos la barra hacia la izquierda la corriente iría en sentido contrario.

**Aplicaciones**

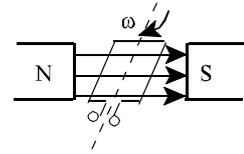
**a- Generador de corriente alterna. (alternador)**

Sistema formado por una bobina de N espiras de sección S que gira alrededor de un eje perpendicular a un campo de inducción magnética **B** constante.

Si la bobina de N espiras y sección S gira alrededor de un eje perpendicular al campo magnético **B** constante con una velocidad angular constante  $\omega$ , el flujo que atraviesa la bobina es:

$$\Phi_m = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \omega \cdot t \text{ y la fem inducida } \varepsilon = - d \Phi_m / dt = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \sin \omega \cdot t = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega \cdot t$$

Por tanto tenemos una fem variable sinusoidalmente.  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega \cdot \tau$



**b- Micrófonos:** Los micrófonos son bobinas sometidas a vibraciones ( movimiento) en el seno de campos magnéticos por lo que al cambiar el flujo magnético que los atraviesan generan fem inducidas

**Autoinducciones o bobinas. Coeficiente de autoinducción.**

Una bobina o autoinducción es un hilo conductor arrollado normalmente en forma recta o toroidal con un número de espiras N sin núcleo ferromagnético o con él. Por la bobina circula una corriente i.

Consideremos una bobina de N espiras por la que circula una corriente i variable. Como cambiará el flujo magnético que la atraviesa aparecerá una fuerza electromotriz inducida, autoinducida. Por ello a las bobinas se las llama también autoinducciones.

Si le aplicamos la ley de Lenz a esa bobina resulta:

$$\varepsilon = - N \cdot d \Phi_m / dt \text{ y como } d \Phi_m = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \text{ y el campo } \mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \int (\mu_0 / 4 \pi) \cdot i \cdot d\mathbf{l} \times \mathbf{u}_r / r^2$$

El flujo magnético que atraviesa la bobina depende del medio material, de la geometría de la misma, del número de espiras y de la intensidad de corriente que circula.  $\Phi_m = N \cdot \text{Cte} \cdot i = N \cdot L \cdot i$

Por tanto la fuerza electromotriz inducida nos queda  $\varepsilon = - N \cdot d (L \cdot i) / dt = - N \cdot L \cdot di / dt$

A la constante que relaciona la fem inducida con la variación de corriente se la denomina coeficiente de autoinducción de la bobina L y depende de la geometría y del medio material siendo sus unidades en el S.I. (Tesla·m²)/segundo o weber/segundo o bien Volt· segundo/Ampère denominado Henry ( H )

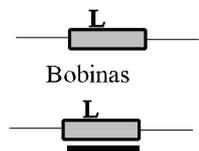
Al someter a una bobina a una corriente podemos tener las tres situaciones siguientes:

Que i sea constante  $di/dt = 0$  por tanto fem = 0

Si i aumenta  $di/dt > 0$  por tanto fem < 0

Si i disminuye  $di/dt < 0$  por tanto fem > 0

$$\varepsilon = -N \cdot L \cdot di/dt$$



*Cálculo de L para un solenoide toroidal*

Consideramos un toroide de sección S y longitud media l con un bobinado de N espiras.

Como  $B = \mu \cdot N \cdot i / l$

El flujo magnético que atraviesa una espira considerando el campo constante es  $\Phi_m = (\mu \cdot N \cdot i / l) \cdot S$

La variación de flujo total con el tiempo  $d\Phi_m / dt = N \cdot \mu \cdot N \cdot (S / l) \cdot di / dt$

La fem inducida  $\varepsilon = - \mu \cdot N^2 \cdot (S / l) \cdot di / dt$

Por tanto  $L = \mu \cdot N^2 \cdot (S / l)$

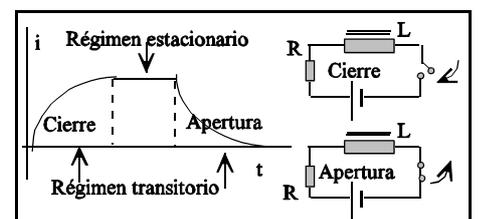
Este resultado es una buena aproximación para bobinas rectas.

En la práctica se determina el coeficiente de autoinducción de un elemento mediante medidas eléctricas.

*Comportamiento de las bobinas. Energía almacenada en una bobina*

La gráfica representa la intensidad de corriente en régimen transitorio y en régimen estacionario que circula por un circuito con una bobina L y una resistencia R cuando se conecta y desconecta de un generador.

Mientras i va aumentando aumenta B, con lo que se almacena energía en el campo magnético; esa energía se devuelve al circuito eléctrico cuando



se desconecta y la  $i$  se hace cero. Esto hace que  $i$  no pase bruscamente de 0 a  $i$  en el cierre del circuito ni de  $i$  a 0 en la apertura del mismo.

Si aplicamos las leyes de Kirchoff al circuito del esquema cuando conectamos resulta  $v_g - v_R - v_L = 0$  despejando  $v_g = R \cdot i + v_L = R \cdot i + L \cdot di/dt$

Al resolver esta ecuación diferencial nos da  $i = f(t) = \frac{v_g}{R} (1 - e^{-\frac{R \cdot t}{L}})$

La intensidad crece exponencialmente, cada vez menos, hasta un valor máximo  $v_g/R$  cuando llega al régimen transitorio. Se corresponde con el primer tramo de la gráfica. El tiempo que emplea en alcanzar el régimen estacionario depende de  $L$  y de  $R$ .

Para calcular la energía almacenada por la bobina utilizaremos la definición de fem y la ley de Faraday

$$dW = \varepsilon \cdot dq = L \cdot \frac{di}{dt} \cdot dq = L \cdot i \cdot di$$

Y la energía total almacenada será

$$W = \int_0^i L \cdot i \cdot di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$

$$W_{\text{bobina}} = 1/2 \cdot L \cdot i^2$$

Que es la energía almacenada alrededor de la bobina debido al campo magnético creado. Esa energía la devolverá cuando la corriente  $i$  vaya disminuyendo hasta hacerse cero.

Nota que la energía almacenada no depende del sentido de la corriente y es un valor mayor o igual a cero. Las bobinas serán junto con los condensadores y las resistencias elementos pasivos en los circuitos de corriente alterna.

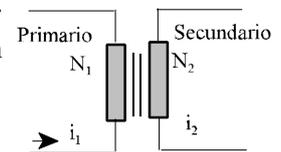
**Inducción mutua. Coeficiente**

Si disponemos de dos bobinas  $N_1$  y  $N_2$  acopladas mediante un material ferromagnético y por una de ellas circula una corriente  $i_1$  variable creará a su alrededor un campo magnético también variable lo que producirá en la otra bobina una fem inducida por variar el flujo magnético que la atraviesa.

El flujo que atravesará la segunda bobina será  $N_2 \cdot \Phi_2 = N_2 \cdot \text{cte} \cdot i_1 = N_2 \cdot M_{12} \cdot i_1$  y la fem inducida prescindiendo del signo

$$\varepsilon = d/dt (N_2 \cdot \Phi_2) = d/dt (N_2 \cdot M_{12} \cdot i_1) = M_{12} \cdot N_2 \cdot di/dt$$

La constante  $M_{12}$  se la denomina coeficiente de inducción mutua y depende de la geometría del sistema y el medio. Sus unidades son las mismas que las de  $L$ .



**Aplicación al transformador. Corrientes de Foucault.**

La inducción mutua es el fundamento físico de los transformadores de voltaje utilizados para modificar el voltaje en corrientes variables.

En este proceso se producen pérdidas de energía por dos causas:

Por efecto Joule en las bobinas. Debido al paso de corriente por las bobinas y dado que tienen cierta resistencia  $R$  se producen pérdidas de calor, pérdidas en el  $\text{Cu}$ .

Por efecto Joule en el hierro. En los núcleos de  $\text{Fe}$  como son conductores y están atravesados por un flujo magnético variable por lo que se generan corrientes inducidas en el hierro denominadas corrientes de Foucault. Ese fenómeno supone una disipación de energía en el mismo en forma de calor, pérdidas en el  $\text{Fe}$ .

Estas pérdidas se minimizan laminando el núcleo de hierro y pegando las láminas con un material con lo que aumentamos la resistencia a las intensidades inducidas en el  $\text{Fe}$  y disminuimos su intensidad sin apenas afectar al resto de parámetros.

El análisis de los transformadores se abordará con mayor profundidad en el tema de máquinas eléctricas.

