

## TEMA 6. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

### ÍNDICE

- 1. Tipos de materiales.**
  - 2. Flujo magnético y fuerza electromotriz.**
    - 2.1. Definición de flujo magnético.
    - 2.2. Definición de f.e.m
  - 3. Experiencias de Faraday.**
  - 4. Leyes de la inducción electromagnética.**
    - 4.1. Ley de Faraday.
    - 4.2. Ley de Lenz.
  - 5. Variación del flujo magnético.**
    - 5.1. Variación del valor del campo magnético.
    - 5.2. Variación de la superficie.
    - 5.3. Variación del ángulo.
  - 6. El generador eléctrico.**
  - 7. Inducción mutua.**
    - 7.1. Trasformador.
  - 8. Autoinducción.**
- 

#### 1. Tipos de materiales.

De acuerdo con el comportamiento que tienen cuando se les somete a un campo magnético externo se clasifican en:

- Materiales diamagnéticos: se caracterizan por ser repelidos por los imanes (Hidrógeno, nitrógeno, mercurio, sodio, etc.)
- Materiales paramagnéticos: se caracterizan por ser atraídos por los imanes. Tienen un comportamiento magnético muy débil (Estaño, magnesio, platino, oxígeno, aluminio)
- Materiales ferromagnéticos: Tienen una configuración en sus átomos que favorece la interacción entre los dipolos magnéticos, los cuales se alinean paralelamente dentro de zonas que se llaman dominios. Si el material no está magnetizado dichos dominios se orientan al azar y el material no presenta magnetismo. Al colocarlos en un campo magnético, los dominios se orientan en la dirección del campo magnético y se imantan, de manera temporal o permanente dependiendo del material. Al aumentar la temperatura desaparece la imantación.

En la siguiente [página web](#) puedes encontrar una descripción más detallada de los tipos de materiales, así como animaciones que te pueden ayudar a entender dichos conceptos.

#### 2. Flujo magnético y fuerza electromotriz.

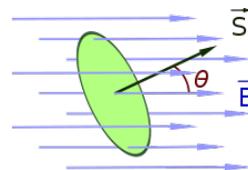
##### 2.1. Definición de flujo magnético.

El flujo magnético, de manera análoga al flujo eléctrico, se define de la siguiente manera:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Cuando la superficie es plana y el campo magnético es constante la expresión anterior queda de la siguiente manera:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int B \cdot S \cdot \cos \theta$$



Siendo  $\theta$  el ángulo que forman el campo magnético y la superficie.

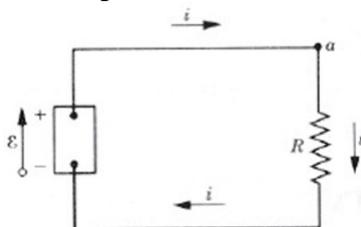
De la expresión anterior se deduce que el flujo magnético es máximo cuando B y S son perpendiculares.

## 2.2. Definición de f.e.m.

La fuerza electromotriz (f.e.m.) se define como el trabajo realizado por un elemento externo de un circuito por unidad de carga eléctrica que lo atraviesa:

$$\varepsilon = \frac{W_{ext}}{q}$$

Este trabajo se emplea en superar la diferencia de potencial que existe en un circuito. Si superar esta diferencia de potencial, no habría corriente eléctrica.



En un generador ideal no habrá pérdidas de energía eléctrica cuando la corriente atraviesa dicho generador, por lo que la f.e.m. coincidirá con la diferencia de potencial entre los bornes del circuito:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

## 3. Experiencias de Faraday.

La experiencia de Oersted, publicada en 1820, y comentada en el tema anterior, fue el primer paso para relacionar los fenómenos de electricidad y magnetismo. Posteriormente, en el transcurso de meses, Ampère demostró que toda corriente eléctrica produce un campo magnético.

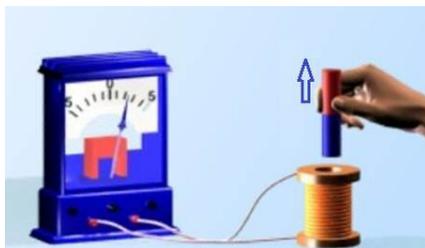
El siguiente paso lo dio el científico inglés Michael Faraday, el cual estaba convencido de que se podía producir el fenómeno inverso, es decir, que el campo magnético tendría que provocar una corriente eléctrica. En 1824 realiza sus primeros experimentos en busca de las corrientes inducidas, describiendo en su diario su descubrimiento más importante, el de la inducción electromagnética.

A continuación se detallan las experiencias que se llevaron a cabo para inducir corrientes eléctricas utilizando campos magnéticos. Las dos primeras fueron llevadas a cabo por Faraday, mientras que la tercera la realizó el físico estadounidense Joseph Henry.

### Primera experiencia

Cogiendo una bobina o una espira solamente, se le hace pasar un imán aproximándolo y alejándolo de la bobina. A dicha espira o bobina se le conecta un galvanómetro para medir el paso de la corriente eléctrica por la bobina. Cuando se realiza dicha experiencia se puede observar lo siguiente:

- Sólo se detecta paso de corriente eléctrica por el galvanómetro cuando el imán está en movimiento, esto es, se aproxima o se aleja de la bobina.
- Cuanto más rápido se acerca o se aleja, mayor es la intensidad de la corriente eléctrica.
- Si el imán no se mueve, no se detecta corriente eléctrica.
- Si se acerca el polo norte del imán a la bobina, la corriente eléctrica circula en sentido contrario al que tendría si se acerca el polo sur.
- Cuanto más potente sea el imán, mayor es la magnitud de la corriente eléctrica.
- Cuanto mayor sea la superficie de la espira o bobina mayor es la magnitud de la corriente eléctrica.
- Cuantas más espiras tenga la bobina, mayor será la magnitud de la corriente eléctrica.



1º experiencia. Fuente: <http://fisica.cubaeduca.cu/>

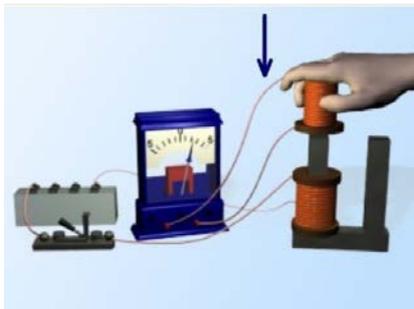
### Segunda experiencia

A la espira o bobina conectada a un galvanómetro de la experiencia anterior le aproximamos o alejamos esta vez otra bobina alimentada por un generador que produzca una corriente continua estacionaria. Cuando se realiza dicha experiencia se puede observar lo siguiente:

- Al igual que en el caso anterior, sólo se detecta el paso de corriente eléctrica cuando se aproxima o se aleja la segunda bobina, siendo la magnitud de la corriente eléctrica cuanto más rápido se mueva. Si no se mueve, no se detecta paso de la corriente eléctrica.
- Cuanto mayor sea la intensidad de la corriente eléctrica que circula por la segunda bobina, mayor será la intensidad de la corriente eléctrica inducida en la primera bobina.
- Si se modifica el sentido de la corriente eléctrica de la segunda bobina, se invierte el sentido de la corriente eléctrica inducida en la primera bobina.

- Cuantas más espiras tenga la bobina, mayor será la magnitud de la corriente eléctrica.

Los mismos efectos pueden observarse si en vez de aproximar o alejar una bobina sobre la que circula una corriente continua, se utiliza una bobina que está quieta en la cual circula una corriente variable, la cual se puede obtener utilizando una resistencia variable. En este caso, sólo se observa corriente inducida en la primera bobina cuando modificamos la resistencia variable.

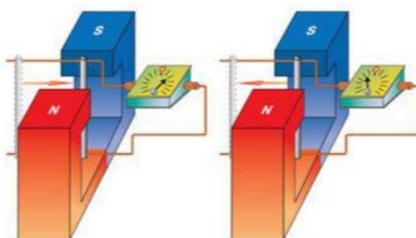


2º experiencia. Fuente: <http://fisica.cubaeduca.cu/>

### Tercera experiencia

Colocó un conductor sobre un soporte para hacerlo girar sobre un eje, estando dicho conductor entre los polos opuestos de un imán que crea un campo magnético. El eje de giro es perpendicular al campo magnético creado por el imán. De esta manera comprobó lo siguiente:

- Al hacer girar el conductor se originaba una corriente eléctrica.
- Dicha corriente eléctrica sólo se observaba cuando se movía el conductor.
- Si el conductor se hace girar en sentido contrario, la corriente inducida tiene el sentido contrario a la anterior.



3º experiencia. Fuente: <http://fisica.cubaeduca.cu/>

En el siguiente [enlace](#) se pueden simular estas experiencias.

## 4. Leyes de la inducción electromagnética.

Si se tuvieran en cuenta únicamente las dos primeras experiencias, se podría pensar que es la variación del campo magnético la que crea la corriente inducida. Sin embargo, en la experiencia de Henry no se modifica el campo magnético, sino el flujo magnético. Como conclusión, **la corriente inducida se debe a la variación del flujo magnético que atraviesa el conductor por el cual circula la corriente inducida, siendo mayor dicha corriente cuanto mayor sea dicha variación.**

#### 4.1. Ley de Faraday.

Como ya se ha comentado, es necesario una fuerza electromotriz para mantener una corriente eléctrica. De esta manera, se puede definir la ley de Faraday de la siguiente manera:

El valor de la f.e.m. inducida en cada instante en un circuito es igual a la variación temporal del flujo magnético que lo atraviesa. De manera matemática esto se expresa como:

$$\varepsilon = \frac{d\phi_B}{dt}$$

De esta ley se deduce que, si no varía el flujo magnético, no se produce f.e.m., independientemente de lo elevado que sea este.

#### 4.2. Ley de Lenz.

Faraday dedujo la relación entre flujo magnético y corriente inducida, pero fue deducido por Heinrich F.E. Lenz. De acuerdo con la ley de Lenz, el sentido de la corriente inducida es aquel que se opone al efecto que la produce, de tal manera que el campo magnético producido por esta corriente inducida trata de contrarrestar la variación del flujo magnético inductor.

Combinando las leyes de Faraday y Lenz, la expresión que relaciona el flujo magnético y la corriente inducida queda:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

### 5. Variación del flujo magnético.

Tal y como se muestra en el primer apartado, el flujo magnético se define en función del campo magnético, de la superficie que lo atraviesa y del ángulo que forman ambos vectores. Por tanto, el flujo magnético se modificará cuando varíen alguno de estos tres factores. A continuación se va a determinar el valor de la f.e.m. inducida en un conductor para cada uno de los tres casos:

#### 5.1. Variación del valor del campo magnético.

Las experiencias de Faraday (1º y 2º experiencia), son de este tipo, ya que al aproximar un imán o una bobina en la que circula una corriente eléctrica, lo que se está provocando es la variación del campo magnético que atraviesa las espiras del circuito inductor.

En este caso, la superficie y el ángulo entre el campo magnético y la superficie permanece constante, por lo que la ley de Faraday-Lenz queda expresada de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(N \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta)}{dt} = -N \cdot S \cdot \cos\theta \cdot \frac{dB}{dt}$$

Siendo  $N$  el número de espiras en la bobina inducida.

Si el campo magnético varía de manera uniforme, el valor de la f.e.m. queda:

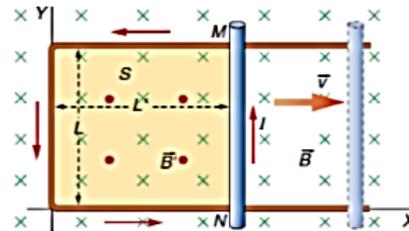
$$\varepsilon = -N \cdot S \cdot \cos\theta \cdot \frac{B_{final} - B_{inicial}}{\Delta t}$$

### 5.2. Variación de la superficie.

En el caso de que la superficie de la espira varíe con el tiempo, el valor de la f.e.m. inducida queda de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos\theta)}{dt} = -B \cdot \cos\theta \cdot \frac{dS}{dt}$$

$$\varepsilon = -B \cdot \cos\theta \cdot \frac{S_{final} - S_{inicial}}{\Delta t}$$



Teniendo en cuenta que la superficie de la espira  $S = L \cdot L'$  y que  $L'$  varía con el tiempo, se puede expresar el valor de la f.e.m. inducida como:

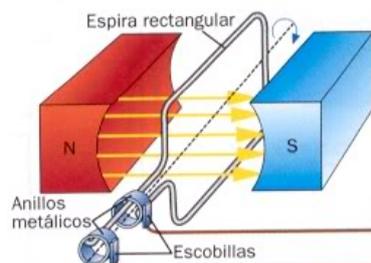
$$\varepsilon = -B \cdot \cos\theta \cdot L \cdot \frac{dL'}{dt}$$

Y si el desplazamiento del conductor tiene lugar a velocidad constante y el campo magnético es perpendicular a la espira, la expresión queda:

$$\varepsilon = -B \cdot L \cdot v$$

### 5.3. Variación del ángulo.

Este tipo de variación es la correspondiente a la tercera experiencia descrita. En ese caso, no varía ni el campo magnético ni la superficie, sólo el ángulo entre ambos al hacer girar la espira alrededor de un eje perpendicular al campo.



Fuente: <https://mgmdenia.wordpress.com/tag/dinamo/>

En este caso concreto, la expresión de la f.e.m. inducida queda:

$$\varepsilon = -B \cdot S \cdot \frac{d\cos\theta}{dt}$$

Si la espira gira con velocidad angular constante, se trataría de un movimiento circular uniforme y la expresión de la velocidad angular sería  $w = \frac{\theta}{t}$ , que sustituyendo en la expresión anterior:

$$\varepsilon = -B \cdot S \cdot \frac{d\cos(wt)}{dt} = B \cdot S \cdot w \cdot \text{sen}(wt)$$

Si en vez de una espira gira una bobina con N espiras:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot S \cdot w \cdot \text{sen}(wt)$$

El valor máximo de f.e.m. inducida se alcanza cuando la función seno es igual a 1, y se designa como  $\varepsilon_0 = N \cdot B \cdot S \cdot w$ . De esta manera:

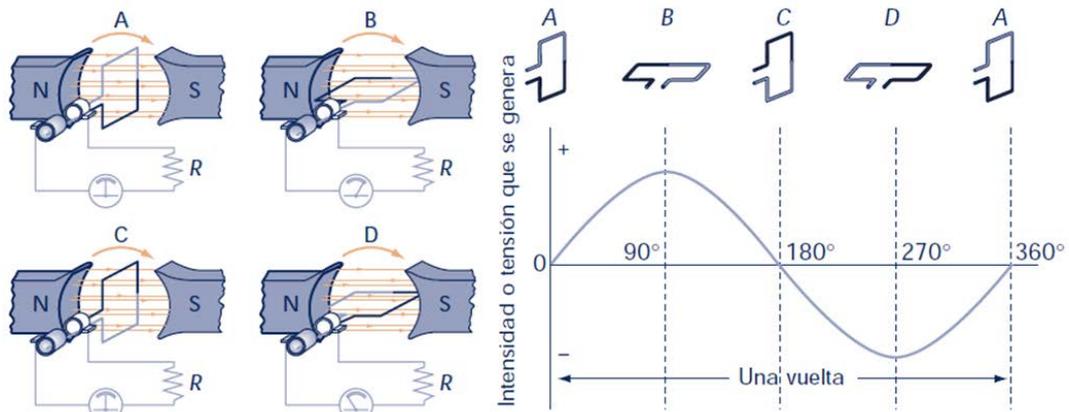
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(wt)$$

## 6. El generador eléctrico.

Los generadores eléctricos por inducción son aparatos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. La energía mecánica, a su vez, se produce a partir de la energía química o nuclear con varios tipos de combustible, o se obtiene a partir de fuentes renovables como el viento o los saltos de agua. Las turbinas de vapor, los motores de combustión interna, las turbinas de combustión de gas, los motores eléctricos, las turbinas de agua y de viento son los métodos comunes que proporcionan energía mecánica para este tipo de dispositivos. Hay generadores eléctricos de todo tipo de tamaños, desde muy pequeños de unos pocos vatios de potencia de salida hasta centrales eléctricas que proporcionan gigavatios de potencia.

El funcionamiento de un generador eléctrico por inducción se basa en el principio visto anteriormente: La inducción de una corriente eléctrica por la variación del flujo magnético en su superficie. Esta variación del flujo magnético se produce al variar el ángulo entre el campo magnético y la superficie haciendo girar al inductor alrededor de un eje perpendicular al campo magnético. Este tipo de generadores se denominan dinamos si producen corriente continua y alternadores si producen corriente alterna.

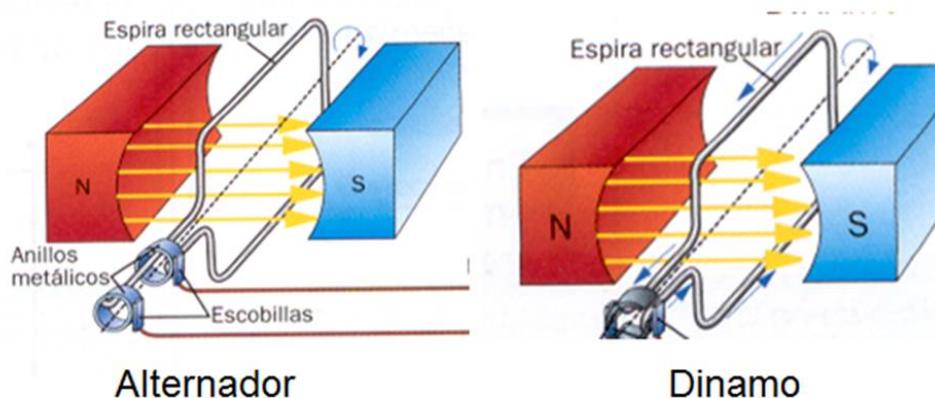
En la figura se observa la secuencia de un ciclo completo de un alternador y la f.e.m. que se genera. Esta es máxima, y por tanto la intensidad de corriente será máxima, cuando la superficie es paralela al flujo y nula cuando es perpendicular.



Secuencia de un ciclo completo para un alternador.

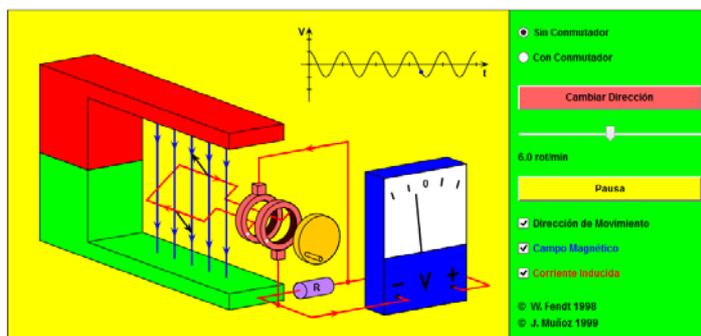
Durante el giro de la espira se produce la onda sinusoidal que se corresponde con la representación de una corriente o tensión alternas. El efecto de la corriente inducida aumenta conforme el aumenta el número de espiras de la bobina.

El fundamento de una dinamo y un alternador es el mismo. En ambos casos se extrae la corriente generada en la espira mediante unos colectores que giran con cada uno de los extremos de la espira y unas escobillas donde sale la corriente. La diferencia entre ambos es que en el alternador los colectores no están cortados, lo que provoca que la cada escobilla cambie de polaridad en cada vuelta completa de la espira. Por el contrario, en la dinamo los colectores están cortados y la corriente que sale fuera de la espira tiene la misma dirección.



Diferencia entre un alternador y una dinamo. Fuente: <http://www.masquemaquina.com/>

En la siguiente [simulación](#) se puede estudiar el funcionamiento de un generador eléctrico por inducción, tanto un alternador como una dinamo. En el siguiente [video](#) se puede observar el funcionamiento de un generador de corriente alterna. Además, en este otro [vídeo](#) se puede observar como funciona un generador eléctrico y la diferencia con un motor eléctrico.



Simulación de generador de corriente eléctrica por inducción. Fuente: <http://www.walter-fendt.de>

## 7. Inducción mutua.

Como ya se ha comentado, la variación de un campo magnético induce una corriente eléctrica. Por tanto, todo circuito por el que circule una corriente variable inducirá una f.e.m. en otro circuito cercano y viceversa. Este fenómeno se conoce como inducción mutua

Si se consideran dos circuitos o bobinas próximas entre sí y arrolladas sobre un núcleo de hierro la corriente que circula por la bobina 1 genera un campo magnético cuyo flujo atraviesa parcial o totalmente la bobina 2, que está conectada únicamente a un galvanómetro para detectar la corriente.

En el caso de que la corriente  $I_1$  por la bobina 1 varíe, variará el flujo magnético que engendra y variará el flujo parcial o total que atraviesa la bobina 2. Ello dar lugar a una FEM inducida en la bobina 2 mientras dura la variación del flujo. Si  $\phi_2$  es el flujo que atraviesa una espira y la bobina 2 tiene  $N_2$  espiras, el flujo que atraviesa la bobina 2 será:  $\Phi_2 = N_2 \cdot \phi_2$ .

El flujo del campo magnético en 2 ( $\Phi_2$ ) será proporcional a la corriente en que circula 1. Esto puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Phi_2 = M_{1,2} \cdot I_1$$

Donde  $M_{1,2}$  es el coeficiente de inducción mutua que el circuito 1 produce en el circuito 2.

La f.e.m. inducida en el circuito 2 debido al circuito 1 vale:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi_2}{dt} = -M_{1,2} \cdot \frac{dI_1}{dt_1}$$

De la misma manera, este fenómeno se puede producir a la inversa. De esta manera, la f.e.m. inducida en el circuito 1 debido a la corriente variable en el circuito 2 tiene la expresión:

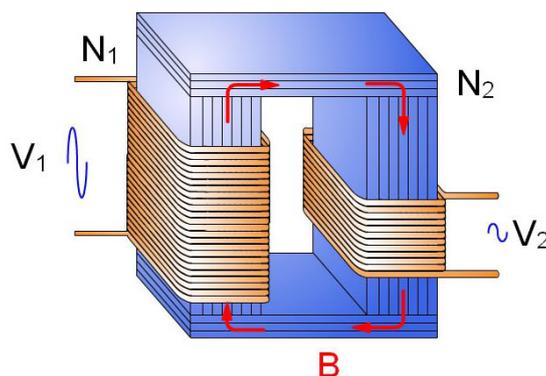
$$\varepsilon_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi_1}{dt} = -M_{2,1} \cdot \frac{dI_2}{dt_2}$$

Los coeficientes de inducción mutua son iguales y se designan por M, donde M se denomina coeficiente de inducción mutua y es una característica del conjunto formado por ambas bobinas.

### 7.1. Trasformador.

Un transformador es un dispositivo que modifica la tensión de una corriente eléctrica alterna. Están formados por un núcleo cerrado formado por láminas de hierro y dos bobinas enrolladas en el con diferente número de espiras. Se basan en el fenómeno de la inducción mutua de tal forma que el voltaje en cada bobina es proporcional al número de espiras según la relación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Esta relación se produce en un transformador ideal, es decir, aquel en el que no se produzca pérdidas de energía en el núcleo de hierro.

Los alternadores se utilizan para bajar la tensión que llega de las líneas de corriente al uso doméstico. En la central eléctrica se produce electricidad con un voltaje alrededor de 10.000 V. Esta se eleva para su transporte en las líneas de alta tensión para disminuir las pérdidas por el efecto Joule hasta 400.000 V. Cuando llega a las zonas de suministro se reduce el voltaje, primero hasta 15.000 V en las subestaciones transformadoras, y hasta 220 V en las estaciones distribuidoras para uso doméstico.

En la siguiente [simulación](#) se puede variar las espiras de las dos bobinas de un transformador y observar como se modifica el voltaje de entrada y salida

## 8. Autoinducción.

En el apartado anterior se ha estudiado el fenómeno provocado entre dos bobinas. Sin embargo, en una bobina por la que circula corriente eléctrica es atravesada por las líneas de campo magnético que ella misma genera, de tal manera que cuando la corriente varía, lo hace también el campo magnético, generándose en la propia bobina una f.e.m. inducida.

Así, cuando en una bobina de \$N\$ espiras circula una corriente \$I\$, se origina un campo magnético cuyo flujo total \$\phi\$ en la propia bobina es proporcional a la corriente circulante. De esta manera se originará una variación de flujo \$\phi\$ y se induce en la propia bobina una f.e.m. que tendrá la siguiente expresión:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Siendo  $L$  el coeficiente de autoinducción mutua en la bobina.

De la ecuación anterior se puede deducir el coeficiente de autoinducción:

$$-N \cdot \phi = -L \cdot I \rightarrow L = \frac{N \cdot \phi}{I}$$

Utilizando la expresión del campo magnético en un solenoide determinada en el tema anterior, se puede deducir:

$$\phi = N \cdot B \cdot S = N \cdot \frac{\mu \cdot N^2 \cdot I}{l} \cdot S$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

El coeficiente de autoinducción se mide en henrios (H).

De acuerdo con la expresión de la f.e.m. inducida, es negativa, esto es, se opone al efecto que genera esta f.e.m. De esta manera, cuando la intensidad de corriente que circula por la bobina aumenta se genera una corriente eléctrica en sentido contrario a la que circula por el circuito. Por el contrario, cuando la corriente eléctrica que circula por la bobina disminuye la corriente inducida tiene el mismo sentido que la que circula por el circuito.

#### Bibliografía

- Física 2º bachillerato. Editorial Anaya, 2009. ISBN: 978-84-667-8263-0.
- Física 2º bachillerato. Editorial McGraw Hill, 2009. ISBN: 978-84-481-7027-1.
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. <http://acer.forestales.upm.es/>
- Departamento de física y química del IES Leonardo da Vinci. <http://intercentros.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica>.
- Laplace. Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla. [http://laplace.us.es/wiki/index.php/P%C3%A1gina\\_Principal](http://laplace.us.es/wiki/index.php/P%C3%A1gina_Principal).
- Blog Ciencia de sofá: [www.cienciadesofa.com](http://www.cienciadesofa.com).
- PhET Interactive Simulations. Simulaciones de la Universidad de Colorado: <https://phet.colorado.edu/es/simulations/category/physics>.
- Blog el físico loco: [www.elfisicoloco.blogspot.com.es](http://www.elfisicoloco.blogspot.com.es)
- Página web [www.fisicalab.com](http://www.fisicalab.com).
- Blog de Mercedes González Bas. <https://mgmdenia.wordpress.com>.
- Simulaciones Walter Fendt. <http://www.walter-fendt.de>