

Leyes de la inducción electromagnética

Imaginemos un nuevo experimento: Tenemos una bobina por la que hacemos pasar una corriente eléctrica que crea un campo magnético, y frente a ésta situamos en reposo una carga eléctrica q . Se puede observar lo siguiente:

- Si la corriente que recorre la bobina es constante, y el campo magnético que crea no depende del tiempo, entonces la carga q permanece inmóvil, lo que prueba que la fuerza que ejerce el campo magnético es nula.
- Sin embargo, cuando la corriente I que recorre la bobina varía con el tiempo, entonces el campo magnético creado también es dependiente del mismo, $\vec{B}(t)$ y se puede observar que la carga eléctrica ¡comienza a moverse! Es decir, que ha tenido que crearse un campo eléctrico \vec{E} , que ejerce la fuerza sobre la carga en reposo, proporcionándole aceleración (recuérdese que la fuerza magnética no actúa sobre cargas en reposo).

La interpretación de este nuevo fenómeno físico, producido por un campo magnético variable con el tiempo, constituye una nueva ley física: **Un campo magnético variable con el tiempo, crea en el espacio un campo eléctrico.**

Si ahora las cargas eléctricas sometidas al campo magnético variable son los electrones de conducción de una espira conductora, conectada a un instrumento de medida, como en la fig.8.2, el “empujón” que sufrirán todos los electrones de conducción provocará en ésta una corriente eléctrica, que acusa el aparato de medida.

Experimentalmente se comprueba, que la intensidad de la corriente que mide el aparato, depende de la rapidez con que varía el campo magnético con el tiempo y además de la orientación de la espira con relación al campo magnético, de manera que si está situada paralelamente a éste y no abraza líneas de campo, el flujo magnético a través de ella es nulo y no se acusa corriente.

Ley de Faraday

Los resultados de estos y otros experimentos se recogen en la llamada Ley de Faraday:

- Siempre que en una región del espacio haya un campo magnético variable con el tiempo, $\vec{B}(t)$, se inducirá en esa región un campo eléctrico \vec{E}_i , llamado campo eléctrico inducido, fig.8.15
- La integral de \vec{E}_i a lo largo de una línea cerrada, es igual a menos la derivada del flujo magnético, $\phi_m(t)$ con relación al tiempo, que atraviesa la superficie limitada por dicha línea.

$$\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad [8.9]$$

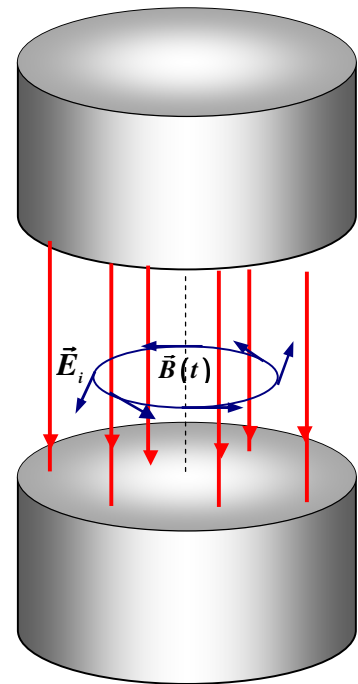


Fig.8.15. Campo eléctrico inducido \vec{E}_i producido por un campo magnético $\vec{B}(t)$ que varía con el tiempo. Las bobinas que crean el campo magnético van alojadas en el interior de los cilindros.

Debes observar, que a diferencia del campo eléctrico \vec{E} estudiado en la electrostática, que es conservativo y su integral a lo largo de una línea cerrada es nula, por el contrario, para el campo eléctrico inducido \vec{E}_i su integral a lo largo de una línea cerrada no es nula, ecuación [8,9], de modo que no se trata de un campo conservativo.

La ecuación [8.8] constituye la forma integral de la Ley de Faraday, sin embargo el primer miembro es precisamente la fuerza electromotriz inducida en la espira, por el campo magnético variable con el tiempo, de modo que se puede escribir la ecuación.

$$\varepsilon_{ind} = \oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_m}{dt}$$

Físicamente, la fem inducida ε_{ind} representa el trabajo que efectúa el campo eléctrico inducido \vec{E}_i , sobre cada unidad de carga, para hacerla circular por el circuito.

Cuando en lugar de una espira, es una bobina con N espiras, la que es atravesada por el flujo magnético variable, entonces el flujo es N veces mayor y la ley de Faraday puede expresarse.

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d}{dt}(N \cdot \Phi_m) \quad [8.10]$$

La ley de Faraday es igualmente válida para conductores que se mueven a través de campos magnéticos, como para conductores que permanecen fijos y son atravesados por campos magnéticos variables con el tiempo.

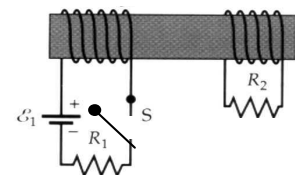
Ley de Lenz

La ley de Lenz da un significado físico sencillo e intuitivo, al signo menos que aparece en la ley de Faraday. En la época en la que se descubrieron las leyes de la inducción los científicos e ingenieros aprendían el uso de dichas leyes y se sabía que la fuerza electromotriz inducida era proporcional a la variación con el tiempo del flujo del campo magnético \vec{B} .

Ahora bien, esta corriente inducida va a producir también un campo magnético y por lo tanto un nuevo flujo adicional, que habrá que añadir al flujo del campo magnético original.

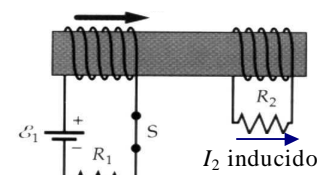
Para entender y averiguar cuál era el sentido de circulación en un circuito, de la corriente inducida, la regla que usaban era la *ley de Lenz* cuyo enunciado es el siguiente:

La variación con el tiempo del flujo de \vec{B} a través de una espira, induce una fem. y por lo tanto una corriente tal, que el flujo adicional producido por esta corriente se opone al flujo original.



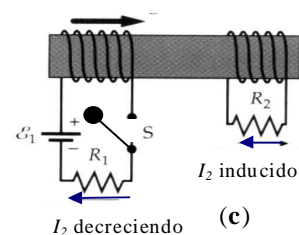
(a)

B aumentando



I_1 aumentando (b)

B decreciendo



I_2 decreciendo (c)

Fem inducida mediante circuitos eléctricos.

En las figuras se representan varios circuitos que permiten crear el campo magnético mediante corrientes en lugar de con imanes.

En la fig. (a) el circuito de la izquierda está abierto y el situado a la derecha no tiene corriente inducida.

Comprueba en el circuito de la fig. (b), que al cerrar el interruptor y empezar a pasar corriente por el circuito de la izquierda, se induce una corriente en el de la derecha, del sentido indicado en el dibujo.

En la fig. (c) al abrir a la izquierda, comprueba que la corriente inducida a la derecha es de sentido contrario.

Ejemplos de aplicación de la ley de Lenz

Vamos a considerar un imán cuyo polo N se va acercando a una espira, fig.8.16a, a través ésta hay un flujo creciente procedente del N que se acerca y la corriente inducida en la espira produce un campo magnético adicional \vec{B}' , para oponerse al flujo variable que la crea, lo que supone situar un N , frente al N que viene. Una regla práctica para averiguar el sentido de la corriente inducida, consiste en situar el pulgar apuntando en el sentido del campo magnético adicional \vec{B}' , de modo que el resto de los dedos nos dan el sentido de esta corriente inducida.

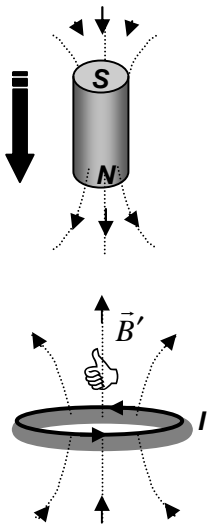


Fig.8.16a, el N se acerca

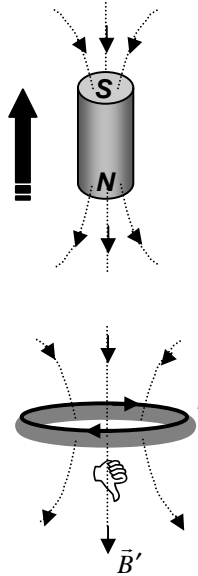


Fig.8.16b, el N se aleja

En la fig. 8.16b, el N del imán se aleja de la espira, lo que produce una nueva variación del flujo que la atraviesa. Ahora la corriente inducida quiere oponerse a que se vaya el N del imán, de modo que la espira presenta frente a éste N su cara S , en consecuencia la cara N de la espira estará del otro lado. Si apuntamos el pulgar en el sentido del campo magnético adicional, nos permite determinar con el resto de los dedos el sentido de la corriente inducida en la espira, que ahora es contrario al anterior.

Si acercásemos o alejásemos el polo Sur del imán, las corrientes inducidas se producirían respectivamente en sentidos contrarios a los anteriormente analizados, fig.8.17 y fig.8.18. *Compruebe el estudiante que acercar un polo Sur es equivalente en cuanto al sentido de la corriente inducida en la espira, a alejar un polo Norte y aproximar un polo Norte es equivalente a alejar un polo Sur.*

La ley de Lenz, en realidad es innecesaria, y ya está contenida en el enunciado completo de la ley de Faraday a través del signo *menos* y la aplicación de la *regla de la mano derecha*.

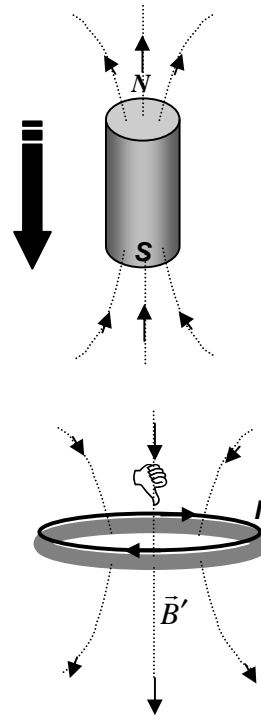


Fig.8.17. Al aproximar la cara S a la espira, ésta quiere rechazarla y enfrenta una cara S , de modo que del otro lado estará la cara N .

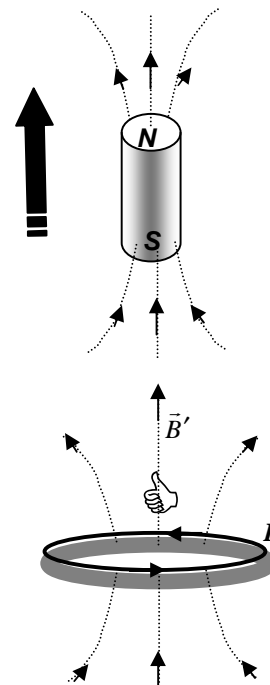


Fig.8.18. El S se aleja y la espira quiere oponerse, por lo que produce un N del lado del imán.

Autoinducción

Consideremos una espira de resistencia R por la que circula una intensidad de corriente de intensidad I . El flujo del campo magnético ϕ_m , que crea la espira a través de si misma, es proporcional a la intensidad I , y el coeficiente de proporcionalidad, (que *siempre es positivo*). Se llama coeficiente de autoinducción L

$$\phi_m = L \cdot I \quad [8.11]$$

El coeficiente de autoinducción L se expresa (de su definición) en unidades de flujo dividido por intensidad, es decir $Wb \cdot A^{-1}$, unidad llamada henrio, en honor a Joseph Henry, y se representa con H .

$$1H = 1Wb \cdot A^{-1} = V \cdot s \cdot \frac{1}{A} = \frac{V}{A} \cdot s = \Omega \cdot s.$$

La fuerza electromotriz inducida es de acuerdo con la ley de Faraday.

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad [8.12]$$

Para que un circuito o espira, tenga un coeficiente de autoinducción apreciable hay que diseñarlo de un modo especial. Hará falta que el circuito presente una *gran área efectiva al flujo* para que L sea apreciable. Esto se consigue mediante una espira que se enrolla un gran número de vueltas (se designa como autoinducción), fig.8.19. La autoinducción se representa esquemáticamente como en la fig.8.20.

Si la autoinducción es una bobina con N vueltas y de longitud l , cuando la recorre una intensidad I , el campo B en su interior viene determinada por la ec.[7.15]. El flujo a través de una sola espira será:

$$B \cdot S = \mu_0 \frac{N}{l} I \cdot S,$$

El flujo a través de las N espiras de la bobina, es N veces el anterior.

$$\phi_m = N \cdot B \cdot S = \mu_0 \frac{N^2}{l} S \cdot I.$$

El cociente entre el flujo magnético total ϕ_m , y la intensidad de la corriente I , determina el coeficiente de autoinducción L de la bobina:

$$L = \frac{\phi_m}{I} = \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot S \quad [8.13]$$

Si multiplicamos y dividimos por l , resulta que $S \cdot l$ es el volumen V de la bobina, quedando $L = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} \cdot S \cdot l = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} \cdot V$. El coeficiente de autoinducción depende sólo de magnitudes geométricas de la bobina, como su longitud l y su volumen V , del número de espiras N y de la permeabilidad magnética del núcleo, en este caso la del vacío μ_0 .

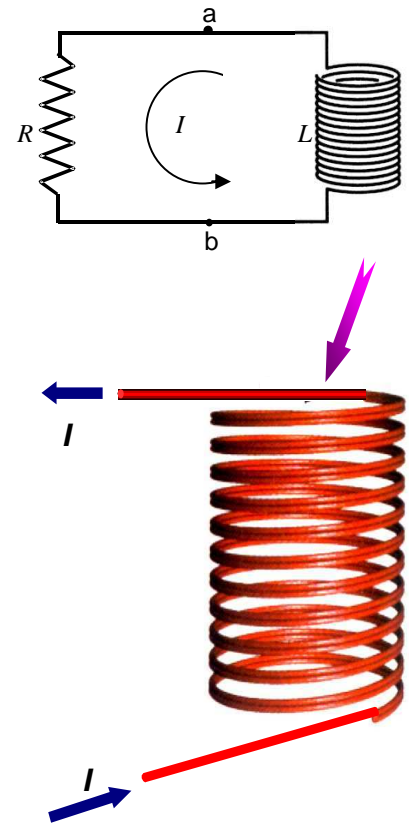


Fig.8.19. Bobina de autoinducción.

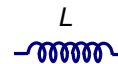


Fig.8.20. Modo de simbolizar una autoinducción en un circuito.