4. ELECTROMAGNETISMO

4.4 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

4.4.1. Introducción

Hemos visto como una corriente eléctrica genera un campo magnético. Pues bien, a principios de la década de 1830, Michael Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Norteamérica descubrieron independientemente que un campo magnético induce una corriente en un conductor, y por tanto una diferencia de potencial o fuerza electromotriz, siempre que el campo magnético sea variable. Las fuerzas electromotrices y las corrientes causadas por los campos magnéticos variables se denominan fuerzas electromotrices inducidas y corrientes inducidas. El proceso se denomina inducción magnética.

4.4.2. Flujo magnético

Todos los métodos de inducción magnética pueden resumirse mediante una simple expresión llamada ley de Faraday. Para enunciar la ley de Faraday debemos introducir un concepto que ya hemos usado muchas veces con el campo eléctrico que es el concepto de flujo de una magnitud vectorial, en este caso flujo del campo magnético. En su momento habíamos definido flujo de una magnitud vectorial $\vec{a}$ de la siguiente manera:

Flujo a través de una superficie abierta S que lo interpretamos como número de líneas de campo que atraviesan la superficie abierta S:

$$\phi = \int_S \vec{a} \bullet d\vec{s}$$

Flujo a través de una superficie cerrada S que lo interpretamos como número de líneas de campo que salen menos número de líneas de campo que entran a través de la superficie cerrada S:

$$\phi = \oint_S \vec{a} \bullet d\vec{s}$$

¿Cuál de las dos expresiones tendría sentido definir para el caso en que $\vec{a} = \vec{B}$? Cuando $\vec{a} = \vec{B}$ sólo tiene sentido el flujo magnético a través de una superficie abierta, ya que al ser las líneas de campo magnético cerradas el flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada siempre va a ser cero, ya que saldrán a través de la superficie el mismo número de líneas de campo en entran. Por tanto para el caso en que $\vec{a} = \vec{B}$ escribimos:

$$\phi = \int_S \vec{B} \bullet d\vec{s}$$

$$\phi = \oint_S \vec{B} \bullet d\vec{s} = 0$$

Si la superficie abierta es múltiple, como por ejemplo una bobina de N vueltas que limita una superficie para cada vuelta, el flujo será la suma de los flujos a través de todas las superficies. En este tipo de ejemplos, las superficies son aproximadamente iguales por lo que si el flujo a través de una de ellas es ϕ_{espira} , el flujo total será $\phi = N\phi_{espira}$.

4.4.3. Ley de Faraday

La experiencia de Oersted (1820) que hemos estudiado en el apartado anterior puso de manifiesto que una corriente eléctrica producía un campo magnético en la región del espacio próxima al conductor por el que circulaba la corriente. Después de este descubrimiento era lógico plantearse la posibilidad inversa, es decir, ¿puede un campo magnético producir una corriente eléctrica? La respuesta a esta pregunta vino de la mano de FARADAY (1831) quien determinó las circunstancias en las que un campo magnético podía general corriente eléctrica. El fenómeno físico responsable de este efecto se conoce con el nombre de inducción electromagnética. Es necesario destacar su interés no solo desde el punto de vista físico sino también por sus importantes aplicaciones tecnológicas, ya que constituye, en la actualidad, la base de la producción de energía eléctrica.

Se comprueba experimentalmente que en la espira (circuito cerrado) del Problema 1 empieza a circular una corriente (corriente inducida) si el flujo magnético que atraviesa dicha espira varía temporalmente. Es decir, la mera existencia de un campo magnético no produce corriente en la espira. Normalmente la palabra circuito la usaremos a partir de ahora para denotar un camino cerrado. Para que exista una corriente en un circuito necesitamos una fuerza electromotriz, entonces la ley de Faraday se enuncia en términos de fuerza electromotriz inducida en el circuito:

"La fuerza electromotriz ε inducida en un circuito viene dada por la variación temporal de flujo magnético ϕ que atraviesa dicho circuito"

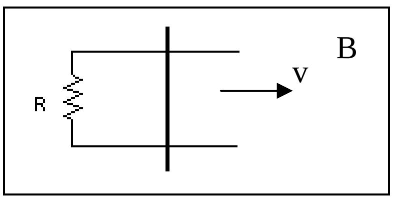
Matemáticamente esto se expresa: $\varepsilon = -\dfrac{d\phi}{dt}$. El signo menos tiene relación con el sentido de la corriente inducida (ley de Lenz) aunque podemos ignorarlo si solo queremos calcular el valor de la fuerza electromotriz inducida.

Resulta muy conveniente saber determinar el sentido de la corriente inducida en una situación dada. El sentido de la corriente inducida a través de la espira lo determina la ley de Lenz:

"La fuerza electromotriz y la corriente inducidas poseen una dirección y sentido tal que tienden de oponerse a la variación que las produce"

El enunciado de la ***ley de Lenz*** se puede entender fácilmente con el siguiente ejemplo:

Supongamos una barrilla conductora que se desliza a los largo de dos conductores que están unidos a una resistencia de valor *R*. En dicha región existe un campo magnético perpendicular al papel y hacia dentro. Como el área del circuito se incrementa cuando la varilla se mueve hacia la derecha, el flujo magnético a través del circuito crece también , y por tanto, se induce una fem en el circuito:



Calculamos el flujo a través del circuito que delimita la varilla y los dos hilos conductores:
En un instante de tiempo t: $\phi = Bl(x + vt)$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = Blv \Rightarrow I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{Blv}{R}$$

Causa: aumento de flujo magnético a través del circuito

Sentido de la corriente: tal que se opone a la causa que lo produce, tal que frena el aumento de flujo a través del circuito. En ese caso la fuerza electromotriz inducida tiende a producir una corriente en sentido contrario a las agujas del reloj. El campo producido por esta corriente inducida es saliente respecto al papel, oponiéndose al incremento de flujo provocado por el movimiento de la barra.

4.4.4. Fuerza electromotriz de movimiento

La corriente inducida aparece solo en un circuito cerrado, y el origen de dicha corriente inducida es una fuerza electromotriz inducida que se calcula usando la ley de Faraday. Ahora bien si tenemos una barra conductora que se mueve a través de un campo magnético aparece también una fuerza electromotriz inducida aunque el circuito no está completo y no existe corriente.

Supongamos una varilla metálica de longitud *l* y que se mueve a una velocidad $\vec{v}$ en el interior de un campo magnético perpendicular al papel y hacia dentro:

El electrón dentro de la barra se mueve horizontalmente con la barra, de manera que actúa sobre él una fuerza magnética que posee un componente hacia debajo de la varilla de magnitud qvB. Dicha fuerza empuja a los electrones libres de la varilla hacia su extremo inferior, produciendo en él acumulación de carga negativa y un defecto de electrones (carga positiva en el extremo superior). El resultado de este proceso es la aparición de un campo eléctrico en el interior de la varilla cuyo sentido irá de las cargas positivas a las negativas.

Por ello los electrones del metal están sometidos también a una fuerza eléctrica $\vec{F}_e$ de sentido contrario a la fuerza magnética $\vec{F}_m$. Por lo tanto, tenemos dos fuerzas de igual dirección, pero de sentidos opuestos, actuando sobre las cargas libres de la varilla. Al principio, $E = 0$ por lo que solo actuará $\vec{F}_m$. Aunque en el transcurso del tiempo $\vec{F}_m$ no varía, si aumenta E debido a la acumulación de carga en los extremos de la varilla. Llegará un instante en que el campo tenga un valor tal que $F_m = F_e$, por lo que se cumplirá:

$$F_m = F_e \Rightarrow qvB = qE \Rightarrow vB = E$$

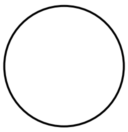
Además, a partir de este instante, tendremos una diferencia de potencial entre los extremos de la barra, y por tanto la fuerza electromotriz inducida por el campo magnético dada por:

$$\Delta V = El = vBl$$

4.4.5. Inductancia

1) Coeficiente de autoinducción (L)

Calculamos el flujo magnético que atraviesa una espira circular (circuito cerrado) debido al campo que ella misma crea debido a la corriente I que circula a través de ella:



$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2\left(R^2 + y^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\phi = \pi R^2 B_{x=0} = \pi R^2 \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu_0 \pi R}{2} I = LI$$

Este es un resultado general, el flujo a través de un circuito cerrado lo podemos escribir como el producto de la corriente *I* que lo atraviesa por un factor *L* llamado **coeficiente de autoinducción** y que depende de la geometría del circuito. La unidad de inductancia es el henrio.

Cuando la intensidad de corriente del circuito varía, el flujo magnético debido a la corriente también se modifica y, por tanto, en el circuito se induce una fem. Como la autoinducción del circuito es constante, la variación del flujo está relacionada con la variación de intensidad por:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$

Según esta expresión, un ***inductor*** es un elemento diseñado para oponerse a cualquier variación en la corriente que circula por un circuito.

2) Coeficiente de inducción mutua (M)

Cuando tenemos dos circuitos próximos el flujo magnético que atraviesa cada uno de ellos depende del campo que crea el propio circuito, por tanto de su corriente, y del campo que crean los circuitos adyacentes, por tanto de la corriente que atraviesa los circuitos vecinos. En este caso podemos escribir para el flujo que atraviesa cada circuito:

Circuito 1 ***Circuito 2***

Flujo magnético que atraviesa el circuito 1:

$$\phi_1 = L_1 I_1 + M_{12} I_2$$

Flujo magnético que atraviesa el circuito 2:

$$\phi_2 = L_2 I_2 + M_{21} I_1$$

Siendo M_{12} y M_{21} los coeficientes de inducción mutua, cumpliéndose $M_{12} = M_{21}$.