

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

Inducción Electromagnética 4º Año

Física

fisica.ips.edu.ar
www.ips.edu.ar

Cód- 7406-16

Ignacio Tabares
Juan Farina



Dpto. de Física

Masterización: RECURSOS PEDAGOGICOS

Capítulo 4

Inducción electromagnética

En capítulos anteriores estudiamos como una distribución de carga (estática) genera un campo eléctrico, cuya propiedad más importante, es que se trata de un campo conservativo. Luego mediante dispositivos que convierten energía química a eléctrica (por ejemplo una batería), conseguíamos que en un circuito compuesto de resistencias, y quizás otros elementos, circule corriente. Estos dispositivos, capaces de entregar energía eléctrica, los denominamos *fem* (*fuerza electromotriz*), y estaban definidos por el trabajo, que hacía el dispositivo, por unidad de carga.

En este capítulo estudiaremos como podemos generar una *fem* pero de origen magnético. En conclusión, se verá bajo que condiciones, un campo magnético, puede generar un campo eléctrico capaz de movilizar cargas libres dentro de un conductor.

Sin duda, este tema, es uno de los más importantes en toda la física. Sin embargo existen dos razones que es necesario destacar: toda la producción de energía eléctrica actual, se basa en dispositivos que trabajan mediante el principio de *inducción electromagnética* (salvo, claro está, la creada por baterías, pilas, etc.). La segunda razón es que la creación de un campo eléctrico a partir de un campo magnético, justifica, junto con la Ley de Ampère-Maxwell, la existencia de Ondas Electromagnéticas, soporte, hoy día, para todos los fenómenos de transmisión de información: radio, TV, Internet, teclados inalámbricos, etc.

Se presentará la ley de Faraday-Lenz, que describe la *fem* inducida en un circuito a partir de un campo magnético variable en el tiempo. Esta ley describe, además, que los campos eléctricos inducidos, mediante campos magnéticos variables, son no conservativos.

1. Flujo Magnético

Antes de comenzar a describir la ley de Faraday, necesitamos comprender el concepto de flujo. Imaginemos, en primer medida, un ventilador que crea una corriente de aire y en frente se coloca un molinete, tal como muestra la Figura 1.

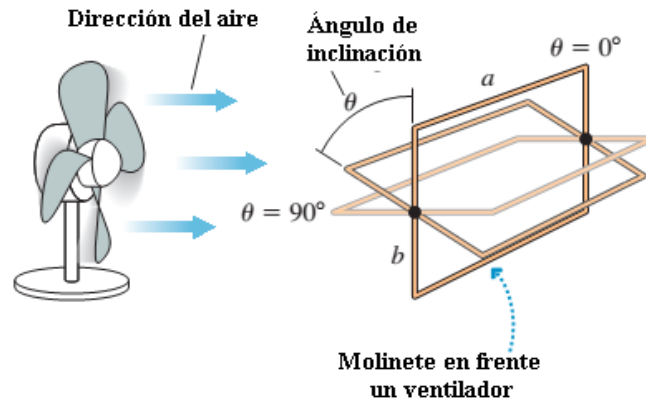


Figura 1. Un ventilador produce una corriente de aire que atraviesa un molinete ubicado justo en frente.

La cantidad de aire que pasa por cada una de las caras del molinete no es el mismo. Es decir, el flujo de aire dependerá no solo del aire producido por el ventilador y del área de las caras, sino también de como esté orientado el molinete. La Figura 2 muestra la misma situación, en una vista diferente.

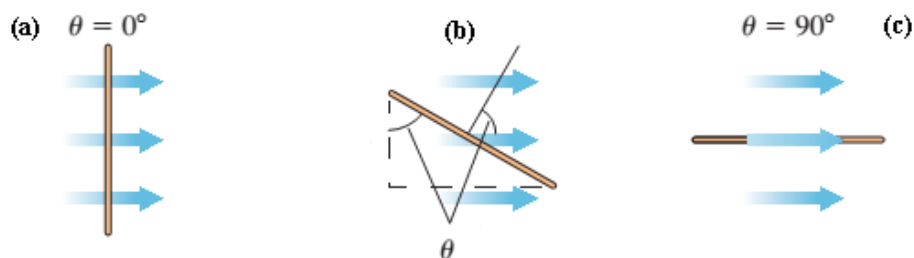


Figura 2. El flujo efectivo que atraviesa cada cara del molinete depende de la orientación de cada cara.

Para calcular el flujo de aire que realmente atraviesa cada cara, debemos tener en cuenta el ángulo que forma la cara con la dirección del aire. Si denotamos con la letra F a la cantidad de aire que sale del ventilador y A al área de cada cara, podremos calcular el flujo de aire en (a) como $F.A$, en (c) no tendremos flujo de aire y en una situación genérica como en (b) tendremos:

$$\phi = F.A.\cos \theta$$

Este concepto es extensivo a cualquier campo vectorial (eléctrico, magnético, etc), para poder calcular, cuanto campo atraviesa una determinada superficie. En este orden, el flujo magnético, será la cantidad de campo magnético que atraviesa una determinada superficie en el espacio. Análogamente a la Figura 2, se encuentra la Figura 3, donde el aire es reemplazado por el campo magnético (con las salvedades de que el campo magnético no tiene existencia material).

Inducción Electromagnética

Física

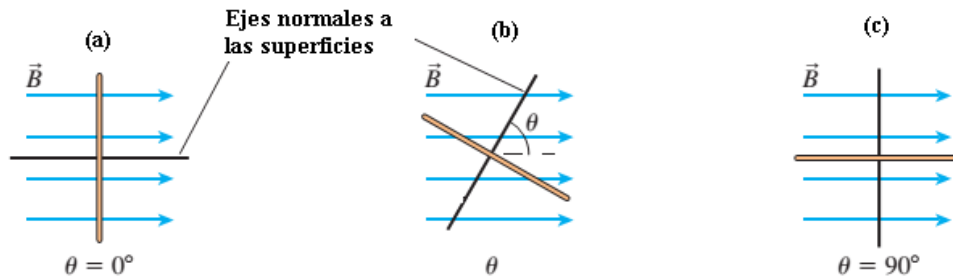


Figura 3. Flujo magnético a través de una superficie.

En este caso el flujo del campo magnético, podrá ser calculado como:

$$\phi = B.A.\cos\theta$$

Es posible definir un vector llamado “vector superficie”, tal como se muestra en la Figura 4. Su dirección es siempre perpendicular a la superficie y su módulo coincide con el área:

$$|\vec{S}| = A$$

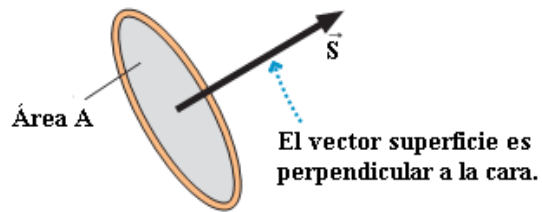


Figura 4

De esta forma el flujo magnético a través de una superficie arbitraria puede escribirse como el producto escalar entre el campo magnético \vec{B} y el vector \vec{S} . La Figura 5 muestra la situación planteada.

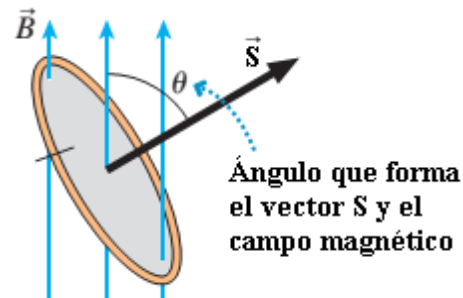


Figura 5. Flujo magnético a través de una superficie

Así el flujo magnético queda determinado por:

$$\phi = \vec{B}\vec{S} \quad (1)$$

$$\phi = BS \cos\theta$$

La unidad del flujo magnético será:

$$[\phi] = [B][A] = Tm^2 = Wb \quad (\text{Weber})$$

Si el campo no es uniforme, o la superficie no es plana, no podremos aplicar la expresión (1) para calcular el flujo. Por otro lado, muchas veces será necesario calcular el flujo magnético que atraviesa un conductor, por ejemplo, una espira.

Si el campo magnético, o el área, varía en el tiempo, se puede observar que tendremos un flujo variable en el tiempo.



2. Ley de Faraday-Lenz y Corrientes Inducidas.

En 1831, Michael Faraday demostró experimentalmente que se produce, mediante el fenómeno de inducción, una corriente eléctrica en un circuito cuando se lo somete a la acción de un campo magnético que varía con el tiempo. Además, la corriente “*inducida*” circula por el circuito, siempre y cuando, exista la variación del campo magnético. Esto se puede expresar de la siguiente forma: “*Si se induce una corriente, en un circuito, podremos suponer que, en el circuito, ha aparecido un generador de corriente, o bien, en el circuito se ha generado una fem inducida*”

La fem inducida está asociada a la variación del flujo magnético a través del circuito, y su valor está determinado por la ley de Faraday. **Por lo tanto, un campo magnético variable induce una fem.**

Es posible hacer una serie de experiencias que demuestran estas descripciones realizadas por Faraday. La Figura 6 muestra una experiencia que consiste en una espira cuyos extremos están conectados a un amperímetro para detectar la circulación de corriente. Con este instrumento podremos detectar si hay corriente inducida.

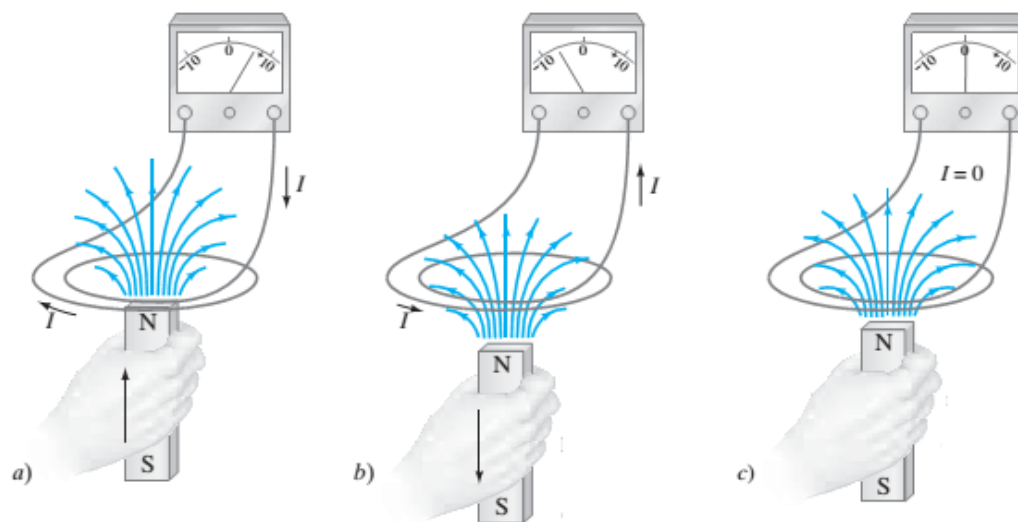


Figura 6. Un imán se lo mueve cerca de una espira. En. (a) el imán se lo mueve hacia arriba y en (b) hacia abajo la hora. En (c) el imán se encuentra inmóvil.

En el caso (a) el imán se está moviendo hacia arriba de la hoja, el aumento de flujo sobre la espira, produce una corriente inducida en el circuito que detecta el instrumento. Note la lectura del instrumento, quién acusa un valor positivo de corriente. Sin embargo cuando el imán se mueve hacia abajo, caso (b), el flujo que

Inducción Electromagnética

Física

atraviesa la espira, comienza a disminuir. Se observa en este caso, la generación de una corriente inducida, no obstante, el sentido de circulación es opuesto al del caso anterior. Por último, en (c), el imán se encuentra inmóvil produciendo un flujo en la espira, pero no existe ninguna corriente inducida en el circuito, pues no hay variación de flujo magnético en este último.

Se establece entonces que, la causa que produce una corriente inducida en un circuito, no es la existencia de flujo magnético, sino la presencia de **flujo magnético variable en el tiempo**. Podemos enunciar, luego de estas experiencias, la ley de Faraday.

Ley de Faraday-Lenz: “La fem inducida, ε_{ind} , en un circuito está relacionada con la variación en el tiempo del flujo magnético a través del circuito, y se opone a la causa que la produjo”. Expresada en lenguaje matemático:

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Si bien, Faraday describió la existencia de fem inducida frente a la presencia de flujo magnético variable, fue Lenz, quién agregó el signo *menos* a la expresión (2), ya que predijo que la fem inducida se oponía a la causa que la produjo.

Una corriente producida por una fem inducida circula en una dirección de manera que, el campo magnético generado por esa corriente, se opone a la variación de flujo. Vuelva a la Figura 6 y observe los sentidos de las corrientes inducidas, observe los campos magnéticos inducidos por esas corrientes.

Debido a que la unidad de medida de la fem es el volt (V), cuando el flujo se mide en webers (Wb) y el tiempo en segundos (s), tenemos que: $V = \frac{Wb}{s}$.

En el caso que estemos estudiando una bobina, compuesta por N espiras (vueltas de alambre) el flujo magnético total estará dado por:

$$\phi_T = N\phi$$

Podremos calcular la fem inducida, en este caso, como:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$



Vale observar como la existencia de N vueltas, genera un efecto multiplicador en la fem inducida, y por lo tanto, en la corriente inducida en el circuito.

Ahora bien, ¿bajo qué condiciones podría variar el flujo en un circuito? Existen tres causas, que estudiaremos en este curso, que podrían generar un flujo variable, éstas son:

1. Un campo magnético que varíe en el tiempo, es decir, un $\vec{B}(t)$. En este caso podremos expresar el flujo como:

$$\phi = \vec{B}(t) \cdot \vec{S}$$

y la fem inducida como:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\Delta(BS \cos \theta)}{\Delta t} = -NS \cos \theta \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

2. Por un cambio en el área donde se encuentra el flujo magnético, es decir, que el área varíe en función del tiempo. En este caso podremos expresar la fem inducida como:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\Delta(BS \cos \theta)}{\Delta t} = -NB \cos \theta \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

3. El ángulo que forma el campo magnético con la superficie varía en función del tiempo. Es decir, la espira se encuentra rotando en el campo magnético, de modo que se obtiene un flujo variable. En éste último caso:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\Delta(BS \cos \theta)}{\Delta t} = -NBS \frac{\Delta(\cos \theta)}{\Delta t}$$

En cualquiera de los tres casos estudiados, existirá una fem inducida en el circuito y, por ende, una corriente inducida (si se constituye un circuito cerrado). Las diversas aplicaciones tecnológicas que trabajan mediante este principio físico, usan algún mecanismo relacionado con algunos de éstos tres casos para producir una variación de flujo magnético.

Por ejemplo las antenas para la recepción de TV o de FM funcionan gracias al primer caso, mediante campos electromagnéticos variables en el espacio. En cambio los generadores de corriente alterna basan su funcionamiento en que las espiras que lo conforman roten, por la acción de una fuerza mecánica, en el campo magnético producido por un imán, que se corresponde con el caso 3.

Inducción Electromagnética

Física

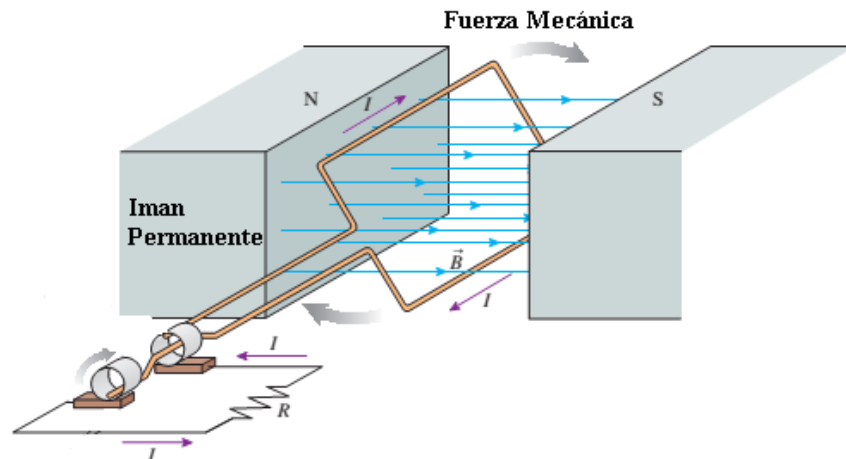
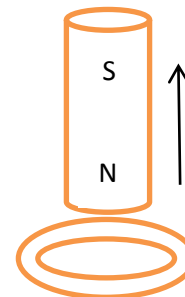


Figura 7. Un generador de corriente basa su principio de funcionamiento en la *inducción electromagnética*. La fuerza mecánica (producida por el movimiento hidráulico, eólico, etc) produce una variación de flujo en la espira, lo que genera una fem inducida y, por último, una corriente circulante.

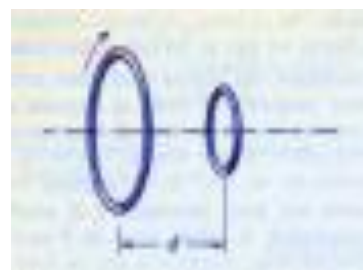


Problemas y preguntas

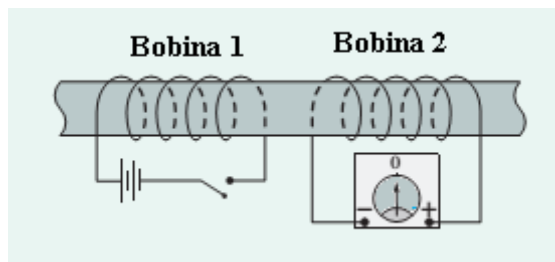
- 1) El polo norte de un imán se mueve alejándose de un anillo metálico como muestra la figura.
- ¿Habrá corriente inducida en el anillo?
 - ¿Qué sentido tendrá la corriente en el anillo si tu respuesta anterior fue afirmativa?



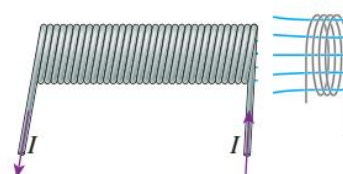
- 2) Dos anillos conductores están frente a frente separados por una distancia d . Un observador mira a lo largo del eje común. Si se hace pasar una corriente en el sentido de las agujas del reloj repentinamente en el anillo grande,



- ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en el anillo pequeño?
 - ¿Cuál es la dirección de la fuerza (si es que hay alguna) que actúa en el anillo más chico?
- 3) a) Inmediatamente después de cerrar el interruptor en la bobina 1- ¿Circulará corriente por el circuito de la bobina 2? Si es así indica el sentido.
b) Responde la pregunta anterior para el caso de pasado un tiempo después de haber cerrado el interruptor.
c) Responde para el caso de que inmediatamente se abra el interruptor.



- 4) Un solenoide por el que circula corriente se mueve hacia el anillo conductor. ¿Cuál es la dirección de la corriente en el anillo si dirigimos la vista hacia él como se ve en la figura?

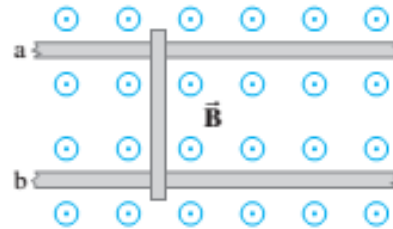


Inducción Electromagnética

Física

- 5) Se hace una bobina con 100 vueltas de alambre de cobre asilado, enrolladas sobre un cilindro de hierro cuya sección transversal es de $0,001 \text{ m}^2$ y se conecta con una resistencia. La resistencia total en el circuito es de 10Ω . Si la inducción magnética longitudinal en el hierro cambia de 1 weber/m^2 en un sentido a 1 weber/m^2 en sentido contrario, ¿Qué cantidad de carga fluye por el circuito?
- 6) 50 espiras apretadas rectangulares conforman un bobinado, que se encuentra sobre una mesa, colocadas horizontalmente de modo que las atraviesa un campo magnético uniforme de 10^4 G . Las espiras tienen las dimensiones de 5 cm por 10 cm . Si en un intervalo de tiempo de 10 s pasan de la posición horizontal a una posición que forma un ángulo de 30° con la horizontal, explica que sucede y calcula la fem inducida. Si la resistencia del bobinado es de 10Ω ¿cuál será la corriente inducida en la bobina?

- 7) La figura muestra una barra conductora de longitud l y de resistencia R . La misma está sumergida en un campo magnético uniforme B . En un determinado momento la barra se mueve hacia la derecha de la hoja con velocidad v .



- a) Explica y cuantifica que sucede sobre la barra cuando ésta se desliza sobre rieles hacia la derecha con velocidad constante v .
- b) Si se unen los puntos a y b por un alambre conductor, se establece una corriente inducida.
- c) Suponiendo que $l = 30 \text{ cm}$, $R = 10 \Omega$, $B = 0,1 \text{ weber/m}^2$ y la velocidad de 10 m/s , calcula la fem inducida y la corriente inducida en el circuito.
- 8) Al unir los puntos a y b por un cable conductor, la barra del problema anterior desliza sin rozamiento por la guía metálica de ancho 30 cm formando un circuito cerrado. Supone ahora que el campo magnético apunta hacia afuera del papel.. Calcular:
- La magnitud y sentido de la fem inducida en la barra cuando se mueve hacia la derecha a una velocidad de 10 m/s .
 - La fuerza necesaria para mantener la barra en movimiento con la velocidad de 10 m/s .
 - La energía mecánica cedida al circuito por unidad de tiempo y la energía disipada en forma de calor por segundo en la resistencia del circuito.
- 9) Un tren se mueve sobre rieles separados $1,6 \text{ m}$ a una velocidad de 300 km/h . si la componente vertical del campo magnético terrestre es de $0,37 \text{ G}$. calcular la fem inducida en los ejes de la rueda.