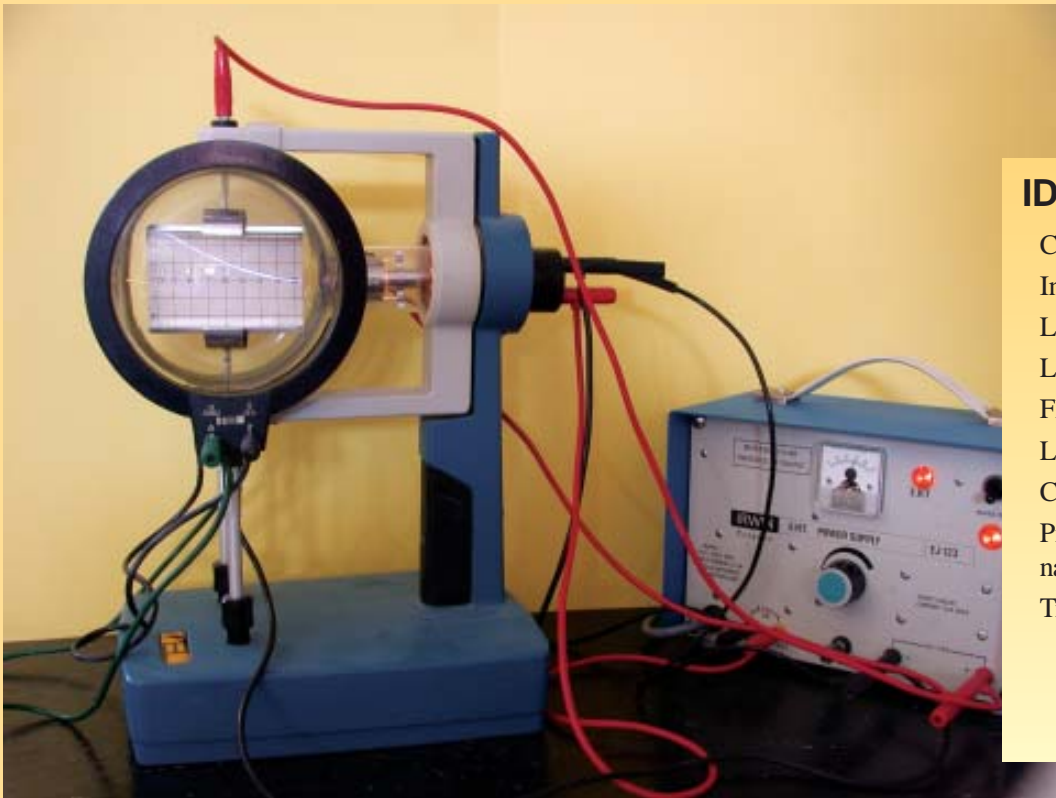


2

INTERACCIÓN MAGNÉTICA



IDEAS PRINCIPALES

- Campo magnético
- Inducción magnética
- Ley de Ampère
- Ley de Lorentz
- Flujo magnético
- Ley de Faraday-Lenz
- Corrientes de Foucault
- Producción de corrientes alternas
- Transformadores

En la unidad anterior nos hemos referido a las interacciones producidas por cargas en reposo. En esta unidad, después de un breve repaso de las magnitudes que se utilizan para describir la corriente continua, analizaremos fenómenos que son atribuidos a las interacciones producidas por cargas en movimiento. Las cargas en movimiento, ya sean aisladas o formando una corriente eléctrica producen campos magnéticos que a su vez actúan sobre otras cargas siempre que también estén en movimiento.

Te puedes hacer una clara idea de la importancia de estos fenómenos en la sociedad actual si piensas que los motores eléctricos, la producción de la corriente alterna y la generación de ondas electromagnéticas está relacionado con los campos magnéticos.

A.1.- a) Dibuja una bombilla, en la que quede claro a qué puntos está unido el filamento interior, y completa el dibujo con una pila y dos cables conectados de tal forma que brille la bombilla.

b) ¿Qué papel juega la pila?

Para que por un circuito circule una corriente eléctrica debe estar cerrado. La corriente eléctrica la interpretamos como un movimiento de partículas que tienen la propiedad de tener carga eléctrica neta (electrones en los metales e iones en los electrolitos).

Las hipótesis en las que se basa el modelo de corriente eléctrica son:

a) La carga total permanece constante: la pila no proporciona carga al circuito. Las cargas no se gastan en el circuito.

b) La energía total permanece constante. La pila aporta energía a los electrones que estos pierden en los diferentes dispositivos del circuito.

Para describir la corriente eléctrica se utilizan magnitudes como la intensidad de corriente, la diferencia de potencial (también llamada tensión o voltaje), la potencia y la resistencia de los aparatos que se utilizan.

INTENSIDAD DE CORRIENTE es una magnitud que se utiliza para medir la cantidad de carga que pasa por una sección del circuito en cada segundo. Su unidad en el SI es el amperio (A), que es el valor de la intensidad cuando por la sección del conductor pasa una carga de un culombio en cada segundo.

VOLTAJE O DIFERENCIA DE POTENCIAL (ddp) entre dos puntos de un circuito es la diferencia entre los valores de energía potencial eléctrica que tiene una unidad de carga entre un punto y el otro. Su unidad en el SI es el voltio (V). Entre dos puntos de un circuito existe una ddp de un voltio, cuando la diferencia entre los valores de la energía de una carga de un culombio en esos dos puntos es de un julio.

Para que se pueda establecer una corriente es siempre necesario que exista un voltaje entre los extremos del conductor, pero puede que entre dos puntos exista una diferencia de potencial y no exista corriente, ya que es necesario que haya conexión entre los dos puntos para que pueda haber corriente.

La diferencia de potencial es la causa que provoca la corriente, y la intensidad es el efecto producido por la diferencia de potencial. La relación entre estas magnitudes se conoce como **ley de Ohm**:

$$I = \frac{V_A - V_B}{R}$$

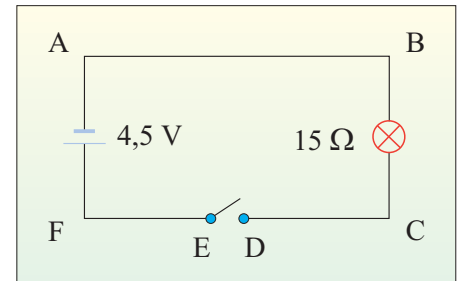
$1/R$ es la constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes. A R se le llama resistencia del conductor entre los puntos A y B y es una característica del mismo que depende de su longitud, grosor y el tipo de material que lo constituye. Su unidad en el SI es el ohmio (Ω).

A.2.- Cuando conectamos una bombilla a una tensión de 220 V circula por ella una corriente de 0,4 A. ¿Cuál es la resistencia de la bombilla? ¿Y si la conectamos a 125 V?

$$R = 550 \Omega; \text{ la misma;}$$

A.3.- En el circuito de la figura:

- ¿Cuál es el valor de la intensidad en el punto C?
- ¿Cuál es el valor de la *ddp* entre los puntos B y C?
- ¿Cuál es el valor de la *ddp* entre los puntos D y E?
- Responde a las preguntas anteriores si se unen los puntos D y E.
 - $I_C = 0$; b) $V_B - V_C = 0$; c) $V_D - V_E = 4,5 \text{ V}$
 - $I_C = 0,3 \text{ A}$; $V_B - V_C = 4,5 \text{ V}$; $V_D - V_E = 0$



Aclaraciones terminológicas

A veces se utilizan de manera confusa los términos fuerza electromotriz (*fem*) y diferencia de potencial. Ambos representan la diferencia de energía potencial eléctrica que tiene la unidad de carga entre dos puntos. Sin embargo, en el caso de la *fem* esa diferencia de energía se ha provocado porque ha existido una conversión de energía química o mecánica en energía potencial eléctrica, mientras que la *ddp* se refiere al caso más general de que la unidad de carga tenga más o menos energía potencial en un punto que en otro. Lo que debe ocurrir en todo circuito es que la energía aportada al mismo, es decir, $q \cdot \varepsilon$, sea igual a la energía transformada en el mismo a lo largo de todo el circuito.

Generalmente no coincide la *fem* de una pila y la *ddp* entre sus polos. Parte de la energía transformada en energía eléctrica en el generador de corriente no es posible suministrarla al circuito pues se transforma por diferentes causas, fundamentalmente se calienta (efecto Joule), en el interior de la pila. De esa forma, el voltaje en los bornes de la pila será algo menor que su fuerza electromotriz. De todas formas muchas veces consideramos pilas ideales, es decir, pilas que no se calientan cuando funcionan, por lo que los valores anteriores coincidirían.

Aunque por sencillez representemos la *fem* por una letra, ε , o la *ddp* por V , esas magnitudes **siempre representan una diferencia y nunca un valor absoluto**.

1.1 Potencia eléctrica

Como en un circuito eléctrico hay conversión de energía eléctrica en energía de otros tipos, la potencia (energía transformada en la unidad de tiempo en un elemento cualquiera del circuito) puede calcularse como el producto de la intensidad y el voltaje entre los extremos de ese elemento:

$$P = IV$$

Si queremos calcular la potencia transformada en un generador utilizaremos la *fem* del mismo en lugar del voltaje. Teniendo en cuenta la ley de Ohm, podemos decir que la potencia de un elemento del circuito de resistencia R , es:

$$P = I^2 R$$

EJEMPLO

En la figura las tres bombillas son idénticas. Se quita la bombilla 3 y no se pone nada en su lugar. ¿La bombilla 2 brillará más, menos o igual que antes? ¿Y la bombilla 1?

El brillo de una bombilla está relacionado con la potencia, es decir, con el producto de la intensidad por el voltaje entre sus extremos:

$$P = I V = I^2 R$$

* Antes de quitar B_3 la resistencia equivalente es $R_e = R_1 + R_p$ donde R_p es la resistencia equivalente de las bombillas 2 y 3:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R}; \quad R_p = \frac{R}{2}; \quad R_e = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2}R$$

La intensidad de corriente total que recorre el circuito será, según la ley de Ohm: $I_T = \frac{V}{R_e} = \frac{V}{\frac{3}{2}R} = \frac{2}{3} \frac{V}{R}$

Esta corriente se divide en las dos ramas y por cada una pasa una corriente de intensidad mitad de la total ya que ambas tienen idéntica resistencia:

$$I_2 = \frac{1}{3} \frac{V}{R}$$

Conociendo la intensidad de corriente que pasa por cada bombilla y su resistencia podemos calcular la potencia para cada una:

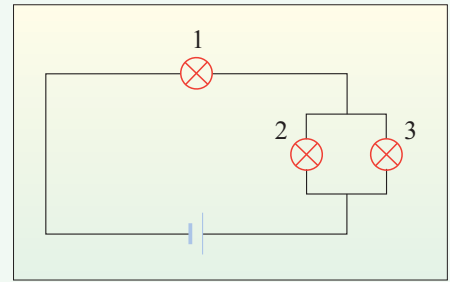
$$P_1 = \left(\frac{2}{3} \frac{V}{R}\right)^2 R = \frac{4}{9} \frac{V^2}{R} = 0,44 \frac{V^2}{R} \quad P_2 = \left(\frac{1}{3} \frac{V}{R}\right)^2 R = \frac{1}{9} \frac{V^2}{R} = 0,11 \frac{V^2}{R}$$

* Después de quitar B_3 , la resistencia equivalente es $R_e = R + R = 2R$; y la intensidad de la corriente para ambas bombillas será: $I = \frac{1}{2} \frac{V}{R}$

De nuevo calcularemos las potencias para comparar con las anteriores:

$$P_1 = \left(\frac{1}{2} \frac{V}{R}\right)^2 R = \frac{1}{4} \frac{V^2}{R} = 0,25 \frac{V^2}{R} \quad P_2 = \left(\frac{1}{2} \frac{V}{R}\right)^2 R = \frac{1}{4} \frac{V^2}{R} = 0,25 \frac{V^2}{R}$$

Como conclusión, vemos que la potencia de la bombilla 1 ha disminuido, por lo que ahora brillará menos, mientras que la de la bombilla 2 ha aumentado por lo que ahora brillará más.



A.4.- Dibuja un circuito formado por dos resistencias, una de 300 y otra de 200 ohmios, conectadas en serie y una pila. La intensidad que circula por el circuito es de 20 mA.

- ¿Cuál es valor de la *ddp* en los extremos de la resistencia de 200 Ω ?
- ¿Cuál es la *fem* de la pila?
- ¿Cuál es la potencia eléctrica suministrada por la pila?
- ¿Cuánta energía se transforma en 5 s en la resistencia de 300 Ω ?

$$a) V_{200} = 4 \text{ V}; \quad b) \varepsilon = 10 \text{ V}; \quad c) P = 0,2 \text{ W}; \quad d) E = 0,6 \text{ J}$$

A.5.- ¿Qué intensidad circularía por cada resistencia si en el circuito anterior estuviesen conectadas en paralelo?

$$I_1 = 33,3 \text{ mA}; \quad I_2 = 50 \text{ mA}; \quad I_{total} = 83,3 \text{ mA}$$

2

LA INTERACCIÓN MAGNÉTICA

Hablamos de interacción magnética para describir los fenómenos magnéticos, las atracciones o repulsiones que se producen entre cuerpos como los imanes. Las interacciones entre imanes son los fenómenos de este tipo conocidos de más antiguo. Materiales tales como el mineral magnetita o el hierro presentan propiedades magnéticas cuando están imantados.

Cada imán tiene dos polos, que se conocen como polo norte y polo sur. Polos iguales se repelen mientras que polos diferentes se atraen. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con las cargas eléctricas, nunca se han podido separar los dos polos magnéticos, de manera que si se rompe un imán lo que tenemos son dos imanes, cada uno de ellos con un polo norte y un polo sur.

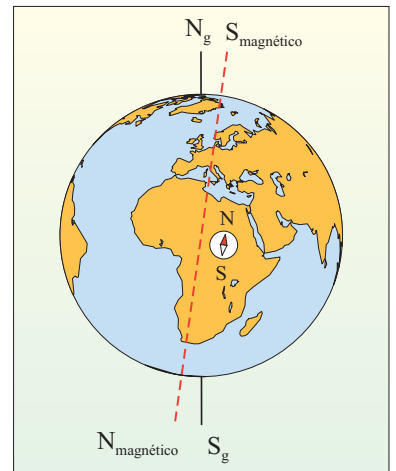
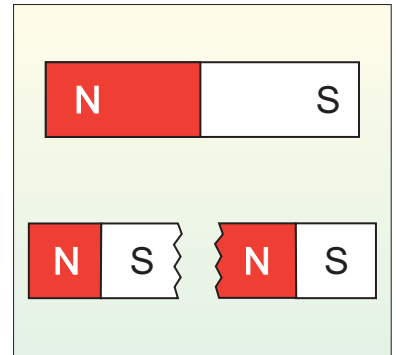
La **brújula** es un pequeño imán que puede girar libremente respecto a un eje que pasa por su centro. Sabemos que la brújula se orienta siempre señalando hacia un mismo lugar. Esto se interpreta suponiendo que la Tierra se comporta como un imán cuyo polo sur magnético está cercano al polo norte geográfico, y cuyo polo norte magnético está cercano al polo sur geográfico.

El polo sur magnético se encuentra a unos 1500 km del polo norte geográfico. La diferencia angular entre el norte magnético y el norte geográfico se denomina **declinación magnética** y su valor depende del punto en el que nos encontremos.

El campo magnético no es paralelo a la superficie de la Tierra en todos los puntos. El ángulo que forma el campo magnético terrestre con la horizontal se llama **inclinación magnética**.

Si acercamos un imán a la brújula, ésta se orienta siguiendo al imán más que al campo magnético terrestre. Se debe a que el campo magnético terrestre es bastante débil y el campo producido en sus proximidades por un imán pequeño es bastante superior.

El magnetismo tuvo un desarrollo importante a partir de 1820 cuando Ørsted comprobó por primera vez que **una corriente eléctrica se comporta como un imán**. El hecho de poder crear imanes cada vez más potentes con la corriente eléctrica facilitó su uso en la industria y su uso doméstico.



A.6.- Realización de experiencias para comprobar cualitativamente que una corriente eléctrica se comporta como un imán.

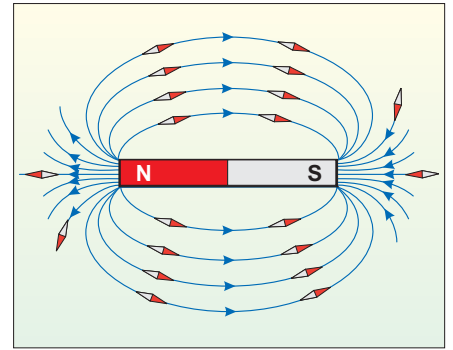
- Dibuja un solenoide o bobina. ¿En qué consiste ese dispositivo?
- ¿Se comporta un solenoide como un imán cuando por él no pasa corriente?
- Conecta el solenoide a una pila o fuente de tensión de forma que pase corriente. Dibuja el circuito construido. ¿Se comporta como un imán? ¿Atrae a un imán permanente por los dos polos? ¿Se pueden identificar los dos polos de un electroimán?
- ¿Qué ocurre al cambiar los polos de la pila a los que está conectado el electroimán?

2.1 El campo magnético

De manera análoga a como se hizo con los campos eléctrico y gravitatorio, se define el campo magnético como aquella región del espacio en la que se ponen de manifiesto los efectos magnéticos. Los campos magnéticos se representan convencionalmente por líneas de fuerza que salen del polo norte y entran por el sur. Son líneas cerradas, sin principio ni fin.

Para saber si en un punto existe un campo magnético colocamos en ese punto un imán o una corriente eléctrica (que hemos visto que se comporta como un imán) y vemos si sobre ellos se ejerce alguna fuerza. Si colocamos una pequeña aguja imantada móvil (que pueda girar) en un punto de un campo magnético se orientará de forma que el eje de esa aguja sea tangente a la línea de fuerza en ese punto.

A.7.- Representación del campo magnético producido por un imán mediante la disposición que adoptan las limaduras de hierro.



La magnitud que se utiliza para cuantificar los efectos del campo magnético es la **inducción magnética, B** . También se le llama **densidad de flujo magnético**.

Su unidad en el SI es el **tesla (T)**, también llamado weber/metro cuadrado (Wb/m^2).

Un submúltiplo es el **gauss (G)**, de forma que 1 tesla equivale a 10^4 gauss.

El valor aproximado del campo magnético terrestre es 0,5 G, o de $0,5 \cdot 10^{-4}$ T. Con electroimanes potentes (bobinas con un núcleo de hierro dulce) pueden conseguirse campos magnéticos de varios teslas.

Conviene señalar que el magnetismo corresponde al estudio de las interacciones entre cargas en movimiento. Así, un campo magnético es creado por una corriente eléctrica (partículas cargadas que se mueven) y actúa sobre otras corrientes eléctricas (que son cargas en movimiento).

Como conclusión, podemos decir que una carga eléctrica crea siempre a su alrededor un campo eléctrico E y un campo magnético B si es móvil respecto a un observador (depende por tanto del sistema de referencia que se utilice). Por ello la interacción entre cargas eléctricas se interpreta mediante la existencia de un **campo electromagnético** caracterizado por los vectores E y B .

La **inducción magnética B** juega en el campo magnético un papel similar al que juega la intensidad de campo E o g en los campos eléctricos o gravitatorio.

La **intensidad de campo magnético H** es otra magnitud que se utiliza para caracterizar el campo magnético. No la estudiaremos este curso.

2.3 Valores de campos magnéticos creados por distintos elementos. Ley de Ampère

Campo magnético creado por una corriente rectilínea

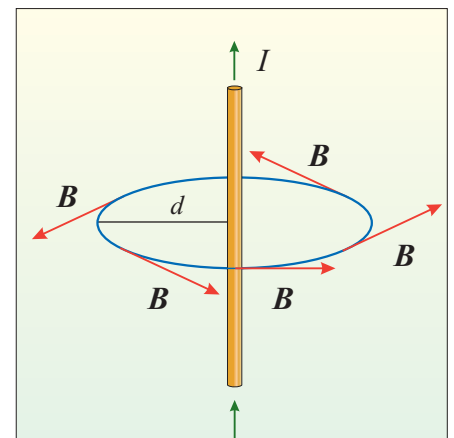
Un conductor por el que circula una corriente de intensidad I crea a su alrededor un campo magnético. El módulo de la inducción magnética a una distancia d responde a la siguiente expresión:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d}$$

Donde μ es la permeabilidad magnética, constante que depende del medio donde se crea el campo. En el vacío y en el aire su valor es $4\pi \cdot 10^{-7}$ Wb/Am.

El vector inducción magnética está contenido en un plano normal al conductor, su dirección es tangente a la circunferencia centrada en el conductor que pasa por ese punto y su sentido viene determinado por la regla del tornillo de modo que éste avance como lo hace la corriente.

Las líneas de campo son circunferencias concéntricas cerradas situadas en un plano normal al conductor y con centro en él.

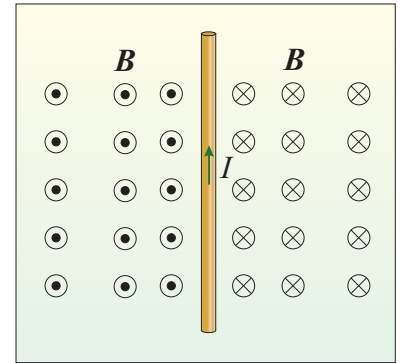


Campo magnético creado por un conductor rectilíneo a una distancia d .

Representación gráfica simplificada de un vector cuya dirección es perpendicular a la superficie del papel donde se dibuja.

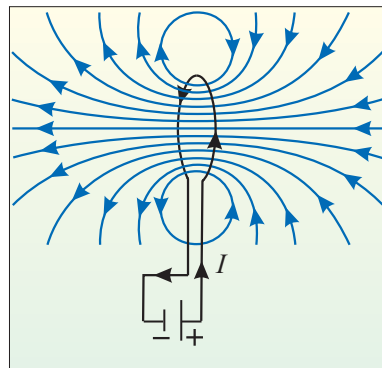
Cuando se quiere representar al campo magnético con una dirección normal al papel donde se dibuja, se coloca un círculo con un punto central, si el campo «sale» del papel, o con una aspa, si «entra» en el papel.

A la izquierda del conductor del dibujo adjunto el campo sale del papel mientras que a la derecha el campo entra. Puesto que el campo disminuye con la distancia al conductor por el que circula corriente, se han representado las señales más próximas en las cercanías del conductor y más alejadas a mayor distancia del conductor.



Campo magnético creado por una corriente circular (en su centro)

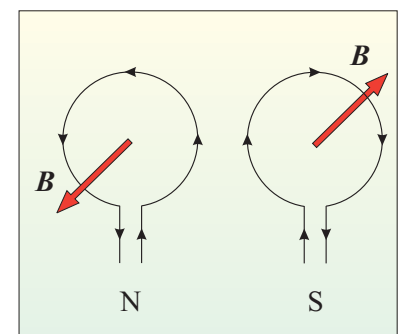
Una espira es un conductor «casi cerrado» y según la forma se puede distinguir entre espiras circulares, rectangulares, cuadradas, etc. Cuando por la espira hay una corriente eléctrica se crea un campo magnético cuyas líneas de campo se representa en la figura siguiente. El valor de la inducción magnética es diferente en cada punto siendo máximo en el centro de la espira.



Una espira se comporta como un imán con el polo norte en la cara por la que «sale» el vector B y el polo sur en la cara por la que «entra» el vector B .

La inducción magnética **en el centro de la espira** es normal al plano en el que está contenida la espira y su sentido viene determinado por la regla del tornillo. Si la espira tiene un radio r y circula por ella una corriente de intensidad I , el módulo del campo magnético en su centro es:

$$B = \frac{\mu I}{2 r}$$



Campo magnético creado en el centro de una espira.

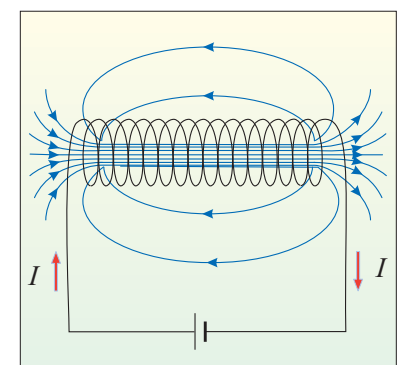
Campo magnético creado por un solenoide o bobina

En el interior de un solenoide, por el que circula una corriente de intensidad I , el campo magnético es prácticamente uniforme y su módulo viene dado por:

$$B = \frac{\mu n I}{L}$$

La variable n representa el número de espiras que componen la bobina y L es la longitud de la misma.

Como puede observarse en el dibujo, la dirección del campo magnético es la del eje de la bobina y el sentido es el del avance de un tornillo que gire como lo hace la corriente al atravesar las espiras de la bobina. El campo en el exterior disminuye muy rápidamente y sus efectos son por lo tanto poco apreciables.



Campo magnético en el interior de un solenoide

A.8.- a) Calcula la intensidad de campo magnético en el interior de un solenoide de 10 cm de longitud y 500 espiras, en el que circula una corriente de 2 A.

b) ¿Qué intensidad de corriente circula por un conductor rectilíneo que crea un campo de 5 G a una distancia de 2 cm?

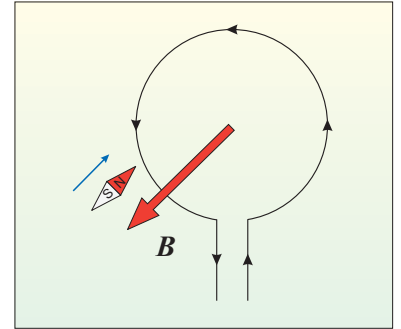
a) $B = 0,0126 \text{ T}$; b) $I = 50 \text{ A}$

A.9.- ¿Qué problemas plantea crear un campo magnético muy intenso con un electroimán? ¿Qué importancia crees que puede tener el descubrimiento de los superconductores?

A.10.- a) ¿Atraerá o repelerá la espira, dibujada en la figura, a un imán que lo acercamos por su polo norte? ¿Atraerá o repelerá el imán a la espira?

b) Colocamos próximas y paralelas dos espiras idénticas por las que circula corriente en el mismo sentido, ¿existirá atracción o repulsión entre las espiras?

¿Y si las corrientes circulan en sentidos contrarios en ambas espiras?



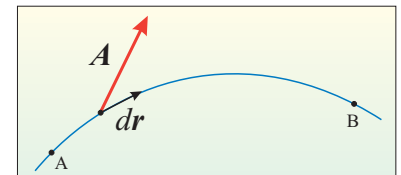
Ley de Ampère (teorema de Ampère)

La circulación de un vector A entre dos puntos a lo largo de una trayectoria se define como la integral del producto escalar del vector A y el elemento de trayectoria dr a lo largo de la línea que une los puntos A y B.

$$\text{circulación} = \int_A^B \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r}$$

Si el vector es una fuerza, la circulación es igual al trabajo. En el caso de un campo conservativo, la circulación entre dos puntos no depende de la trayectoria. Eso supone que la circulación a lo largo de cualquier línea cerrada debe ser nula.

Ampère, físico francés, demostró que en el campo magnético se cumple lo que se conoce como ley de Ampère. El enunciado de esa ley es:



La circulación del vector inducción magnética B a lo largo de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente neta que atraviesa el área que limita la trayectoria.

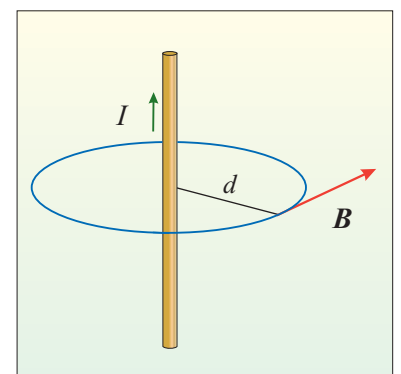
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \Sigma I$$

El interés de esta ley está en la posibilidad de calcular campos magnéticos generados por algunas corrientes eléctricas. Así, las expresiones anteriores para calcular el campo magnético por una corriente rectilínea, o el campo creado por una espira circular o por un solenoide pueden obtenerse aplicando la ley de Ampère.

«Demostración» de la ley de Ampere en un caso particular

Si tenemos en cuenta el valor del campo magnético creado por una corriente rectilínea a una distancia d y que su dirección es en todo momento tangente a la circunferencia que pasa en cada punto, la circulación del campo magnético a lo largo de la trayectoria representada en la figura se puede calcular como sigue:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi d} dr \cos 0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} 2\pi d = \mu_0 I$$



Más que de una «demostración» se trata de una comprobación de que la ley de Ampère se cumple en un caso particular. Pero podemos decir que se cumple en todos los casos.

3 ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE DIVERSAS CORRIENTES

Los campos magnéticos actúan sobre las corrientes eléctricas. También actúan sobre los imanes, pero en realidad es lo mismo, ya que las propiedades de los imanes las hemos explicado a nivel atómico por la existencia de corrientes electrónicas en el interior del imán. Como una corriente eléctrica es un conjunto de cargas en movimiento, los campos magnéticos actúan sobre las cargas que se están moviendo, ejerciendo fuerzas sobre ellas.

3.1 Acción sobre una carga en movimiento

Toda carga móvil en el interior de un campo magnético sufre una fuerza cuyo valor viene dado por la **expresión de Lorentz**:

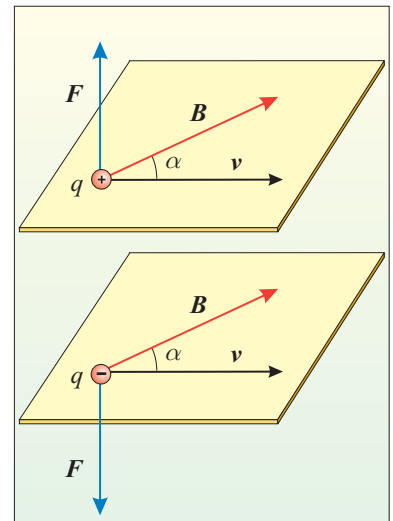
$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \text{ y módulo } F = qvB \sin \alpha$$

La dirección de la fuerza es perpendicular al plano que forman las direcciones de los vectores velocidad y campo magnético.

Si la carga q es positiva, el sentido es el del avance de un tornillo que gire uniendo el vector velocidad sobre el vector campo por el camino más corto posible.

Si la carga es negativa el sentido será el opuesto.

Al ser la fuerza perpendicular a la velocidad la aceleración que produce es siempre normal, es decir, cambia la dirección de la velocidad pero no su módulo.



A.11.- Una partícula con carga q y rapidez v se introduce en un campo magnético B . Calcula el módulo de la fuerza que actúa sobre la partícula cuando:

- La velocidad tiene la misma dirección que el campo magnético.
- La velocidad forma un ángulo de 90° con el campo magnético.
- La velocidad forma un ángulo de 30° con el campo magnético.

a) $F = 0$; b) $F = qvB$; c) $F = 0,5 qvB$

A.12.- En un conductor rectilíneo indefinido la $I = 2 \text{ j A}$.

- Calcula la fuerza que actúa sobre un electrón cuando está a 1 cm del conductor sabiendo que su $\mathbf{v} = 10000 \text{ i m/s}$ acercándose al conductor.
- Repite el cálculo para un protón a 1 cm del conductor cuya $\mathbf{v} = 10000 \text{ j m/s}$.

Realiza dibujos que representen las situaciones descritas.

a) $F = 6,4 \cdot 10^{-20} \text{ j N}$; b) $F = \pm 6,4 \cdot 10^{-20} \text{ i N}$

A.13.- Una partícula de masa m y carga q se introduce en un campo magnético uniforme de intensidad B con velocidad \mathbf{v} perpendicular a la dirección de \mathbf{B} . ¿Qué radio tendrá la órbita descrita? Demuestra que la velocidad angular y el período no dependen de la rapidez con la que entra la partícula en el campo magnético.

$$r = mv/qB$$

A.14.- Un electrón se mueve con una rapidez de 5 000 km/s en un campo magnético cuya inducción magnética es de 8 T y es normal a la velocidad.

a) Haz un dibujo que represente la situación y que incluya la fuerza que actúa sobre el electrón y calcula el módulo de dicha fuerza.

b) ¿Cuál será el radio de la trayectoria que recorrerá el electrón?

c) Calcula el tiempo que tarda en dar una vuelta completa (período).

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

$$F = 6,4 \cdot 10^{-12} \text{ N}; r = 0,00036 \text{ cm}; T = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

El selector de velocidades

La acción conjunta de un campo eléctrico y de un campo magnético puede permitir seleccionar partículas cargadas de una velocidad determinada de un conjunto de partículas con diferentes velocidades.

Supongamos un «chorro» de partículas cargadas con diferentes velocidades que pasa entre dos placas paralelas entre las que hay un campo eléctrico, como el representado en la figura, dirigido de izquierda a derecha. Además hay un campo magnético perpendicular al papel y que sale del mismo.

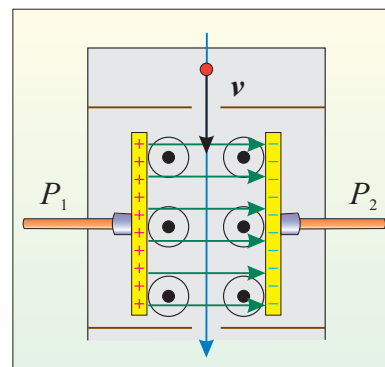
Si suponemos que las partículas tienen carga positiva, sobre cada una se ejerce una fuerza eléctrica dirigida hacia la derecha y una fuerza magnética dirigida hacia la izquierda, cuyo valor depende de la velocidad de las partículas.

En determinadas condiciones, la fuerza eléctrica y la magnética tendrán el mismo valor y al ser de sentidos contrarios, su suma será nula, por lo que esas partículas no se desviarán. Debe cumplirse que:

$$qE = qvB$$

$$v = E/B$$

Las partículas cuya velocidad sea superior a la anterior se desviarán hacia la izquierda, ya que la fuerza magnética será mayor que la eléctrica mientras que aquellas que se mueven con una velocidad menor serán desviadas hacia la derecha.

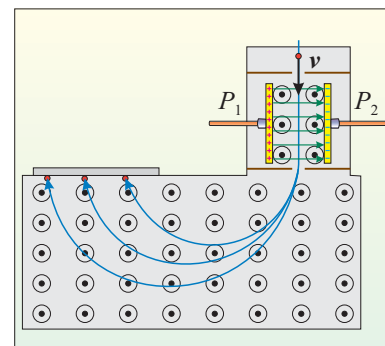


El espectrógrafo de masas

Es un aparato que permite medir la masa de partículas con masa muy pequeña como pueden ser los iones. Se trata de una combinación de un selector de velocidades y un campo magnético que produce un movimiento circular de las partículas.

Las partículas que pasan entre las placas sin desviarse, al llegar a la zona en la que existe únicamente el campo magnético describen órbitas circulares hasta caer sobre una placa fotográfica. El radio de estas órbitas dependerá de la masa de cada partícula lo que permite calcular su masa.

Un dispositivo similar puede utilizarse para separar los isótopos de un determinado elemento. Los isótopos son átomos del mismo número atómico pero distinto número másico. Estos átomos son imposibles de separar por medios químicos, ya que tienen las mismas propiedades químicas al tener la misma configuración electrónica. Una manera de separar estos isótopos, e incluso medir su masa relativa, es mediante un espectrógrafo de masas.



A.15.- Supongamos que la distancia entre las placas es 1 cm y la $d\delta p$ 150 V. Los iones que penetran tienen dos cargas positivas y son tres isótopos del Mg de masas atómicas 24, 25 y 26 u. El campo magnético es de 0,5 T. ($1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

- a) Calcula E entre las placas y la fuerza que ejerce sobre cada ion.
 - b) Calcula la rapidez que tienen los iones que atraviesan el pasillo.
 - c) Calcula el radio de la órbita que describe cada isótopo en el campo magnético, una vez que ha salido del espacio en el que hay campo eléctrico.
 - d) ¿Podrían separarse en un espectrógrafo átomos neutros? Explica por qué.
- a) $E = 15000 \text{ N/C}$; $F = 4,8 \cdot 10^{-15} \text{ N}$; b) $v = 30000 \text{ m/s}$;
 c) $r_{24} = 7,47 \text{ mm}$; $r_{25} = 7,78 \text{ mm}$; $r_{26} = 8,09 \text{ mm}$; d) No

3.2 Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea

Sobre un conductor rectilíneo de longitud l que se encuentra en un campo magnético B se ejerce una fuerza que viene dada por:

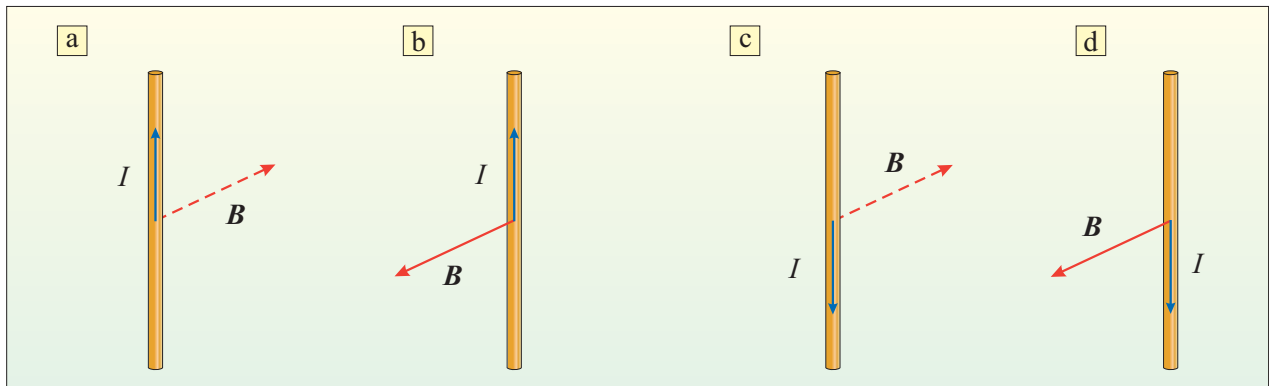
$$F = I l \times B$$

La existencia de esa fuerza magnética es comprensible teniendo en cuenta que una corriente eléctrica la podemos considerar como cargas eléctricas en movimiento con velocidad uniforme.

La ley de Lorentz sobre una carga móvil explica también la fuerza sobre un conductor rectilíneo:

$$F = qv \times B = q \frac{l}{t} \times B = I l \times B$$

A.16.- Dibuja la dirección y sentido de la fuerza magnética que actúa sobre la corriente en cada caso (el campo magnético es perpendicular al conductor).



A.17.- Halla el módulo, dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre un conductor rectilíneo horizontal de 5 cm de longitud por el que circula una corriente de 20 A de norte a sur (sentido negativo del eje Y), al situarlo en el vacío en un campo magnético de 1 T dirigido de oeste a este (sentido positivo del eje X).

$$F = k \text{ N}$$

3.3 Acciones entre corrientes paralelas

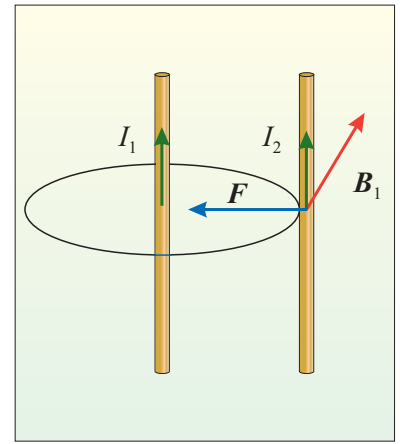
Sabemos que una corriente eléctrica crea un campo magnético y que un campo magnético ejerce una fuerza sobre una corriente. Por lo tanto, cuando tengamos dos corrientes paralelas, entre ellas se establecerá una interacción magnética. La intensidad del campo magnético creado por la corriente 1 a la distancia d , a la que se encuentra la corriente 2 será:

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi d}$$

Sobre la corriente 2 se ejerce una fuerza $F_{1,2} = I_2 \mathbf{I} \times \mathbf{B}_1$; sustituyendo el valor del campo teniendo en cuenta que I y \mathbf{B}_1 son perpendiculares

$$F_{1,2} = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

En la figura se puede observar la dirección y sentido de $F_{1,2}$ en el caso de dos corrientes que circulan con el mismo sentido.



A.18.- Demostrar que la fuerza con la que la corriente 2 atrae a la 1 tiene el mismo valor que la fuerza anterior con la que la corriente 1 atrae a la corriente 2.

Demostrar que si las corrientes tienen sentidos contrarios las fuerzas son repulsivas.

El hecho de que dos corrientes paralelas interactúen entre sí se ha aprovechado para definir la unidad de intensidad de corriente eléctrica, **el amperio**, de una forma operacional, es decir, una definición basada en una operación de medida. La definición del amperio en el SI de unidades es:

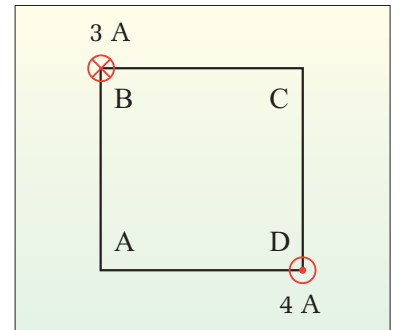
Un amperio es la intensidad de una corriente eléctrica constante que, cuando fluye por dos conductores paralelos de longitud indefinida y de sección transversal circular infinitamente pequeña, situados a una distancia recíproca de un metro y colocados en el vacío, hace que un conductor ejerza sobre el otro una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ N por cada metro de conductor.

A.19.- Por dos hilos metálicos largos y paralelos circulan corrientes de 3 A y 4 A. Pasan respectivamente por los vértices B y D de un cuadrado de 2 m de lado, situado en un plano perpendicular, como ilustra la figura.

a) Representa el campo magnético creado por cada hilo conductor en el punto A. Calcula el módulo del campo magnético total en el vértice A.

b) Calcula la fuerza por unidad de longitud que se ejercen entre sí ambos hilos. ¿Será de atracción o de repulsión? Justifícalo.

a) $B = 5 \cdot 10^{-7}$ T; b) $F/L = 8,5 \cdot 10^{-7}$ N/m



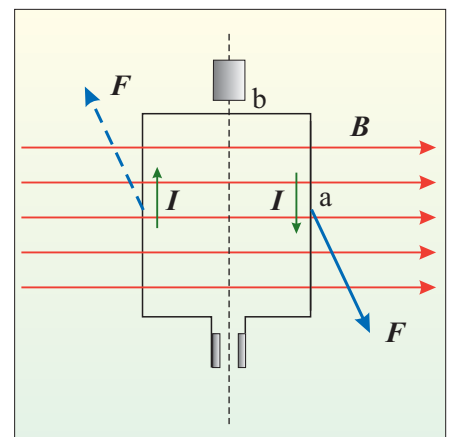
3.4 Acción del campo magnético sobre una espira

¿Por qué gira un motor eléctrico? En los motores eléctricos se aprovecha la fuerza que el campo magnético ejerce sobre una corriente eléctrica que circula a través de una bobina móvil (que puede girar), que se encuentra en su interior. El campo magnético puede estar creado por un imán o por un electroimán.

Para simplificar el dibujo, en lugar de una bobina móvil hemos representado únicamente una espira, y sólo hemos representado el campo magnético y no el imán o el electroimán que se utiliza para crearlo.

En la figura puede observarse que la fuerza que se ejerce sobre el lado izquierdo de la espira está dirigida hacia el interior del papel, mientras que la que se ejerce sobre el lado derecho, está dirigida hacia fuera del papel. Estas fuerzas constituyen un par de fuerzas que tiende a hacer girar la bobina en torno a su eje vertical.

Sobre los lados superior e inferior no actúan fuerzas, pues al ser paralelos al campo magnético la fuerza es nula.



El valor de cada una de las fuerzas, suponiendo que el campo magnético es perpendicular al lado de la espira, es:

$$F = I a B$$

A.20.- Una espira cuadrada de 14 por 14 cm se coloca con su cara paralela al campo magnético de 3 T creado por un gran electroimán. Calcula la fuerza que se ejerce sobre cada uno de los lados de la espira cuando por ella circula una corriente de 6 A.

$$F_{\text{lado perpendicular a B}} = 2,52 \text{ N}; F_{\text{lado paralelo a B}} = 0 \text{ N}$$

3.5 Relatividad de los efectos electrostáticos y magnéticos

Los efectos magnéticos dependen de la velocidad de las cargas eléctricas. La ley de Lorentz establece que el valor de la fuerza que se ejerce por un campo magnético sobre una carga eléctrica que se mueve en su interior depende de la velocidad de esa carga eléctrica. Además, las expresiones que permiten calcular el valor de B creado por una corriente señala la dependencia de B con I . De nuevo encontramos aquí la dependencia con la velocidad, pues el valor de I depende de la cantidad de carga que se mueve y de la velocidad con la que se mueven esas cargas.

Así pues, tanto el valor de la intensidad de campo magnético como el efecto del campo magnético depende de la velocidad; pero, ¿de qué velocidad? ¿con respecto a qué observador debemos medir la velocidad? Una carga eléctrica puede estar en movimiento respecto a un observador y en reposo respecto a otro. Como consecuencia, el valor de la fuerza magnética que se ejerza sobre esa carga medido por un observador será diferente del valor medido por otro observador. En ese sentido podemos decir:

Las fuerzas magnéticas dependen del observador que las mida.

Aunque resulta más difícil explicarlo, las fuerzas electrostáticas también dependen del movimiento del observador. Así, el valor de E medido por un observador en reposo respecto a ese campo es diferente al valor de E medido por un observador en movimiento respecto a ese campo. Estos efectos son observables cuando la velocidad relativa del observador respecto al campo es elevada.

En ocasiones se compensan las diferencias entre los valores de E y B medidos por dos observadores diferentes que se mueven entre ellos, de forma que la suma de los efectos electrostáticos y magnéticos siguen siendo igual para ambos observadores. Por eso, los científicos no consideran los efectos electrostáticos y magnéticos como independientes y creen más conveniente hablar del efecto electromagnético sobre los cuerpos cargados.

Parece que las dificultades asociadas al hecho de que los efectos magnéticos y electrostáticos dependiesen del movimiento del observador están en el origen del problema que Einstein intentaba resolver cuando propuso su teoría especial de la relatividad para solucionar las contradicciones que se planteaban entre la mecánica clásica y el electromagnetismo. De hecho, el artículo en el que Einstein presentó su teoría tenía el título de *Electrodinámica de los cuerpos en movimiento*.

3.6 Comportamiento de las sustancias en un campo magnético

¿Por qué hay sustancias sobre las que actúan intensamente los campos magnéticos, como sucede con el hierro, mientras que hay otras sobre las que los campos magnéticos actúan muy débilmente? ¿Por qué un imán permanente se comporta igual que un solenoide?

Para poder responder preguntas como las anteriores, tenemos que acudir a una interpretación de lo que ocurre a nivel atómico.

En un modelo clásico del átomo se supone que hay electrones que giran alrededor del núcleo. Cada electrón girando lo podemos considerar como un pequeño imán ya que suponemos que un electrón que gira es similar a una pequeña espira por la que circula una corriente eléctrica mínima.

En la mayoría de los átomos, el movimiento de los electrones se compensan entre sí de forma que el átomo no tiene momento magnético neto. Es lo mismo que decir que la orientación de los pequeñísimos imanes es al azar por lo que si sumamos el campo magnético producido por todos ellos, el campo magnético resultante es nulo. Decimos que esos átomos no tienen momento magnético permanente.

Pero hay otros átomos en los que no es nula la suma de esos pequeñísimos campos magnéticos asociados al movimiento de los electrones. Decimos que esos átomos tienen momento dipolar permanente. Ahora bien, en ausencia de un campo magnético externo, la orientación de esos dipolos permanentes es al azar de forma que aunque una sustancia esté formada por esos átomos el campo magnético total de la sustancia es nulo. Por ejemplo, aunque los átomos de hierro se pueden considerar como pequeños imanes, un clavo de hierro no crea normalmente un campo magnético.

¿Qué ocurre cuando se coloca una sustancia en un campo magnético externo?

Según el comportamiento de las sustancias ante un campo magnético externo las clasificamos en:

a) **Materiales diamagnéticos** como el bismuto, el antimonio o el mercurio, que son débilmente repelidas por los campos magnéticos.

Los átomos que forman esas sustancias no tienen momento dipolar permanente. Cuando se colocan en un campo magnético externo suponemos que una pequeña parte de los electrones orientan su órbita de forma que crean un débil campo magnético interior que se opone al campo exterior. Por lo tanto el campo magnético total en el interior de esas sustancias es débilmente menor que el campo exterior aplicado.

Puesto que el campo interior es de sentido contrario al exterior, se repelen.

b) **Materiales paramagnéticos** como el aluminio o el cloruro de hierro.

Los átomos que forman esas sustancias sí tienen momento dipolar permanente. Cuando se colocan en un campo magnético externo suponemos que una pequeña parte de los electrones orientan su órbita de forma que crean un débil campo magnético interior que tiene la misma dirección y sentido que el campo exterior. Por lo tanto el campo magnético total en el interior de esas sustancias es débilmente mayor que el campo exterior aplicado.

Puesto que el campo interior tiene el mismo sentido que el exterior, se atraen. Estas sustancias son débilmente atraídas por los imanes.

c) **Materiales ferromagnéticos**: estas sustancias **son atraídas fuertemente** por los imanes. El hierro, el cobalto, el níquel y aleaciones en los que intervienen estos metales son ejemplos de ello. La explicación es la misma que para las sustancias paramagnéticas pero ahora, la cantidad de electrones orientados de forma que se cree

En física moderna es muy importante otra propiedad de los electrones, que es el spin, que podríamos considerar como un pequeño campo magnético del electrón debido a una rotación sobre sí mismo. Estos pequeños campos magnéticos también pueden alinearse y esto contribuye a explicar las propiedades magnéticas de ciertos materiales.

un campo magnético de igual sentido que el exterior es muy superior al que lo hacen en las sustancias paramagnéticas.

La sustancias ferromagnéticas pueden hacer que el campo magnético en su interior sea miles de veces superior al campo magnético exterior aplicado.

¿Qué es un imán permanente?

Las sustancias ferromagnéticas, además de multiplicar el campo magnético exterior tienen la propiedad de que al cesar el campo magnético exterior, la mayoría de los campos magnéticos asociados a los electrones permanecen orientados, de forma que aunque ahora no exista campo exterior el propio material crea un campo magnético que sigue siendo bastante intenso.

Así se comporta el hierro recocido, una aleación de hierro-silicio, una aleación que recibe el nombre de permalloy (55 % de Fe y 45 % de Ni).

La fabricación de imanes permanentes consiste en introducir sustancias de este último tipo en el interior de bobinas por donde circula una alta intensidad de corriente, disminuyendo progresivamente el campo externo de forma que en el material quede un campo magnético remanente aunque no exista campo externo.

3.7 Diferencias entre el campo electrostático y el magnético.

* En el caso del campo magnético no existe ninguna propiedad de la materia como la carga o la masa. No existe una «carga magnética» semejante a la carga eléctrica. Para establecer analogías con el campo electrostático se utiliza, a veces, la noción de polo magnético, si bien esto sólo sirve hacerlo a nivel formal, pues, al menos hasta el momento no se han encontrado polos magnéticos libres (monopolos o imanes con un solo polo).

* Como consecuencia, no es posible una definición de la intensidad de campo magnético como en los casos del campo electrostático E y el gravitatorio g , en los que definíamos la intensidad del campo como la fuerza por unidad de carga o masa respectivamente. La inducción magnética no puede definirse como la fuerza magnética por unidad de carga magnética.

* Otra diferencia entre el campo magnético y el electrostático es que las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas, no tienen principio ni fin.

* Pero la principal diferencia entre estos campos radica en que el campo magnético no es conservativo, es decir, el trabajo que realizan las fuerzas magnéticas entre dos puntos depende de la trayectoria que se escoja.

* Las fuerzas eléctricas o gravitatorias son centrales, que quieren decir que están en la dirección de la línea que hay entre las cargas o masas respectivamente. Sin embargo, las fuerzas magnéticas son perpendiculares a la dirección del campo magnético.

* Mientras que las fuerzas eléctricas, a pequeñas velocidades, no dependen de la velocidad del observador, las fuerzas magnéticas sí dependen de la velocidad del observador.

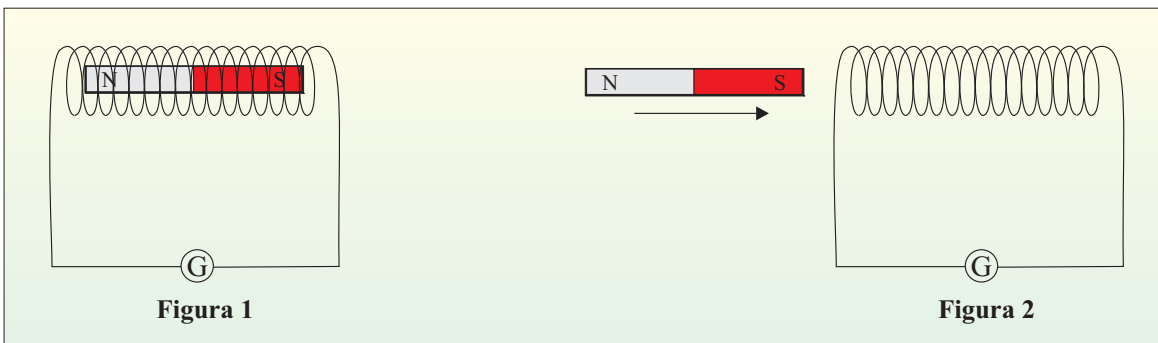
4

FENÓMENOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

¿Cómo se produce la corriente eléctrica que utilizamos en nuestras casas?

En las páginas anteriores hemos visto que una corriente eléctrica crea un campo magnético. Durante bastante tiempo se estuvo intentando producir una corriente eléctrica a partir de un campo magnético sin obtener resultados positivos. En 1831 Faraday y Henry llegaron de manera independiente a la conclusión de que era la variación del flujo magnético lo que podía producir la corriente eléctrica.

A.21.- Se pueden reproducir experiencias similares a la de Faraday, utilizando como inductor un imán y como inducido una bobina. Utilizaremos un galvanómetro para detectar la producción de corriente.



¿Se observa corriente cuando el imán está dentro del solenoide, como en 1? ¿Se observa corriente cuando el imán se acerca al solenoide? ¿Y cuando se aleja?

¿Se observa corriente si el que se mueve es el solenoide y está fijo el imán? Anota claramente las conclusiones.

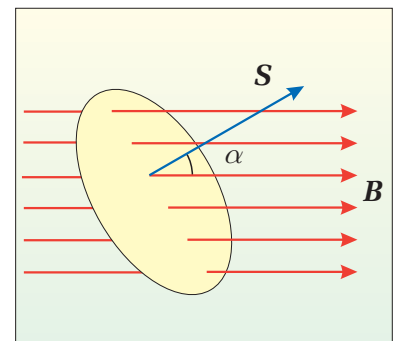
4.1 Flujo magnético

En la unidad anterior se definió el concepto general de flujo de un campo vectorial a través de una superficie. Se aplicó al caso del campo eléctrico, E . En esta unidad aplicaremos el concepto de flujo al caso de un campo magnético.

Si tenemos una superficie S colocada en el interior de un campo magnético B , de tal manera que los vectores representativos de S y de B formen un ángulo α definimos el flujo magnético a través de la superficie S como:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS \cos \alpha$$

La unidad de flujo magnético en el SI es el Weber (Wb).



A.22.- Calcula el flujo que atraviesa una espira circular de 10 cm de radio, que se encuentra en el interior de un campo magnético de 10 G cuando:

- El plano de la espira sea paralelo a la intensidad de campo.
- El plano de la espira forme un ángulo de 30° con la dirección del campo.
- El plano forme un ángulo de 60° con el campo.
- El ángulo formado sea de 90° .

a) $\Phi = 0$; b) $\Phi = 1,57 \cdot 10^{-5}$ Wb; c) $\Phi = 2,7 \cdot 10^{-5}$ Wb; d) $\Phi = 3,14 \cdot 10^{-5}$ Wb

4.2 Ley de Faraday

Cuando el flujo que atraviesa la superficie delimitada por un conductor varía con el tiempo, se produce en éste una fuerza electromotriz que llamamos inducida. La ley de Faraday establece:

El valor de la fuerza electromotriz inducida ε es proporcional a la variación del flujo en cada unidad de tiempo. La constante de proporcionalidad en el SI vale la unidad. La unidad en el SI es el voltio (V).

El valor medio de ε se calcula con la expresión: $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

El valor instantáneo de la *fem* inducida se calcula con: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$

Una explicación cualitativa a nivel atómico supone que al mover un conductor en un campo magnético, las cargas positivas y negativas reciben fuerzas de sentidos contrarios, produciéndose una separación de las mismas, de forma que aumenta su energía potencial eléctrica, estableciéndose una *ddp* entre los extremos del conductor.

La variación del flujo magnético se puede deber a:

- * La variación de la intensidad de campo magnético B .
- * La variación de la superficie que es atravesada por el campo magnético.
- * La variación del ángulo que forma la intensidad de campo magnético y el vector que representa a la superficie.

Cuando la variación del flujo es uniforme, es decir, es la misma en cada unidad de tiempo, la expresión que permite calcular la *fem* media también se puede utilizar para calcular la *fem* instantánea.

Por ahora no tendremos en cuenta el significado del signo menos que aparece en la ley de Faraday. Lo explicaremos con la ley de Lenz.

EJEMPLOS

1. Supongamos un campo magnético perpendicular al plano del papel y saliendo del mismo, cuya intensidad pasa de 100 a 500 gauss en 2 ms. Calcula la fuerza electromotriz inducida en una espira rectangular de 30x40 cm que se encuentra en el plano del papel.

El flujo magnético depende de la intensidad de campo magnético (variable en este caso), del área de la espira (0,12 m²) y del ángulo que forme la normal a la superficie de la espira con la dirección de la intensidad de campo magnético, que en este caso es 0°.

$$\Phi = BS \cos \alpha = B \cdot 0,12 \cdot 1 = 0,12 B$$

Los valores del flujo inicial y final son: $\Phi_i = 0,12 \cdot 0,01 = 0,0012$ Wb; $\Phi_f = 0,12 \cdot 0,05 = 0,0060$ Wb

La *fem* inducida depende de la rapidez de la variación del flujo magnético que atraviese la espira.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0,0060 - 0,0012}{0,002} = -2,4 \text{ V}$$

2. Supongamos un campo magnético perpendicular al plano del papel y que sale del mismo siendo su intensidad 0,2 T. Calcular la fuerza electromotriz inducida en una espira rectangular de 30x40 cm que se encuentra en el plano del papel si en 0,04 s deformamos la espira de forma que sus dimensiones sean de 10x60 cm.

En este caso la variación del flujo magnético se debe al cambio de superficie. Podemos escribir:

$$\Phi = BS \cos \alpha = 0,2 \cdot S \cdot 1 = 0,2 S$$

Los valores del flujo inicial y final son: $\Phi_i = 0,2 \cdot 0,12 = 0,024$ Wb; $\Phi_f = 0,2 \cdot 0,06 = 0,0120$ Wb

La *fem* inducida depende de la rapidez de la variación del flujo magnético que atraviese la espira.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0,0120 - 0,024}{0,04} = 0,30 \text{ V}$$

3. Suponga un campo magnético perpendicular al plano del papel y saliendo del mismo cuya intensidad es 0,2 T. Calcular la fuerza electromotriz media inducida en una espira rectangular de 30x40 cm que se encuentra en el plano del papel si en 0,02 s giramos la espira de forma que ahora su plano sea perpendicular al papel.

En este caso la variación del flujo magnético se debe al cambio del ángulo que forma el vector representativo de la superficie de la espira con la dirección de la intensidad de campo magnético. Podemos escribir:

$$\Phi = BS \cos \alpha = 0,2 \cdot 0,12 \cdot \cos \alpha = 0,024 \cos \alpha$$

Los valores del flujo inicial y final son: $\Phi_i = 0,024 \cdot \cos 0 = 0,024 \text{ Wb}$; $\Phi_f = 0,024 \cdot \cos 90 = 0 \text{ Wb}$

La *fem* inducida depende de la rapidez de la variación del flujo magnético que atraviese la espira.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0,000 - 0,024}{0,02} = 1,2 \text{ V}$$

A.23.- Supongamos un campo magnético uniforme, perpendicular al papel y que entra en el mismo, de forma que el valor de la intensidad de campo magnético varía con el tiempo según la expresión $B = 2 + 300t + 200t^2 \text{ G}$. El campo magnético atraviesa una espira cuadrada de 50 cm de lado colocada sobre el papel, de forma que su plano sea paralelo al plano del papel.

a) Calcula la *fem* inducida en esa espira en función del tiempo.

b) Calcula la *fem* inducida cuando $t = 2 \text{ s}$.

$$\varepsilon = -(75 + 100t)10^{-4} \text{ V}; \text{ b) } \varepsilon = -0,0275 \text{ V}$$

A.24.- Tenemos un campo magnético que depende del tiempo según la expresión $B = 5 \sin(100t)$ y que atraviesa perpendicularmente una espira de 100 cm^2 . Calcula la expresión de la *fem* inducida analizando el resultado.

$$\varepsilon = -5 \cos(100t) \text{ V}$$

A.25.- El campo magnético en el interior de un solenoide muy largo viene dado por $B = 0,20 \sin(300t) \text{ T}$. Se coloca en el interior del solenoide una bobina de 100 espiras con 2 cm^2 de área cada espira (más pequeña que el área de la sección transversal del solenoide). Calcula:

a) La *fem* inducida en la bobina cuando su eje forme un ángulo de 0° con relación al eje del solenoide.

a) La *fem* inducida en la bobina cuando su eje forme un ángulo de 30° con relación al eje del solenoide.

c) La *fem* inducida en la bobina cuando su eje forme un ángulo de 90° con relación al eje del solenoide.

$$\text{a) } \varepsilon = -1,2 \cos 300t \text{ V}; \text{ b) } \varepsilon = -1,04 \cos 300t \text{ V}; \text{ c) } \varepsilon = 0 \text{ V}$$

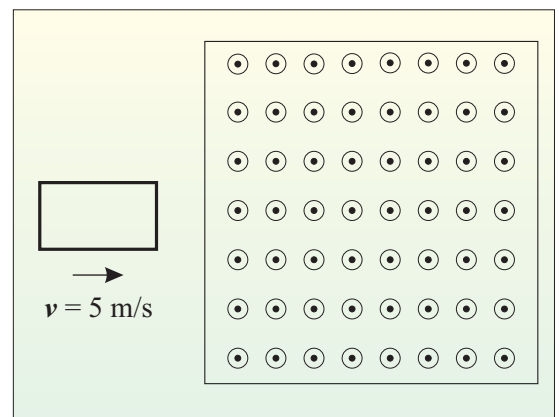
A.26.- Supongamos un campo magnético uniforme, perpendicular al papel y que sale del mismo, siendo la intensidad de campo magnético $B = 0,4 \text{ T}$. El campo magnético sólo existe en el interior del recuadro. Imaginemos una espira rectangular de $2 \times 4 \text{ cm}$ que se desplaza con rapidez constante de 5 m/s de forma que su plano sea paralelo al plano del papel. Inicialmente la espira se mueve fuera del recuadro dirigiéndose hacia él.

a) Calcula la *fem* inducida cuando la espira se mueve fuera de los límites del recuadro.

b) Calcula la *fem* inducida cuando la espira está entrando en el recuadro, de forma que está parcialmente dentro del recuadro.

c) Calcula la *fem* inducida cuando la espira se mueve dentro del recuadro.

$$\text{a) } \varepsilon = 0 \text{ V}; \text{ b) } \varepsilon = -0,04 \text{ V}; \text{ c) } \varepsilon = 0 \text{ V}.$$



A.27.- Un alambre rectilíneo de 60 cm de longitud se mueve, en un campo magnético uniforme de 1,5 T, normalmente a las líneas de fuerza magnética con una rapidez de 5 m/s sobre un alambre tal como indica la figura. ¿Cuánto vale la *fem* inducida?

$$\varepsilon = 4,5 \text{ V}$$

A.28.- a) Si la espira de la A.22 gira con una rapidez angular de 2 vueltas/s, ¿cuánto vale la *fem* inducida máxima?

b) Un cuadro de 1000 espiras, tiene una sección total de 20 m² y se encuentra perpendicular al campo magnético terrestre. Gira hasta quedar paralelo tardando 0,02 s. La *fem* inducida es 0,006 voltios. Calcula el valor del campo magnético terrestre en ese punto.

$$\text{a) } \varepsilon = 0,39 \text{ mV; b) } B = 0,06 \text{ G}$$

A.29.- Un cuadro formado por 1000 espiras de 10·10 cm, se encuentra colocado en un campo magnético uniforme cuya intensidad es de 400 G. Calcula:

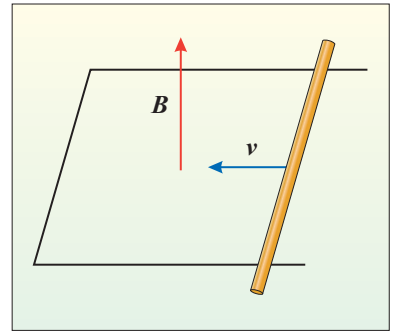
a) El flujo magnético que atraviesa el cuadro cuando los planos de las espiras forman un ángulo de 30° con la dirección del campo.

b) La *fem* inducida (valor medio) si el cuadro se pone paralelo a la dirección del campo en 0,1 s.

c) La expresión de la *fem* instantánea si el cuadro continuara girando con la misma velocidad constante, y su valor en el instante $t = 0,6 \text{ s}$.

$$\text{a) } \Phi = 0,2 \text{ Wb; b) } \varepsilon = 2 \text{ V; c) } \varepsilon = 2,1 \text{ sen } 10\pi/6 \cdot t \text{ V; } \varepsilon = 0$$

A.30.- La ley de Faraday parece contradecir el principio de conservación de la energía ya que aparece una energía eléctrica. ¿Cómo puede explicarse esa supuesta violación del principio?



4.3 Ley de Lenz

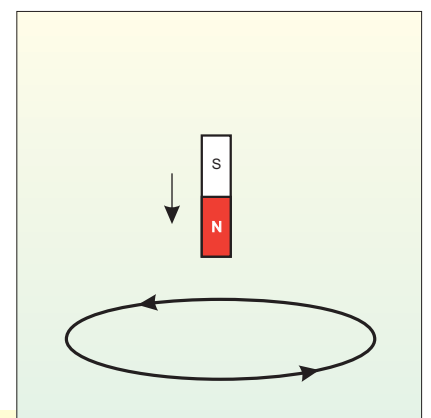
El sentido de la fuerza electromotriz inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

En realidad lo que viene a decir la ley de Lenz es que se tiene que cumplir el principio de conservación de la energía. Así, si acercamos el polo norte de un imán a una espira, en ésta se induce una corriente que circula de forma que se crea un imán cuyo polo norte se opone a la aproximación del otro polo norte; para acercar el imán a la espira hay que hacer una fuerza que venza la repulsión entre la espira y el imán, de manera que para desplazar el imán se necesita aportar energía exterior. Esa energía exterior es igual a la energía eléctrica que se consume en la espira por efecto Joule.

La ley de Lenz explica el signo negativo que aparece en la ley de Faraday al tener la *fem* inducida un sentido contrario a la variación de flujo magnético que la produce.

A.31.- a) Aplica la ley de Lenz para determinar el sentido de la corriente inducida en las situaciones descritas en las actividades 23, 26 y 27.

b) Aunque la ley de Faraday-Lenz tiene consecuencias prácticas muy importantes, por ejemplo la producción de corrientes alternas que estudiaremos más adelante, nos referiremos ahora a un fenómeno muy llamativo. ¿Qué sucede cuando un imán cae en el interior de un tubo de cobre o de un tubo de aluminio? ¿Qué diferencia hay

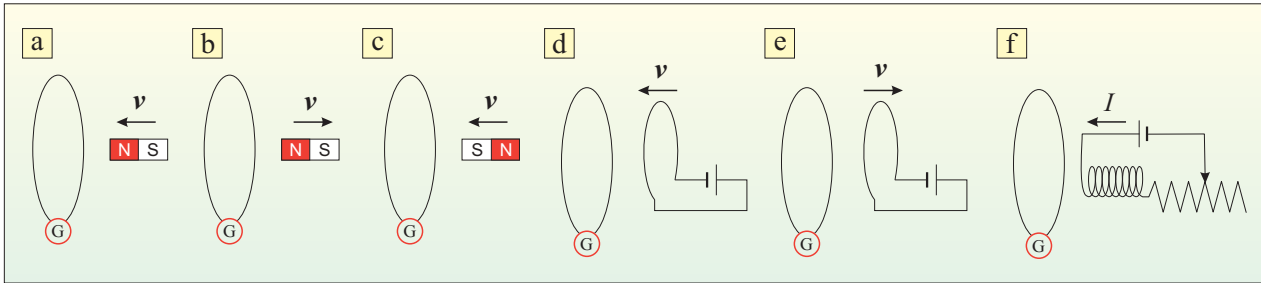


con la caída de un imán en un tubo no metálico? Intenta explicar las diferencias a partir de las fuerzas presentes y haz un balance energético de ese proceso.

A.32.- Aplica la ley de Lenz en los siguientes casos e indica el sentido de la corriente inducida.

En f) dibuja el sentido de la *fem* para los dos casos:

- Se desplaza el cursor de manera que disminuye R .
- Se desplaza el cursor de manera que aumenta R .



4.4 Fuerza electromotriz autoinducida

Supongamos una espira por la que circula una corriente. Ésta creará un campo magnético que atraviesa a la propia espira que lo crea. Por tanto, podemos hablar de un flujo magnético que atraviesa a la propia espira, cuyo valor es el producto del campo magnético por la superficie de la espira.

Un cambio en la intensidad de la corriente se traduce en una variación del campo magnético producido por dicha corriente y por lo tanto del flujo magnético que atraviesa la espira. Pero una variación del flujo crea una *fem* inducida que, en este caso, es más propio llamarla *fem* autoinducida.

La *fem* autoinducida será proporcional a la causa que la produce, es decir, a la variación de la intensidad en la unidad de tiempo y se opondrá a ella. Por lo tanto, vendrá dada por:

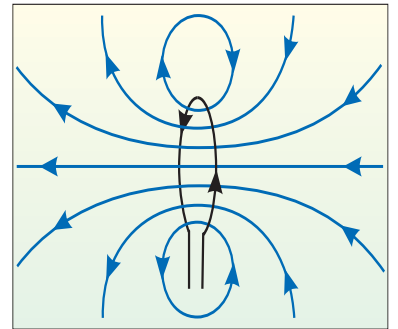
$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

Al coeficiente L se le llama **coeficiente de autoinducción**. Su valor depende de la forma, dimensiones, número de espiras y del medio. Su unidad es el henrio (H).

Por un fenómeno de autoinducción se producen las extracorrientes de apertura y cierre en un circuito. Cuando un circuito se cierra, la intensidad aumenta rápidamente desde el valor 0 hasta el valor final, produciéndose esta variación en muy poco tiempo. Esto produce una *fem* autoinducida en sentido contrario. Cuando se abre el circuito ocurre lo mismo, la intensidad cae rápidamente a cero y ahora la *fem* autoinducida se opone a esa disminución de intensidad.

Seguro que has observado alguna vez cómo saltan chispas eléctricas cuando sacamos del enchufe la clavija que utilizamos para conectar un aparato eléctrico. Esa chispa está producida por la llamada extracorriente de cierre, que se produce como reacción a la brusca disminución de la corriente que hace funcionar al aparato. Mientras más rápido se saca el enchufe y mayor era la intensidad que circulaba por el aparato, mayor es la chispa provocada por la extracorriente de cierre.

También se puede observar la chispa si introducimos la clavija en el enchufe.



Corrientes de Foucault

En muchas piezas de aparatos eléctricos hay masas metálicas móviles que están en el interior de un campo magnético, o bien, existen piezas metálicas situadas en un campo magnético variable. En ambos casos esto tiene por resultado el que se produzcan corrientes inducidas que circulan por esa pieza metálica sin un camino definido. Estas corrientes reciben el nombre de corrientes de Foucault y pueden estar presentes en todo conductor en el que varíe el flujo magnético.

Aunque pueden ser útiles en algunas ocasiones (se utilizan como dispositivos de frenado suave en trenes de transporte, facilitan el funcionamiento de los galvanómetros), en general suelen ser perjudiciales ya que producen un calentamiento de generadores y motores por el calor desprendido por efecto Joule. Asimismo «consumen» una energía disminuyendo el rendimiento de los distintos aparatos en donde se producen.

Para disminuir este efecto, en lugar de poner piezas macizas de metal, se ponen en forma de láminas separadas por un dieléctrico, con lo cual disminuye la posibilidad de formación de esos torbellinos.

5 GENERACIÓN DE CORRIENTES ALTERNAS

El descubrimiento de las corrientes inducidas debido a las variaciones de flujo magnético supuso el comienzo de un desarrollo tecnológico de enormes dimensiones. Abrió la posibilidad de la generación de corrientes eléctricas alternas que son las que hoy en día se usan a nivel doméstico e industrial.

Finalmente, el desarrollo teórico y experimental del electromagnetismo dio como fruto el descubrimiento de las ondas electromagnéticas que a su vez propició el desarrollo de la radio y la televisión y fue el principio de la era de las telecomunicaciones.

La ley de Faraday establece que la *fem* inducida es igual a la rapidez con la que cambia el flujo magnético que atraviesa una determinada superficie.

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

Sea una espira que gira con rapidez angular constante, ω , en el interior de un campo magnético que suponemos uniforme. Para el instante inicial, es decir para $t = 0$, el flujo es nulo ya que el ángulo α que forma el vector superficie con el campo magnético vale $\pi/2$ radianes. Se podría escoger cualquier otra posición inicial, pero con este valor la demostración que sigue es más sencilla.

Como α varía con el tiempo de manera uniforme:

$$\alpha = \omega t + \pi/2$$

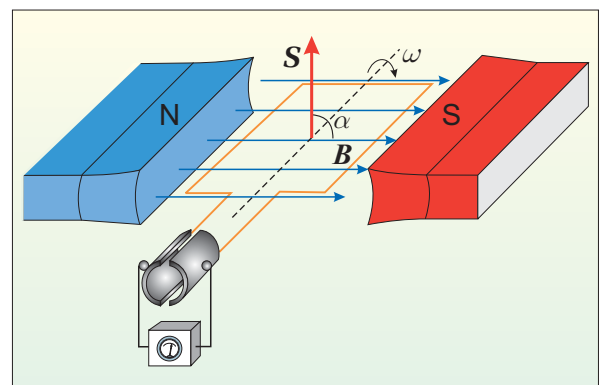
Por tanto el flujo será:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos (\omega t + \pi/2) = -BS \sin \omega t$$

La *fem* valdrá: $\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = BS \omega \cos \omega t$

Para un solenoide de N espiras tendremos que $\varepsilon = NBS \omega \cos \omega t$

Y teniendo en cuenta que N , B , S y ω son constantes los podemos agrupar en un término que dependerá del dispositivo productor de electricidad y que llamaremos *fem*



máxima $\varepsilon_0 = NBS\omega$, y por tanto:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t$$

A veces se puede encontrar que la fuerza electromotriz depende del seno en lugar del coseno. Como sabes, las funciones seno y coseno son idénticas excepto en los valores iniciales. Por eso, pueden usarse una u otra, según la situación inicial que se haya tomado como referencia.

EJEMPLO

Una espira rectangular de 20 x 60 cm gira uniformemente alrededor de un eje que es normal a un campo magnético de 0,5 T, de forma que da 30 vueltas/minuto. Calcula:

- La expresión de la fuerza electromotriz inducida en la espira.
- La fuerza electromotriz máxima.
- El número de espiras que debería tener una bobina para que la fuerza electromotriz máxima inducida fuese de 190 voltios.

a) La fuerza electromotriz inducida será igual a la rapidez de cambio del flujo magnético que atraviesa la espira:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \cos \omega t$$

$$S = 0,2 \cdot 0,6 = 0,12 \text{ m}^2; \omega = 30 \cdot 2\pi / 60 = \pi \text{ s}^{-1}$$

$$\varepsilon = 0,5 \cdot 0,12 \pi \cos \pi t = 0,19 \cos \pi t$$

- La fuerza electromotriz máxima $\varepsilon_0 = 0,19 \text{ V}$
- Si aumentamos el número de espiras aumentaremos la fuerza electromotriz producida por inducción. De esta forma:

$$190 = N \cdot 0,19; N = 1000 \text{ espiras}$$

A.33.- ¿Qué significado físico tiene ε_0 ? Un cuadro rectangular de 100 espiras de dimensiones 20 por 60 cm gira uniformemente alrededor de un eje perpendicular a un campo magnético de 1000 G a 50 r.p.m. Calcula la expresión de la fuerza electromotriz inducida.

$$\varepsilon = 6,28 \cos(1,67\pi t)$$

A.34.- Una espira de 20 cm² de área gira en un campo magnético de 0,02 T con $\omega = \pi/4$ rad/s. ¿Cuál será la expresión de la fem inducida? ¿Qué valores toma cuando $t = 2$ s y cuando $t = 4$ s? Supón que la fase inicial es de 0°.

$$\varepsilon = 3,14 \cdot 10^{-5} \sin \pi t / 4; \varepsilon_2 = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ V}; \varepsilon_4 = 0 \text{ V}$$

A.35.- Supongamos una fem alterna cuyo valor máximo es 10 V y $\omega = 10 \text{ s}^{-1}$. Uno de los bornes lo llamamos A y al otro B. Rellena la siguiente tabla:

$V_A - V_B$	10											
t (s)	0	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,09	0,10	0,15	0,20	0,21	

¿Dónde está el polo positivo? ¿En qué sentido circularán los electrones? Representa gráficamente la tensión en función del tiempo, es decir, los datos de la tabla anterior.

¿Cómo sería la representación gráfica de la tensión frente al tiempo en el caso de una corriente continua?

La corriente alterna tiene una serie de características que la diferencian de la corriente continua. Las diferencias están provocadas por el hecho de que cambia el sentido de la diferencia de potencial entre los bornes de un generador de corriente alterna. La frecuencia f , con la que esto ocurre está relacionada con la rapidez angular con la que gira el generador de la corriente: $\omega = 2 \pi f$. En Europa la frecuencia de la corriente alterna es de 50 Hz, es decir en 1 segundo cambia 50 veces la polaridad de los bornes. En Estados Unidos la frecuencia es de 60 Hz, es decir, cambia la polaridad 60 veces/segundo. Esto que no afecta a aparatos en los que se haga uso del efecto Joule (bombillas, estufas, braseros, planchas...), sí tiene mucha importancia en otros aparatos que utilicen condensadores y bobinas, lo que ocurre en cualquier aparato de electrónica; así, un aparato de TV diseñado para trabajar con corriente alterna de 60 Hz no funcionará bien cuando utilice corriente alterna de 50 Hz.

6 TRANSFORMADORES

En el transporte de la energía eléctrica hay pérdidas en los cables por efecto Joule. Como sabemos la potencia disipada por efecto Joule podemos calcularla con la expresión $I^2 R$. Para hacer mínimas las pérdidas interesa disminuir ambos factores.

Para poder disminuir la resistencia tendremos que aumentar el grosor del cable, lo que se traduce en un aumento de peso y del precio de la línea. Tiene pues, un límite económico.

Para poder disminuir la intensidad y que se mantenga constante la potencia transmitida tendremos que aumentar proporcionalmente el voltaje:

$$P = I_1 V_1 = I_2 V_2$$

El dispositivo utilizado para esto es el transformador. Consiste en dos arrollamientos de hilo conductor sobre un mismo núcleo de hierro llamados **primario** y **secundario**, siendo n_p y n_s su número de espiras respectivo. Al ser alterna la corriente que entra en el primario, produce un campo magnético variable y por lo tanto un flujo magnético variable, que al cortar las espiras del secundario produce en él una corriente alterna de la misma frecuencia y como la variación de flujo por espira es la misma, su tensión vendrá dada por la relación:

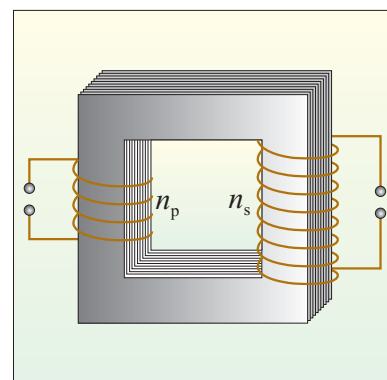
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

Si suponemos un transformador ideal, (sin pérdidas de energía), se debe conservar la potencia, lo que supone:

$$I_p V_p = I_s V_s \quad \text{y por tanto} \quad \frac{I_p}{I_s} = \frac{n_s}{n_p}$$

Cuando queremos elevar la tensión utilizamos un transformador de alta o elevador en el que $n_p < n_s$ (se suele llegar a tensiones del orden de medio millón de voltios), y para disminuirla se utiliza el transformador de baja o reductor, de manera que haya más espiras en el primario que en el secundario. Este último se usa en el lugar donde se utilizará la corriente eléctrica.

En los transformadores hay siempre pérdidas de energía debidas al efecto Joule y a las corrientes de Foucault. Para disminuir estos efectos, en lugar de poner piezas macizas de metal en su núcleo, se ponen en forma de láminas separadas por un dieléctrico, con lo cual disminuye la posibilidad de formación de estas corrientes perjudiciales. Un rendimiento real de un transformador puede ser del 98 %.



EJEMPLO

Un transformador tiene 400 vueltas en el primario y 8 vueltas en el secundario.

a) ¿Es un transformador elevador o reductor? Si se conecta el primario a una tensión de 110 V eficaces, ¿cuál es la tensión que aparece en circuito abierto del secundario?

b) Si la corriente del primario es de 0,1 A, ¿cuál será la corriente en el secundario admitiendo que el rendimiento es del 100 %?

c) Si utilizamos una corriente continua de 50 V en el primario, ¿cuál será la tensión en el secundario?

a) Es un transformador reductor pues el número de espiras en el secundario es menor que en el primario. Por lo tanto se reduce la tensión en la misma proporción que está el número de espiras:

$$V_s = V_p \frac{n_s}{n_p} = 110 \frac{8}{400} = 2,2 \text{ V}$$

b) Ya que el rendimiento es del 100%, la potencia en el primario debe ser igual que en el secundario.

$$I_p V_p = I_s V_s$$
$$I_s = 0,1 \frac{110}{2,2} = 5 \text{ V}$$

c) El voltaje sería nulo. Los transformadores sólo «funcionan» con corriente alterna pues se basan en fenómenos de inducción electromagnética y es necesario que varíe la intensidad y, por tanto, el campo y el flujo magnético.

A.36- a) ¿Podríamos utilizar un transformador de alta para disminuir la tensión?

b) ¿Qué es lo que se transforma en un transformador y que lo que se transmite sin transformar?

c) ¿Cuántas espiras debe tener el secundario de un transformador utilizado para elevar la tensión de 120 V a 1800 V, sabiendo que el primario consta de 100 espiras?

c) $n_s = 1500$ espiras

ACTIVIDADES DE RECAPITULACIÓN

A.1.- Un solenoide de longitud 10 cm tiene 400 espiras y conduce una corriente de 2 A. Calcula el campo en el interior del solenoide.

$$B = 100 \text{ G}$$

A.2.- Supongamos que existe un campo magnético uniforme perpendicular al plano del papel. Si queremos desplazar con velocidad constante una varilla metálica sobre el plano del papel ¿se necesitará aplicar alguna fuerza?

A.3.- Una lámina de metal puede oscilar libremente suspendida de un eje horizontal. Si hacemos oscilar la lámina en el entrehierro de un imán de herradura, el movimiento se amortigua, ¿por qué ocurre esto?

A.4.- De los tres vectores que aparecen en la expresión de Lorentz: $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$, ¿cuáles son siempre perpendiculares entre sí y cuáles pueden no ser siempre perpendiculares?

A.5.- Un hilo por el que circula una corriente de 30 A tiene una longitud de 12 cm entre los polos de un imán y forma un ángulo de 60° con la dirección del campo. El campo magnético es uniforme y vale 0,9 T. ¿Qué fuerza se ejerce sobre el hilo?

$$F = 2,8 \text{ N}$$

A.6.- Un protón que se mueve a 5000 km/s en un campo magnético, se encuentra sometido a una fuerza de $8 \cdot 10^{-14}$ N dirigida hacia el este cuando se mueve verticalmente hacia arriba. Cuando se mueve horizontalmente hacia el norte, no experimenta fuerza alguna. ¿Cuál es la magnitud, dirección y sentido del campo magnético en esa región?

$$B = 0,1 \text{ T dirigido hacia el sur}$$

A.7.- Los dos hilos, de 2 m de longitud, del cordón de conexión de un electrodoméstico están separados 3 mm y transportan una corriente continua de 8 A. Calcula la fuerza que se ejercen dichos hilos.

$$F = 0,0085 \text{ N en el sentido de separarlos}$$

A.8.- ¿Son correctos los enunciados siguientes? Explica por qué.

- La *fem* inducida en una espira es función del flujo que la atraviesa.
- La *fem* inducida en una espira es función del ángulo que forma el campo con la espira.
- La *fem* inducida en una espira es función de la inducción del campo magnético existente.
- La *fem* inducida en una espira es función de la velocidad con que varía el flujo.
- La *fem* inducida en una espira es función de todos esos factores.

A.9.- Una espira cuadrada de 6 cm de lado se encuentra entre los polos de un electroimán con su plano normal al campo magnético. Calcula la *fem* inducida en la espira cuando se conecta el electroimán si su campo pasa de 0 a su valor máximo de 1,5 T en $3/4$ de segundo.

$$\varepsilon = - 0,0072 \text{ V}$$

A.10.- El campo magnético perpendicular a una espira circular de 12 cm de diámetro pasa de +0,35 T a -0,15 T en 0,09 s, donde + significa que el campo está dirigido en el sentido de alejamiento de un observador y - que lo está hacia dicho observador.

- Calcula la *fem* inducida media.
- ¿En qué sentido circulará la corriente inducida?

$$\varepsilon = 0,0628 \text{ V; en el sentido horario}$$

A.11.- Una espira cuadrada de 10 cm de lado gira 90° desde su posición inicial paralela a un campo magnético cuya intensidad es de 0,02 T, en 10 ms. ¿Cuál es la *fem* media inducida?

$$\varepsilon = 0,02 \text{ V}$$

A.12.- Una espira de alambre tiene una superficie de 145 cm^2 . Gira con una rapidez angular constante de 2340 rpm en el seno de un campo magnético cuya intensidad es de 1670 G. Calcula la *fem* inducida en el instante en que la normal al plano de la espira forma con la dirección del campo un ángulo de 28° .

$$\varepsilon = 279 \text{ mV}$$