

# 11 Interacción entre la corriente eléctrica y un campo magnético

## Contenidos

- 11.1. Inducción electromagnética
- 11.2. Corrientes parásitas o de Foucault
- 11.3. Autoinducción. Bobinas
- 11.4. Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético

## Objetivos

- Describir los procesos que se dan en la inducción electromagnética y aplicarlos al principio de funcionamiento de los generadores electromagnéticos, transformadores, etcétera.
- Detectar los efectos que producen las corrientes parásitas o de Foucault en los núcleos de hierro sometidos a campos variables, y encontrar las fórmulas para evitarlos.
- Aprender los efectos de autoinducción que se producen en las bobinas.
- Analizar los fenómenos que se dan en la apertura y el cierre de un circuito con bobina.
- Comprender la importancia del coeficiente de autoinducción de una bobina.
- Describir la fuerza que se desarrolla en un conductor recorrido por corriente eléctrica cuando está en el seno de un campo magnético, y relacionarlo con el principio de funcionamiento del motor eléctrico y de los aparatos de medida analógicos.

Cuando movemos un conductor dentro de un campo magnético se produce en el conductor una separación de cargas eléctricas que da lugar a una f. e. m.; a este fenómeno se lo conoce por el nombre de inducción electromagnética.

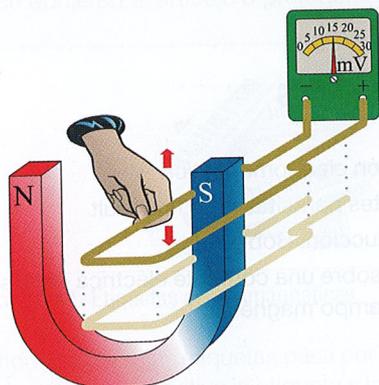
Gracias al fenómeno de la inducción electromagnética, descubierto por Faraday en 1832, es posible la generación de grandes cantidades de energía eléctrica mediante los alternadores (generadores de C.A.). Aprovechando este fenómeno también funcionan las dinamos (generadores de C.C.), los transformadores y muchos más dispositivos que estudiaremos con más detalle más adelante.

En un generador eléctrico se produce una f. e. m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso:

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen unas fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

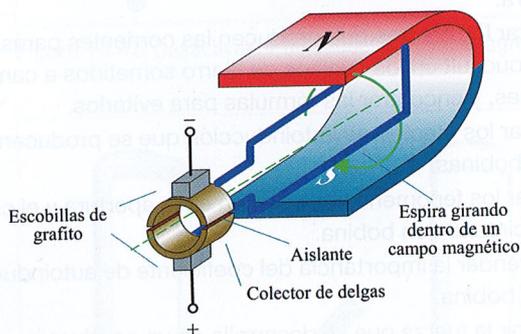
### 11.1. Inducción electromagnética

Cuando nos referimos a la inducción electromagnética estamos hablando de «producción de electricidad por acción magnética»; es decir, «cuando se mueve un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético aparece una fuerza electromotriz que se muestra como una tensión eléctrica en los extremos de dicho conductor» (Figura 11.1).



**Figura 11.1.** Al mover el conductor en el campo magnético del imán se genera una f. e. m.

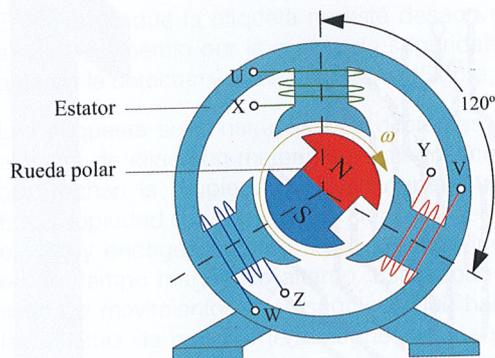
Así, por ejemplo, para producir C.C. se utiliza la dinamo (Figura 11.2). Los conductores eléctricos del rotor producen una fuerza electromotriz al moverse dentro del campo magnético del estator. Si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que se extrae del rotor mediante un anillo metálico partido (colector de delgas) sobre los que se apoyan unos contactos deslizantes (escobillas de grafito).



**Figura 11.2.** Dinamo elemental.

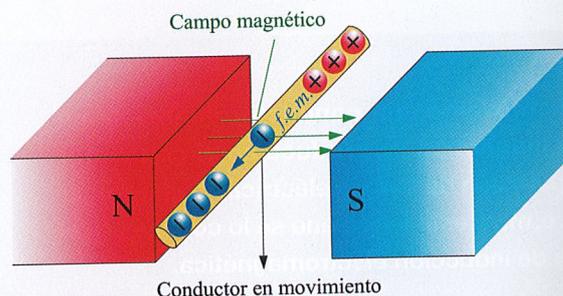
Para producir C.A. se utiliza el alternador (Figura 11.3). El campo magnético producido por el electroimán del rotor corta los conductores del estator, lo que hace que en ellos aparezca una fuerza electromotriz inducida en forma de C.A.

En los dos casos se consigue que en los conductores eléctricos aparezca una fuerza electromotriz inducida. En el primero, se mueven los conductores y se deja fijo el campo magnético. En el segundo caso, se mueve el campo magnético y se dejan fijos los conductores.



**Figura 11.3.** Alternador trifásico.

Recordemos que la fuerza electromotriz es la que consigue separar las cargas negativas (átomos con exceso de electrones) de las cargas positivas (átomos con defecto de electrones), creando una diferencia de cargas o tensión eléctrica que es capaz de hacer circular una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Cuando movemos el conductor de forma perpendicular a un campo magnético, las cargas eléctricas se separan hacia ambos extremos del conductor, produciéndose una diferencia de potencial entre los mismos, tal como se muestra en la Figura 11.4.



**Figura 11.4.** F. e. m. inducida en un conductor.

### Actividad experimental 11.1

Toma una bobina de unas 500 espiras con núcleo de aire y conéctala a un miliamperímetro de cero central en la escala (aparato de medida muy sensible, donde la aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala dependiendo del sentido de la corriente) (Figura 11.5). Ahora introduce suavemente en su núcleo un imán recto y comprueba la lectura del miliamperímetro. Realiza la experiencia con las siguientes variaciones:

- Retira el imán del núcleo.
- Repite la experiencia moviendo más rápido el imán.
- Repite la experiencia con un imán más potente.
- Repite la experiencia con una bobina de 2.000 espiras.
- Repite la experiencia moviendo la bobina en vez del imán.

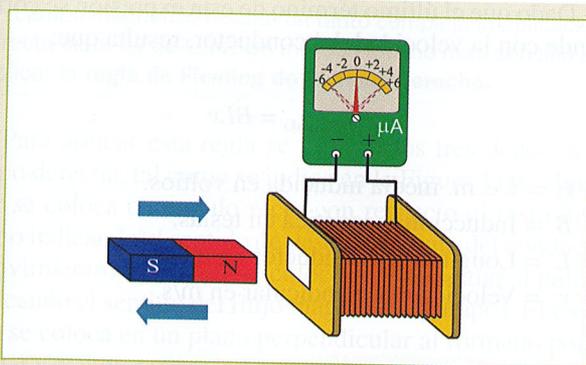


Figura 11.5.

Seguro que al realizar esta experiencia has obtenido las siguientes conclusiones:

- Cuando los conductores eléctricos son sometidos a la acción de un campo magnético variable, se produce una f.e.m. inducida en los mismos que, cuando cerramos el circuito, se convierte en una corriente eléctrica inducida (si se mueve el imán, la aguja del aparato de medida acusa el paso de una corriente eléctrica; si el imán permanece inmóvil, el miliamperímetro indica cero).
- Esta f.e.m. es mayor cuando:
  - Aumentamos la velocidad con la que movemos el campo magnético, o el conductor.
  - Aumentamos el número de espiras de la bobina.
  - Aumentamos el campo magnético.
- La corriente inducida tiene un sentido cuando se introduce el imán en el núcleo de la bobina y el contrario cuando se extrae este de la misma.

### 11.1.1. Experiencia de Faraday

Para realizar esta experiencia se necesita un imán, una bobina y un miliamperímetro de cero central (aparato de medida muy sensible, donde la aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala dependiendo del sentido de la corriente). La bobina la suspendemos entre los polos del imán, tal como se muestra en la Figura 11.6, de manera que pueda moverse y cortar las líneas de campo magnético.

Si movemos el conductor de tal manera que corte perpendicularmente a las líneas de campo, se puede observar que la aguja del miliamperímetro se desvía hacia un lado durante el movimiento, indicando el paso de una corriente en la bobina. Si ahora movemos el conductor en sentido contrario, la aguja del miliamperímetro se desvía también hacia el lado contrario.

De aquí se deduce que cuando se mueven conductores, de tal manera que corten perpendicularmente las líneas de un campo magnético, se produce una f.e.m. inducida. Si se cierra el circuito aparece una corriente eléctrica. También observa-

mos que el sentido de esta corriente depende del movimiento relativo de los conductores respecto al campo magnético.

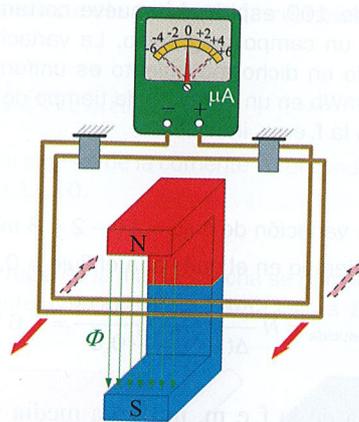


Figura 11.6. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

Si ahora movemos los conductores en sentido paralelo a las líneas de campo (hacia arriba y hacia abajo según la Figura 11.6), se puede observar que el miliamperímetro no detecta el paso de corriente. También podemos observar que cuanto más rápido movamos la bobina, mayores son los valores de la corriente medida.

De aquí se deduce que solo se produce f.e.m. mientras los conductores corten el campo magnético. Además la f.e.m. depende de la velocidad relativa de corte de los conductores respecto al campo magnético, y aumenta con dicha velocidad.

Además se observa que al aumentar el número de espiras de la bobina, también aumenta la f.e.m. inducida. Lo mismo ocurre si aumentamos el nivel de inducción del campo magnético.

En resumen, se puede decir que la f.e.m. media inducida que se produce en una bobina cuando en su movimiento corta perpendicularmente las líneas de un campo magnético regular es igual a:

$$E_{\text{inducida}} = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

donde  $N$  es el número de espiras de la bobina y la expresión  $\Delta \Phi / \Delta t$  indica la variación del flujo cortado por la bobina respecto al tiempo, es decir, lo rápido que varía el flujo magnético en los conductores.

Conviene indicar que se puede generar una f.e.m. inducida tanto si se mueven conductores en el seno de un campo magnético fijo, como si lo que se mueve es el campo magnético y se dejan fijos los conductores. También se consigue f.e.m. inducida en los conductores si se les aplica un campo magnético variable, por ejemplo, proveniente de una bobina a la que se le aplica corriente alterna.

### Actividad resuelta 11.1

Una bobina de 100 espiras se mueve cortando perpendicularmente un campo magnético. La variación de flujo experimentado en dicho movimiento es uniforme y va de 2 mWb a 10 mWb en un intervalo de tiempo de 0,5 segundos. Averigua la f.e.m. inducida.

**Solución:**

$\Delta\Phi$  = variación de flujo = 10 - 2 = 8 mWb  
 $\Delta t$  = tiempo en el que varía el flujo = 0,5 s

$$E_{\text{inducida}} = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \frac{0,008}{0,5} = 1,6 \text{ V}$$

La fórmula de la f.e.m. inducida media se puede expresar de otra forma. Supongamos que un conductor de longitud  $L$  que se desplaza perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de inducción  $B$  a una velocidad  $v$ , tal como se muestra en la Figura 11.7.

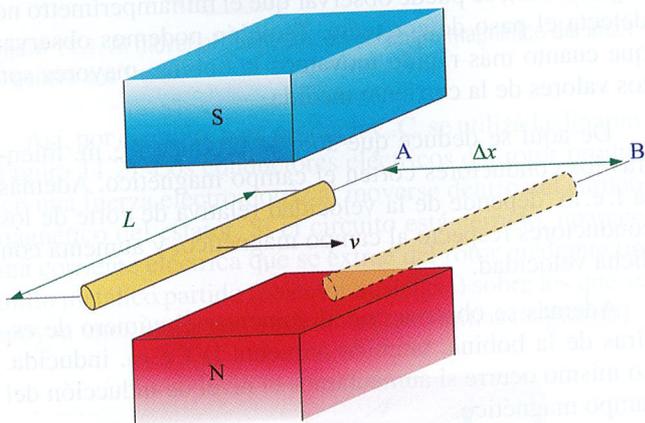


Figura 11.7.

Cuando el conductor se desplace de la posición (A) a la posición (B) habrá barrido un área igual a:

$$S = L \cdot \Delta x$$

y el conductor habrá sido sometido a un cambio de flujo  $\Delta\Phi$  en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

La f.e.m. inducida en el mismo será igual a:

$$E_{\text{inducida}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Por otro lado  $\Delta\Phi = B \cdot S = B \cdot L \cdot \Delta x$ , sustituyendo en la primera ecuación:

$$E_{\text{inducida}} = B \cdot L \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Dado que el último término de esta expresión se corresponde con la velocidad del conductor, resulta que:

$$E_{\text{inducida}} = BLv$$

- $E$  = f.e.m. media inducida en voltios.
- $B$  = Inducción magnética en teslas.
- $L$  = Longitud del conductor en metros.
- $v$  = Velocidad perpendicular en m/s.

### Actividad resuelta 11.2

Un conductor se desplaza a una velocidad lineal de 5 m/s en el seno de un campo magnético fijo de 1,2 teslas de inducción. Halla el valor de la f.e.m. inducida en el conductor si posee una longitud de 0,5 m.

**Solución:**

$$E = BLv = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 5 = 3 \text{ V}$$

#### 11.1.2. Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz

La ley de Lenz indica que «el sentido de la corriente inducida en un conductor es tal que tiende a oponerse a la causa que la produjo» (principio general de acción y reacción).

Este efecto se puede comprobar experimentalmente de la siguiente manera. Si instalamos una dinamo o alternador acoplado a la rueda de una bicicleta estática y nos ponemos a pedalear, podremos comprobar que resulta bastante fácil mover los pedales. Si ahora conectamos a la dinamo una lámpara de 40 W, sentiremos una mayor resistencia al movimiento de los pedales, la cual aumenta todavía más si conectamos una lámpara de 100 W.

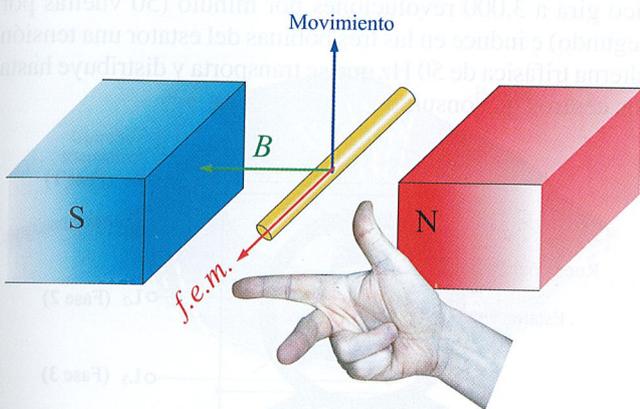
Lo que hemos comprobado experimentalmente es que cuando los conductores de la dinamo se mueven en el seno de un campo magnético, si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que alimenta la lámpara. Esta corriente produce, a su vez, un campo magnético de polaridad tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético inductor. Así, por ejemplo, si este campo magnético tendiese a crecer, la corriente inducida en el conductor generaría un campo magnético de sentido contrario que tendería a contrarrestar dicho aumento. En el caso de la dinamo de la bicicleta, lo que se observa es que cuando aumenta la corriente por los conductores se aprecia una cierta resistencia al movimiento de estos.

Para determinar el sentido de la corriente inducida en un conductor que se desplaza perpendicularmente en el seno de



un campo magnético resulta un tanto compleja la aplicación directa de la ley de Lenz. Un método mucho más sencillo es aplicar la **regla de Fleming de la mano derecha**.

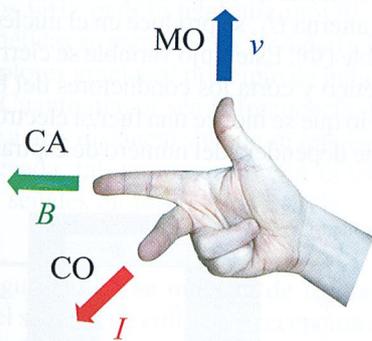
Para aplicar esta regla se utilizan los tres dedos de la mano derecha, tal como se indica en la Figura 11.8: el **pulgar** se coloca en ángulo recto con respecto al resto de la mano indicando el sentido de desplazamiento del conductor (**movimiento**). El **índice** se coloca perpendicular al pulgar, indicando el sentido del flujo magnético (**campo**). El **corazón** se coloca en un plano perpendicular al formado por el pulgar y el índice y nos indica el sentido que toma la corriente inducida (sentido convencional de la corriente) al mover el conductor en el seno del campo magnético (**corriente**).



**Figura 11.8.** Regla de la mano derecha para determinar el sentido de la f. e. m. inducida.

Una forma sencilla de no olvidarse de esta regla es aplicando la siguiente regla nemotécnica: **mo-ca-co** que significa **movimiento, campo, corriente** (Figura 11.9).

Gracias a esta sencilla regla podremos responder a estas sencillas preguntas:



**Figura 11.9.** Regla de la mano derecha.

¿Qué ocurre si invertimos el sentido de giro de una dinamo? Al moverse los conductores en sentido contrario al anterior, la corriente también se invierte, lo que da como resultado una inversión en la polaridad de los bornes de salida del generador.

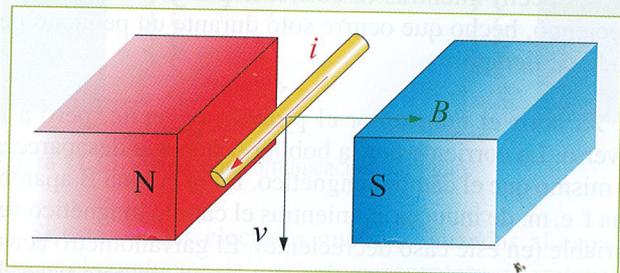
¿Qué ocurre si invertimos la polaridad del campo magnético inductor de una dinamo? Si aplicamos la regla de la mano derecha observaremos que al invertir el campo también se invierte el sentido de la corriente.

### Actividad resuelta 11.3

Determina el sentido de la corriente en el conductor eléctrico de la Figura 11.10.

**Solución:**

Al aplicar la regla de la mano derecha se mantiene el sentido de la corriente, como se indica en la Figura 11.8.

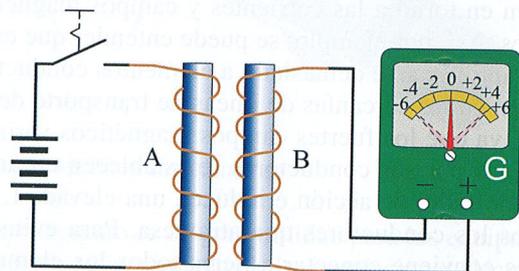


**Figura 11.10.**

### 11.1.3. Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo

Los campos magnéticos variables que desarrollan los conductores cuando son recorridos por corrientes variables pueden inducir fuerzas electromotrices al atravesar otros conductores que se encuentren en su proximidad.

Para entender este fenómeno podemos realizar una sencilla experiencia, que consiste en colocar dos bobinas muy cerca una de otra, tal como se muestra en la Figura 11.11. En los extremos de la bobina B conectamos un galvanómetro de cero central. A su vez, en la bobina A conectamos primeramente un generador de C.C. Al cerrar el interruptor en la bobina A, se puede observar cómo el galvanómetro acusa el paso de una pequeña corriente por la bobina B que persiste solo durante un pequeño periodo de tiempo. Si a continuación abrimos el interruptor podremos comprobar que el galvanómetro vuelve a detectar el paso de corriente, pero ahora en sentido contrario.



**Figura 11.11.** Comprobación experimental de la f. e. m. inducida en un circuito próximo.

La explicación de este fenómeno la tenemos que encontrar en la inducción electromagnética.

Al cerrar el interruptor, por la bobina A aparece una corriente que tiende a crecer desde cero hasta su valor nominal, lo que origina en la bobina un campo magnético variable y creciente. Al estar la bobina B muy próxima a la A, dicho campo magnético la atraviesa, con lo que se produce el principio de inducción electromagnética (conductores sometidos a la acción de un campo magnético variable) que da como resultado una fuerza electromotriz y una corriente eléctrica en la bobina B. Esta corriente solo se produce mientras el campo magnético sea variable, es decir, mientras la corriente por la bobina A esté creciendo, hecho que ocurre solo durante un pequeño periodo de tiempo.

Al abrir el interruptor el proceso se repite, pero a la inversa. La corriente por la bobina A tiende a desaparecer, lo mismo que el campo magnético. En la bobina B aparece una f. e. m. de inducción, mientras el campo magnético sea variable (en este caso decreciente). El galvanómetro acusa el paso de una corriente eléctrica. Pero, en este caso de sentido contrario al anterior, hecho que se explica fácilmente con la ley de Lenz.

Si ahora sustituimos el generador de C.C. por uno de C.A. y el galvanómetro por un voltímetro de C.A., al cerrar el interruptor podremos observar que el voltímetro conectado a la bobina B indica una determinada tensión. Si ahora sustituimos la bobina B por una de más espiras, se puede observar que la tensión de salida aumenta.

La explicación de esta experiencia hay que volver a buscarla en la inducción electromagnética. Ahora la bobina A es recorrida por una corriente variable, lo que produce, a su vez, un campo variable que atraviesa en todo momento a la bobina B. En consecuencia, en esta bobina se produce constantemente una f. e. m. de inducción. Si aumentamos el número de espiras en la bobina B, la fuerza electromotriz inducida aumenta.

Gracias a este principio funcionan los transformadores eléctricos, que estudiaremos más adelante. Además, con él podemos dar explicación a muchos fenómenos que aparecen en torno a las corrientes y campos magnéticos variables. Así, por ejemplo, se puede entender que es peligroso aproximarse demasiado a elementos conductores que estén en las cercanías de líneas de transporte de alta tensión, ya que los fuertes campos magnéticos producidos por sus conductores se establecen en un determinado radio de acción e inducen una elevada f. e. m. en todos los conductores que atraviesa. Para evitar accidentes conviene conectar a tierra todos los elementos metálicos que se encuentren en las proximidades de dichas redes.

### 11.1.4. Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética

La principal aplicación de la inducción electromagnética es, sin duda, la producción de energía eléctrica en grandes cantidades mediante los alternadores. Además, gracias a este fenómeno funcionan los transformadores eléctricos.

Existen muchas más aplicaciones, como, por ejemplo, los relés diferenciales, la pinza amperimétrica, los hornos de inducción, etcétera.

#### El alternador

Por ejemplo, en un alternador trifásico con un par de polos en el rotor, una rueda polar con un fuerte campo magnético gira a 3.000 revoluciones por minuto (50 vueltas por segundo) e induce en las tres bobinas del estator una tensión alterna trifásica de 50 Hz que se transporta y distribuye hasta los centros de consumo.

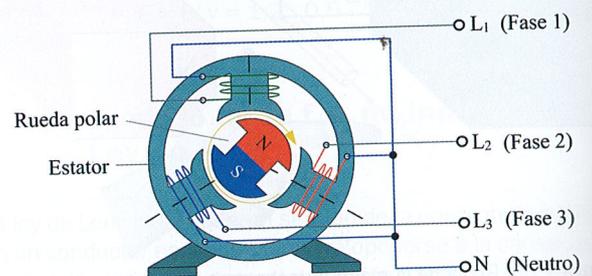


Figura 11.12. Alternador trifásico.

#### El transformador

Un transformador posee dos bobinados, uno primario y otro secundario, que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 11.13). Al conectar el bobinado primario, de  $N_1$  espiras, a una tensión alterna  $U_1$ , se produce en el núcleo magnético un flujo variable ( $\Phi$ ). Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras del mismo.

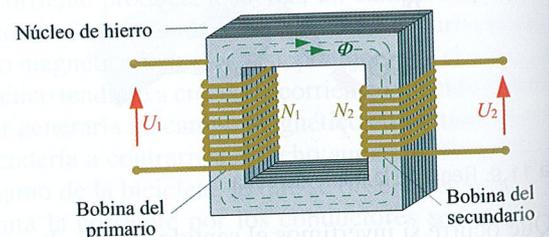


Figura 11.13. Transformador eléctrico.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que el del primario, la tensión del secundario también



será mayor. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor.

### Cargador inalámbrico para teléfono móvil

El cargador inalámbrico es capaz de cargar la batería de un teléfono móvil sin tener que conectar el cable del cargador. Para ello utiliza un cargador inalámbrico conectado a la red eléctrica (transmisor), que genera un campo magnético alterno de alta frecuencia. El teléfono debe venir equipado con un receptor de carga inalámbrica. El campo magnético del transmisor induce una tensión eléctrica en la bobina receptora que alimenta al cargador interno del teléfono sin necesidad de cables (Figura 11.14).

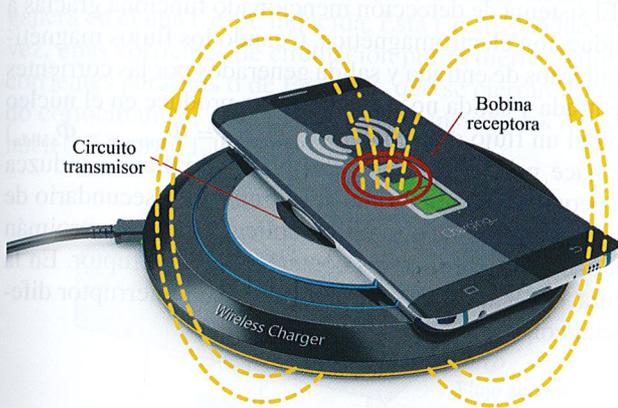


Figura 11.14. Carga inalámbrica para teléfono móvil.

### Sistemas de transmisión y recepción de señales de radio, vídeo y telefonía móvil

Todos estos sistemas consiguen transmitir la información gracias a la producción de campos magnéticos de alta frecuencia (del orden de kHz y MHz para sistemas de radio y de algunos GHz para la telefonía móvil). Estas señales electromagnéticas se recogen con facilidad a larga distancia por los receptores gracias al principio de inducción electromagnética. Cuanto mayor sea la frecuencia, la señal podrá transmitirse a más distancia sin que su intensidad de origen sea muy elevada, tal como ocurre con la telefonía móvil que emplea señales en torno a los 2 GHz ( $2 \cdot 10^9$  Hz) de frecuencia.

En la Figura 11.15 se muestra de forma simplificada cómo sería el sistema de emisión y recepción de un sistema de comunicación por radio.

En este caso la emisora se encarga de recoger la información a transmitir (señales de audio transformadas en señales eléctricas de una determinada frecuencia) y mediante circuitos de modulación adecuados genera una señal de alta frecuencia que es aplicada a la antena mediante un transformador.

Cuando la corriente alterna de alta frecuencia recorre el conductor de la antena, se produce un campo electromagnético variable de la misma frecuencia. Esto hace que se produzca, a su vez, una onda electromagnética que se radia en todas las direcciones.

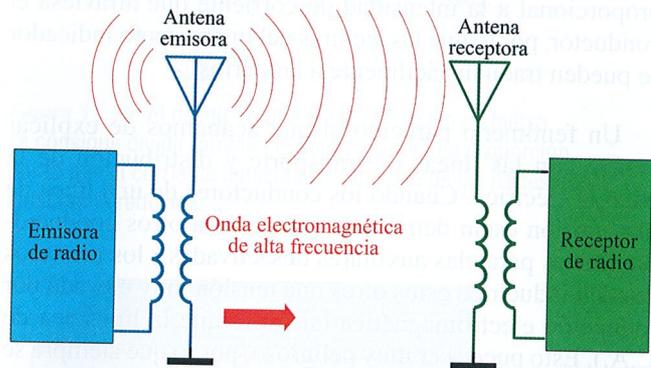


Figura 11.15. Sistema de comunicación por radio.

Si estas ondas electromagnéticas lanzadas al espacio cortan el conductor de una antena receptora, se induce en esta una fuerza electromotriz (similar al proceso que se da en un transformador) que reproduce la señal eléctrica emitida por el conjunto de emisora y antena de emisión. Por supuesto, cuanto más alejados nos encontremos de la antena de emisión, más pequeña será la señal recibida. Esta señal suele ser del orden de los microvoltios.

### Pinza amperimétrica

Con una pinza amperimétrica se pueden medir intensidades de corriente de un conductor sin tener que realizar contactos eléctricos. Para realizar la medida basta con abrazar con la pinza el conductor eléctrico aislado; la medida aparece directamente en un amperímetro de aguja o digital (Figura 11.16).

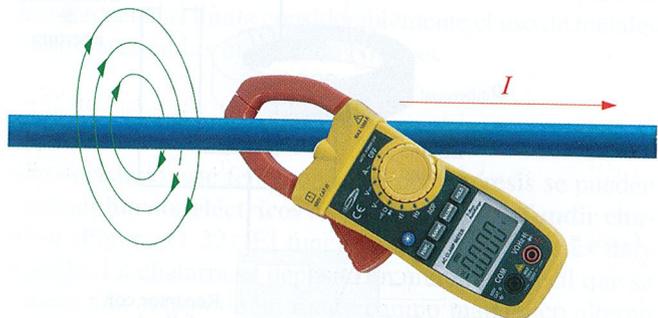


Figura 11.16. Pinza amperimétrica.

Este aparato es de gran utilidad para los equipos de reparación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas. Su funcionamiento es como sigue. Al conductor al que se le va a realizar la medida se lo abraza con el circuito magnético de

la pinza. Para corrientes alternas, dicho conductor produce un campo magnético circular a su alrededor, también alterno, que se conduce con facilidad por el circuito magnético de la pinza. En el otro extremo de esta existe una bobina conectada al instrumento de medida, donde se induce una f.e.m. por ser cortada por el campo alterno. Esta f.e.m. es proporcional a la intensidad de corriente que atraviesa el conductor, por lo que las lecturas del instrumento indicador se pueden traducir fácilmente a amperios.

Un fenómeno parecido al que acabamos de explicar ocurre con las líneas de transporte y distribución de la energía eléctrica. Cuando los conductores de una línea de alta tensión están demasiado próximos a otros conductores (líneas paralelas auxiliares desactivadas), los primeros pueden inducir en estos otros una tensión muy elevada por inducción electromagnética (siempre que la línea sea de C.A.). Esto puede ser muy peligroso, por lo que siempre se recomienda conectar estas líneas a tierra antes de efectuar una manipulación, aunque se esté muy seguro de que están desconectadas.

### Interruptor diferencial

El interruptor diferencial es un dispositivo que interrumpe el circuito en el caso de que exista un fallo de aislamiento, desconectando el circuito general. De esta forma se elimina el peligro de electrocución para las personas.

¿Cómo funciona el interruptor diferencial? (véase la Figura 11.17).

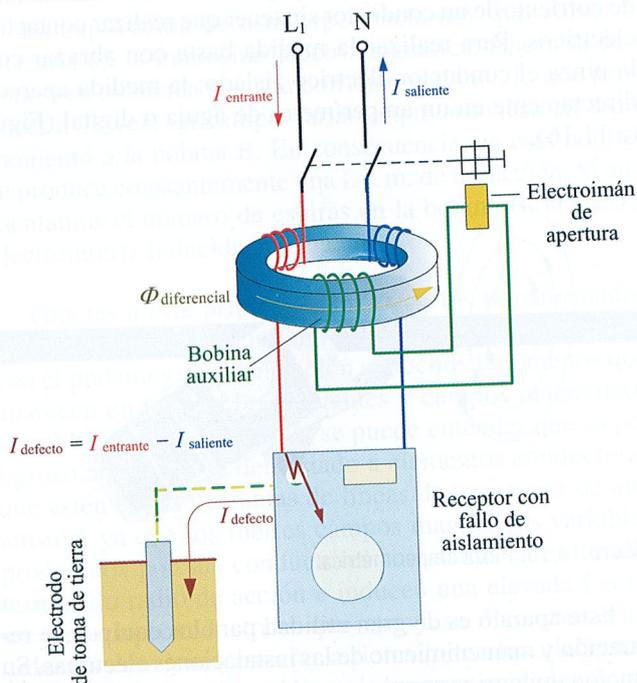


Figura 11.17. Funcionamiento del interruptor diferencial.

En condiciones normales, la corriente que entra por uno de los conductores es igual a la que sale por el otro ( $I_{\text{entrante}} = I_{\text{saliente}}$ ). Mientras se cumpla esta condición el interruptor diferencial permanecerá con sus contactos cerrados. Ahora bien, cuando aparece un defecto de aislamiento, existe una parte de la corriente eléctrica que se deriva por tierra (corriente de fuga o corriente de defecto), lo que hace que la intensidad de entrada sea diferente a la de salida. El interruptor diferencial está dotado de un sistema de detección que capta la diferencia ( $I_{\text{defecto}} = I_{\text{entrante}} - I_{\text{saliente}}$ ) y produce la apertura de sus contactos. De esta forma, en el momento en que aparece una corriente de derivación, el interruptor desconecta el circuito, con lo que evita los posibles peligros de la corriente de defecto.

El sistema de detección mencionado funciona gracias a la inducción electromagnética. Cuando los flujos magnéticos alternos de entrada y salida generados por las corrientes de entrada y salida no son iguales, se produce en el núcleo toroidal un flujo diferencial ( $\Phi_{\text{diferencial}} = \Phi_{\text{entrada}} - \Phi_{\text{salida}}$ ) que hace posible que en una bobina auxiliar se induzca una pequeña tensión (como si se tratase del secundario de un transformador), que al ser aplicada a un electroimán produce la apertura de los contactos del interruptor. En la Figura 11.18 se muestran las partes de un interruptor diferencial comercial.

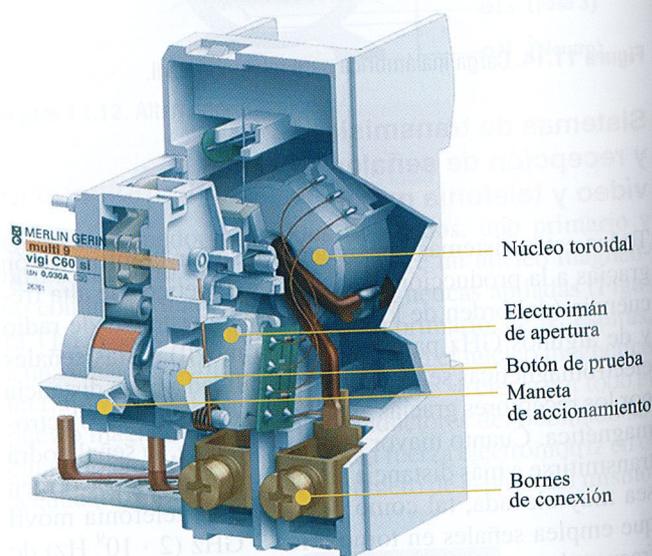


Figura 11.18. Interruptor diferencial. (Cortesía de Merlin Gerin.)

¿Qué es la sensibilidad del interruptor diferencial?

Para que el interruptor diferencial se dispare, se necesita una determinada intensidad de defecto. Los valores de la sensibilidad están normalizados y son los siguientes:

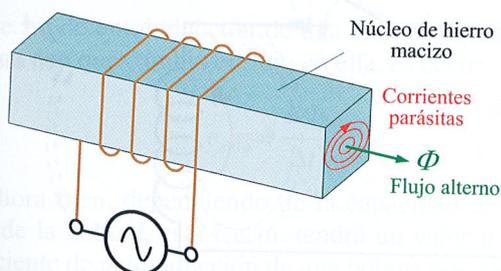
- Alta sensibilidad ( $I_d = 30 \text{ mA}$ ).
- Media sensibilidad ( $I_d = 300 \text{ mA}$ ).
- Baja sensibilidad ( $I_d = 500 \text{ mA}$ ).



## 11.2. Corrientes parásitas o de Foucault

Si observamos detenidamente los núcleos magnéticos de transformadores, motores y electroimanes de C.A., podremos observar que estos están contruidos con chapa magnética. Esto se hace así para evitar el efecto perjudicial de las corrientes parásitas o de Foucault.

Este efecto aparece sobre todo cuando se utilizan corrientes alternas. Cuando estas corrientes variables recorren los bobinados de electroimanes, transformadores, motores o generadores, el núcleo de hierro queda sometido a la acción de un campo magnético variable. Dado que el metal del núcleo es un buen conductor de la corriente eléctrica, se genera en él una f. e. m. inducida. Esta f. e. m. produce, a su vez, unas corrientes de circulación por el hierro, llamadas corrientes parásitas o de Foucault, que se cierran, formando cortocircuitos, por las secciones transversales de dicho núcleo (Figura 11.19).



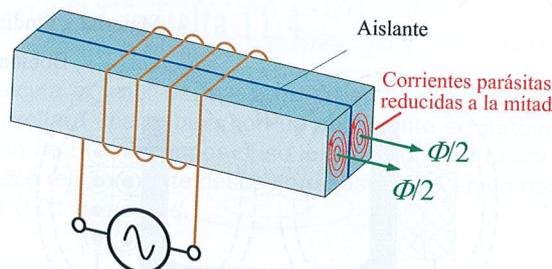
**Figura 11.19.** Corrientes parásitas en un núcleo de hierro macizo sometido a campos magnéticos variables.

Estas corrientes pueden llegar a alcanzar valores bastante elevados debido a la baja resistencia del hierro. En consecuencia, el núcleo se calienta por efecto Joule.

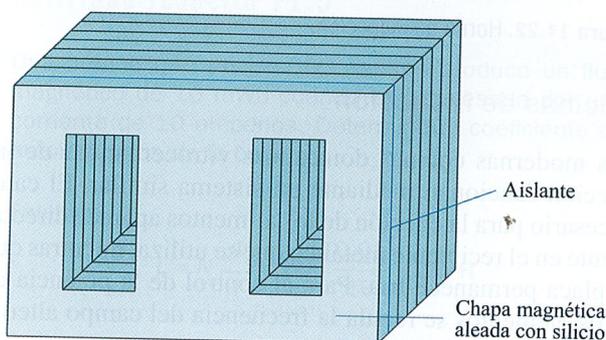
El calor generado por las corrientes parásitas puede llegar a ser muy elevado, especialmente en núcleos sometidos a flujos magnéticos alternos de considerable frecuencia, como es el caso de todos los transformadores, motores y generadores de corriente alterna.

Este fenómeno reduce considerablemente el rendimiento de las máquinas eléctricas; incluso puede llegar a calentar núcleos de gran sección hasta llegar al rojo vivo.

La forma de minimizar al máximo estas corrientes consiste en dividir longitudinalmente el núcleo y aislar eléctricamente cada una de las partes (Figura 11.20), formando un paquete de chapas magnéticas, tal como se muestra en la Figura 11.21. De esta forma se consigue que cada una de estas divisiones o chapas abarque menos flujo, con lo que la f. e. m. inducida se reduce y, con ella, las corrientes parásitas.



**Figura 11.20.** Al dividir en dos partes el núcleo de hierro se consigue dividir también el flujo en la misma proporción, por lo que la corriente inducida en cada una de las partes queda igualmente reducida.



**Figura 11.21.** Núcleo de un transformador formado por chapas magnéticas apiladas.

Las chapas utilizadas para formar el núcleo son de un espesor de menos de un milímetro y se aíslan eléctricamente entre sí mediante una fina capa de barniz. Además, a estas chapas magnéticas se las alea con silicio en un pequeño porcentaje para elevar la resistividad y, así, reducir considerablemente estas pérdidas.

Cuanto mayor sea la frecuencia de los campos alternos a la que se somete a los núcleos de hierro, más se calentarán estos por efecto de las corrientes parásitas. El empleo de altas frecuencias limita considerablemente el uso de metales conductores en los núcleos de bobinas.

### Hornos de inducción

Aprovechando este fenómeno y el de histéresis se pueden construir **hornos eléctricos de inducción para fundir chatarra** (Figura 11.22). El funcionamiento de estos es muy sencillo. La chatarra se deposita en un recipiente al que se somete a la acción de un fuerte campo magnético alterno de frecuencia elevada creado por un electroimán. El calor aparece directamente en los compuestos ferromagnéticos de la chatarra en los que se inducen dichos campos alternos. Los repetidos ciclos de histéresis y las fuertes corrientes parásitas, que circulan por los compuestos metálicos de la chatarra, elevan fuertemente la temperatura de esta hasta fundirla.

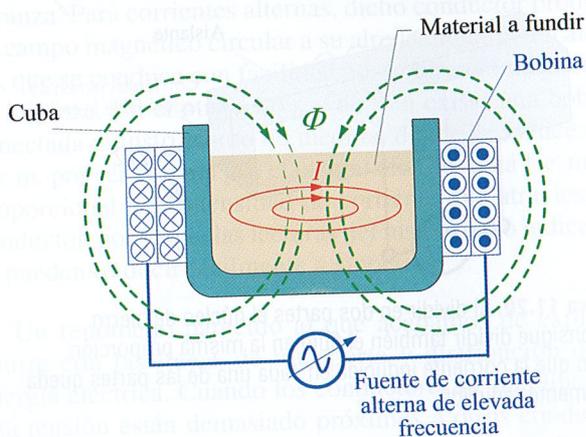


Figura 11.22. Horno de inducción.

### Cocinas de inducción

Las modernas cocinas domésticas vitrocerámicas de inducción funcionan mediante un sistema similar. El calor necesario para la cocción de los alimentos aparece directamente en el recipiente metálico que se utiliza, mientras que la placa permanece fría. Para el control de la potencia de estos elementos se regula la frecuencia del campo alterno aplicado (Figura 11.23).

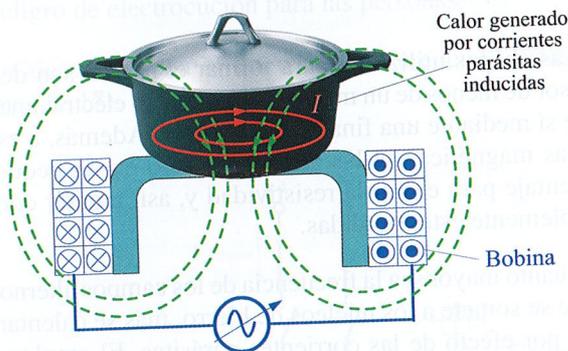


Figura 11.23. Cocina de inducción.

## 11.3. Autoinducción. Bobinas

Seguro que habrás podido observar en alguna ocasión que al abrir los contactos de un interruptor aparece entre ellos una *chispa de ruptura*. Esta chispa es mucho más fuerte en el caso de que el interruptor corte la corriente que alimenta a una bobina (motores, transformadores, etc.). Estos fenómenos tienen que ver fundamentalmente con la *autoinducción*.

La autoinducción, como el propio término indica, significa inducirse a sí misma f.e.m. Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable, esta genera, a su vez, un campo magnético también variable que corta a los

conductores de la propia bobina. Esto origina en ellos una f.e.m. inducida, llamada f.e.m. de autoinducción, que, según la ley de Lenz, tendrá un sentido tal que siempre se opondrá a la causa que la produjo.

Según esto, al cerrar el interruptor de un circuito que alimenta una bobina (Figura 11.24), aparece una corriente eléctrica por la bobina que tiene que aumentar de cero hasta su valor nominal en un tiempo relativamente corto. Esta variación de corriente por la bobina genera en sus conductores un flujo magnético creciente que, al cortarlos, provoca una f.e.m. de autoinducción. El sentido de esta f.e.m. es tal que impide que el flujo se establezca y, por tanto, la intensidad sufre una oposición y se retrasa (la tensión provocada por la autoinducción tiende a restar los efectos de la tensión de la batería). Cuando la intensidad se estabiliza, la f.e.m. de autoinducción desaparece y en la bobina aparece el flujo correspondiente.

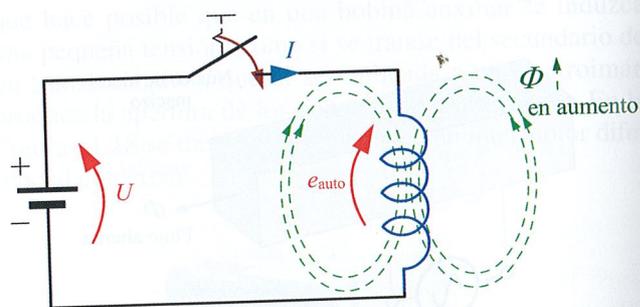


Figura 11.24. Cierre de un circuito con bobina.

Al abrir el interruptor (Figura 11.25), el flujo magnético que abraza a la bobina tiende a desaparecer, lo que origina una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que no deja que ni el flujo ni la corriente desaparezcan (la f.e.m. de autoinducción cambia de sentido y tiende a sumarse a la tensión de la batería). La tensión que aparece entre los contactos suele ser tan grande que provoca una chispa de ruptura entre ellos. El valor de la f.e.m. de autoinducción se hace mayor al aumentar la velocidad con que abrimos los contactos del interruptor y cuanto mejor sea la capacidad de la bobina de generar flujo magnético.

Las chispas de ruptura acortan la vida de los contactos de todos los dispositivos que tengan que cortar un circuito en carga, tales como interruptores de maniobra, interruptores automáticos, relés de contactos, contactores, etcétera.

Una forma de alargar la vida de los contactos consiste en reducir la resistencia de contacto al mínimo, para lo cual se recubre de plata la superficie de contacto. A su vez, se procura que el arco formado en la apertura se estire rápidamente con la intención de aumentar el aislamiento entre los contactos; además se consigue enfriar dicho arco en poco tiempo. Esto último se consigue construyendo los dispositivos de apertura con muelles de recuperación.

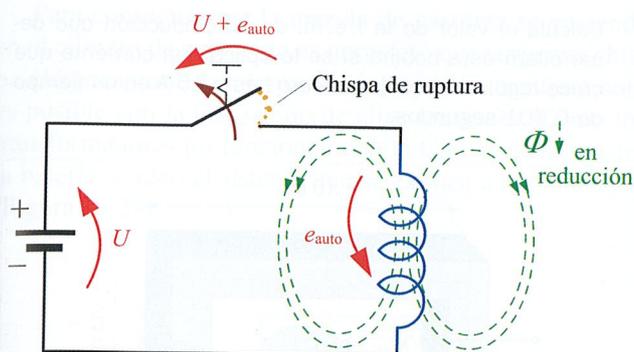


Figura 11.25. Apertura de un circuito con bobina.

En cierta forma, una bobina se puede comparar a un volante de inercia. Cuando el flujo magnético tiende a crecer en la bobina, esta se carga de energía magnética. Al cortar la corriente, el flujo tiende a desaparecer, devolviendo la energía acumulada.

### 11.3.1. Coeficiente de autoinducción

La f. e. m. de autoinducción de una bobina depende de la rapidez con que cambia el flujo en ella, es decir:

$$e_{\text{auto}} = -L \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Ahora bien, dependiendo de la capacidad de generar flujo de la bobina, esta f. e. m. tendrá un valor u otro. El coeficiente de autoinducción de una bobina nos dice la capacidad que tiene esta de generarse a sí misma f. e. m. de autoinducción.

$$e_{\text{auto}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$L$  = Coeficiente de autoinducción en henrios (H).

En esta expresión se puede apreciar que la f. e. m. de autoinducción aumenta con el coeficiente de autoinducción y con la rapidez con que varía la intensidad de corriente.

El coeficiente de autoinducción de una bobina se puede expresar como la relación entre el flujo magnético generado por la bobina y la intensidad de corriente que ha sido necesario aplicarle. Para un número de espiras  $N$ , tendremos que:

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

El coeficiente de autoinducción de una bobina depende de sus características constructivas. Se consiguen bobinas con coeficientes de autoinducción altos con núcleos de alta permeabilidad y gran número de espiras.

### Actividad resuelta 11.4

Calcula el valor de la f. e. m. de autoinducción que desarrollará una bobina con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 10 A en un tiempo de 0,01 segundos.

Solución:

$$e_{\text{auto}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0,05 \frac{10}{0,01} = 50 \text{ V}$$

### Actividad resuelta 11.5

Una bobina que posee 500 espiras produce un flujo magnético de 10 mWb cuando es atravesada por una corriente de 10 amperios. Determina el coeficiente de autoinducción de la bobina.

Solución:

$$L = N \frac{\Phi}{I} = 500 \frac{0,01}{10} = 0,5 \text{ H}$$

### Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire

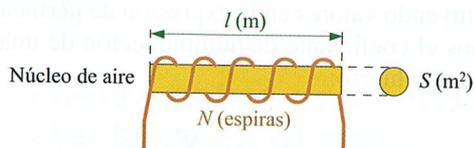


Figura 11.26. Bobina con núcleo de aire.

Para una bobina el flujo magnético que se produce en su interior es igual a:

$$\Phi = B_0 \cdot S$$

Dado que el núcleo es de aire, la inducción magnética en su interior será igual a:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Sustituyendo estos valores en la expresión conocida del coeficiente de autoinducción de una bobina, tenemos que:

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} = N \cdot \frac{B_0 \cdot S}{I} = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot S}{l \cdot I} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

## 11. INTERACCIÓN ENTRE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y UN CAMPO MAGNÉTICO

- $L$  = Coeficiente de autoinducción (H).
- $\mu_0$  = Permeabilidad del vacío ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ).
- $N$  = Número de espiras de la bobina.
- $S$  = Sección de la bobina ( $m^2$ ).
- $l$  = Longitud de la bobina (m).

### Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro

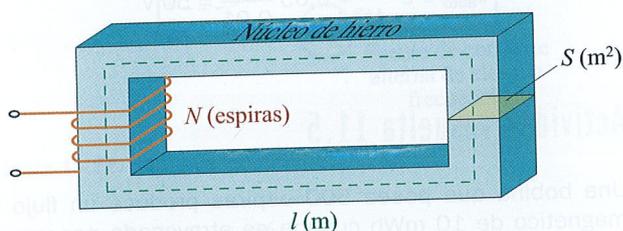


Figura 11.27. Bobina con núcleo de hierro.

En este caso la bobina conseguirá un aumento significativo de su coeficiente de autoinducción debido al aumento de la permeabilidad del núcleo. Para un núcleo de hierro con una permeabilidad relativa  $\mu_r$ , la inducción alcanzada por el núcleo será igual a:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Sustituyendo valores en la expresión de permeabilidad, obtenemos el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

### Actividad propuesta 11.1

Calcula el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire de la que se conocen los siguientes datos: longitud de la bobina = 10 cm; número de espiras = 1.000; diámetro de espira = 3 cm.

### Actividad propuesta 11.2

La reactancia de un tubo fluorescente posee un núcleo de chapas magnéticas con un coeficiente de permeabilidad relativo de 100 y está bobinada con un número de espiras igual a 2.000. Si las dimensiones de la bobina son las que se muestran en la Figura 11.28, calcula el coeficiente de autoinducción de dicha bobina.

Calcula el valor de la f.e.m. de autoinducción que desarrollará esta bobina si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 15 A en un tiempo de 0,001 segundos.

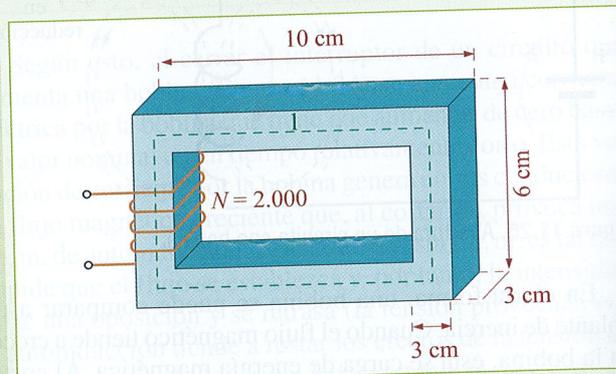


Figura 11.28.

### Actividad propuesta 11.3

Sabiendo que la energía  $E$  que almacena en julios una bobina ideal (sin resistencia eléctrica en sus conductores) con un coeficiente de autoinducción  $L$  cuando se produce una variación de corriente  $I$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Calcula la energía almacenada en una bobina con 100 mH de coeficiente de autoinducción cuando es atravesada por una intensidad de corriente de 5 A.



La solución a estas Actividades propuestas la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

### 11.3.2. Aplicaciones prácticas de la autoinducción

Aprovechando el efecto de la f.e.m. autoinducida en una bobina se pueden construir dispositivos sencillos que consiguen elevar fuertemente la tensión, como por ejemplo:

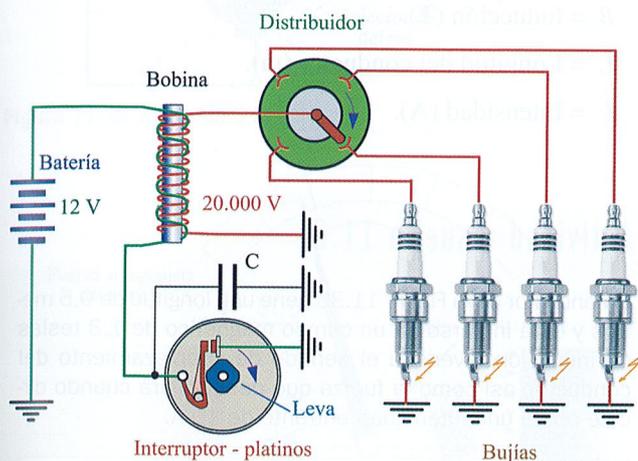
- Encendido de un motor de explosión.
- Encendido de lámparas fluorescentes.

### Encendido de un motor de explosión

Los automóviles de gasolina funcionan con motores de explosión. El sistema eléctrico de los mismos se alimenta mediante una batería de acumuladores de unos 12 V en C.C.



Para conseguir que la mezcla de gasolina se encienda en el cilindro de explosión es necesario que surja una chispa eléctrica entre las puntas de la bujía. Esto último solo es posible con la utilización de altas tensiones. Como los transformadores no funcionan con la C.C. que suministra la batería se ideó el sistema que se explica a continuación (Figura 11.29).



**Figura 11.29.** Esquema del sistema de encendido de un motor de explosión.

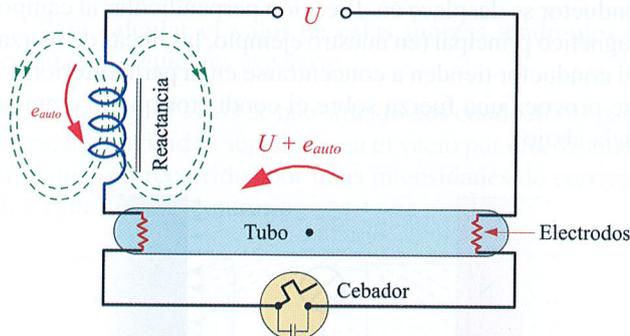
La leva gira arrastrada por el motor de explosión y hace que los contactos del interruptor de contactos de platino se abran rápidamente, cortando bruscamente el circuito que alimenta al primario de la bobina de encendido con núcleo de chapa magnética. Cuanto mayor sea la rapidez con que se abre el circuito, mayor será la f.e.m. de autoinducción que aparece en el primario. El secundario de la bobina posee un gran número de espiras, por lo que, a igualdad de flujo que en el primario, se induce en ella una tensión de miles de voltios. El distribuidor, que es una especie de conmutador rotativo, va poniendo sucesivamente en contacto al secundario con cada una de las bujías del motor de explosión. En el espacio que separa los electrodos de las bujías aparece una descarga en forma de chispa térmica, debido a la alta tensión entre los mismos, que provoca el encendido de la mezcla. El condensador conectado entre los contactos de los platinos sirve para eliminar el arco entre los mismos, evitando así la destrucción prematura de dichos contactos.

Hoy en día los automóviles modernos ya no utilizan este sistema de encendido. Gracias a la electrónica se ha conseguido sustituir el sistema mecánico de los platinos por un sistema electrónico mucho más sofisticado, aunque la bobina de encendido sigue existiendo.

### Encendido de lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes funcionan gracias al efecto de luminiscencia que se da en ciertos gases nobles cuando son atravesados por una corriente eléctrica. El problema que pre-

sentan este tipo de lámparas es que necesitan una tensión muy elevada para que comiencen a fluir las cargas eléctricas por el tubo de descarga. Una vez que el tubo ha sido arrancado se mantiene la corriente eléctrica con una tensión baja.

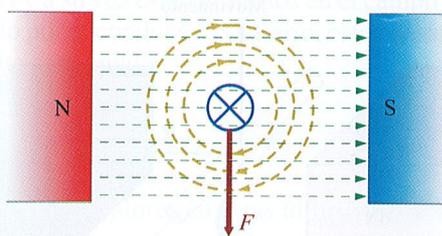


**Figura 11.30.** Circuito de arranque de un tubo fluorescente.

Para conseguir esta tensión en el arranque se incorpora una bobina de alto coeficiente de autoinducción (reactancia) en serie con el tubo de descarga. Cuando cerramos el interruptor, el cebador cierra sus contactos, permitiendo que los filamentos de los extremos calienten a los electrodos de emisión (esto facilita la emisión electrónica). En muy poco tiempo, el cebador abre bruscamente sus contactos, provocando una fuerte f.e.m. de autoinducción en la bobina. Esta tensión queda aplicada a los extremos del tubo y es suficiente para que se encienda el mismo. Una vez arrancado el tubo, el cebador mantiene sus contactos abiertos (Figura 11.30).

## 11.4. Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético

En un generador eléctrico se produce una f.e.m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso.



**Figura 11.31.** Fuerza en un conductor recorrido por una corriente eléctrica cuando está inmerso en un campo magnético.

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

## 11. INTERACCIÓN ENTRE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y UN CAMPO MAGNÉTICO

En la Figura 11.31 se puede ver un conductor eléctrico atravesado por una corriente entrante y sometido a la acción del campo magnético de un imán. La corriente eléctrica del conductor produce a su vez un campo magnético circular que interactúa con el del imán (Figura 11.32) y hace que el conductor se desplace en dirección perpendicular al campo magnético principal (en nuestro ejemplo, las líneas de fuerza del conductor tienden a concentrarse en la parte inferior, lo que provoca una fuerza sobre el conductor que lo empuja hacia abajo).

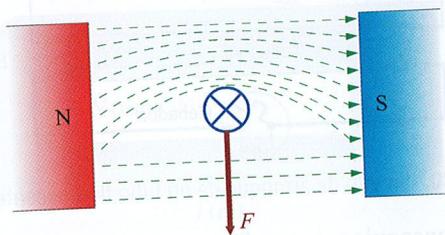


Figura 11.32.

Se observa que, si cambiamos el sentido de la corriente o el del campo, también cambia el sentido de la fuerza (Figura 11.33).

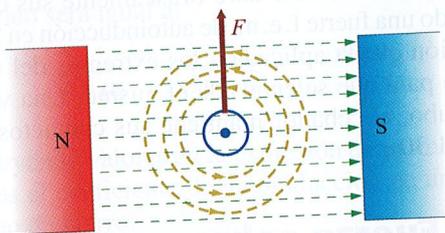


Figura 11.33.

Para determinar el sentido de la fuerza se aplica la regla de Fleming de la mano izquierda (Figura 11.34). Se aplica utilizando el mismo procedimiento que seguimos para la mano derecha, teniendo en cuenta que se utiliza el sentido convencional de la corriente.

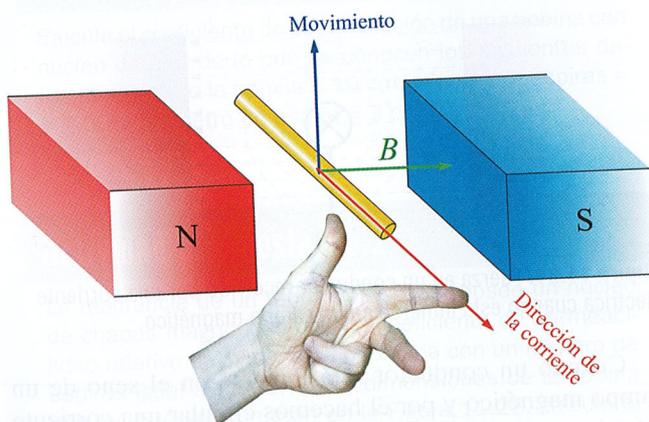


Figura 11.34. Regla de la mano izquierda para determinar el sentido de la fuerza.

El valor de la fuerza aumenta con la intensidad de la corriente, con el valor de la inducción del campo magnético y con la longitud del conductor.

$$F = B \cdot L \cdot I$$

$F$  = Fuerza (N).

$B$  = Inducción (T).

$L$  = Longitud del conductor (m).

$I$  = Intensidad (A).

### Actividad resuelta 11.6

El conductor de la Figura 11.35 tiene una longitud de 0,5 metros y está inmerso en un campo magnético de desplazamiento del conductor, así como la fuerza que desarrollará cuando circule por él una intensidad entrante de 10 A.

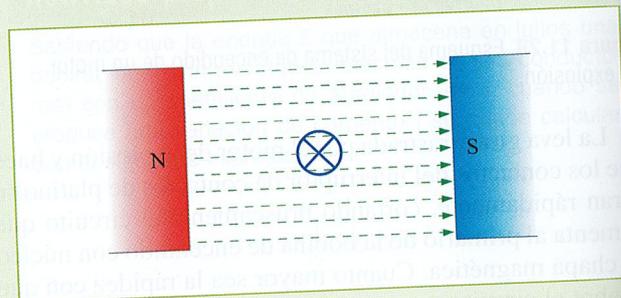


Figura 11.35.

#### Solución:

Aplicando la regla de la mano izquierda averiguamos que el conductor se desplazará hacia arriba.

$$F = BLI = 1,3 \cdot 0,5 \cdot 10 = 6,5 \text{ N}$$

Gracias a este principio desarrollado por Laplace, Biot y Savart se pueden construir multitud de dispositivos, como, por ejemplo, todo tipo de motores eléctricos, aparatos de medida analógicos, altavoces, etcétera.

En un motor de C.C. se consigue que cada uno de los conductores opuestos de la bobina desarrolle un par de fuerzas que hace girar el motor (Figura 11.36).

En un instrumento de medida de bobina móvil se consigue que el par de fuerzas que desarrollan los conductores de la bobina sea proporcional a la corriente a medir. El equilibrio entre la fuerza antagonista del muelle y dicho par hace que la aguja se desplace por la escala graduada indicando el resultado de la medida (Figura 11.37).

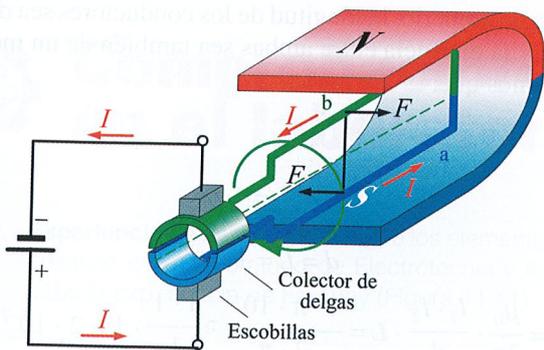


Figura 11.36. Motor de C.C.

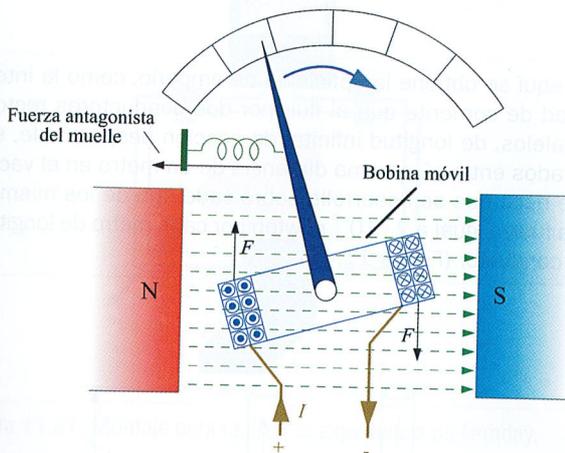


Figura 11.37. Instrumento de medida analógico.

### 11.4.1. Fuerza entre dos corrientes paralelas

Fue André Marie Ampère el primero en darse cuenta de que, los conductores al ser recorridos por una corriente eléctrica y producir un campo magnético, no solo interactúan ejerciendo fuerzas sobre otros elementos con propiedades magnéticas como imanes, sustancias ferromagnéticas, etc., sino que también lo hacen sobre otros conductores próximos que también estén recorridos por una corriente. En su investigación descubrió que cuando se hace circular una corriente eléctrica entre dos conductores rectos situados a una cierta distancia, estos desarrollan unas fuerzas entre ellos que pueden ser de atracción o repulsión, en función del sentido relativo de ambas corrientes (Figura 11.38).

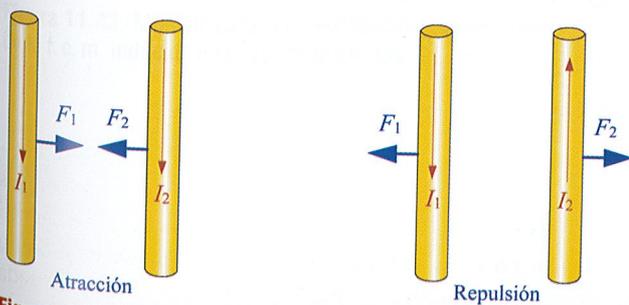


Figura 11.38. Fuerzas entre conductores paralelos.

Para corrientes del mismo sentido, las fuerzas son de atracción y para corrientes de sentido contrario las fuerzas resultan ser de repulsión. Para poder entender este último enunciado basta con aplicar las reglas de Fleming de la mano derecha e izquierda.

Para calcular el valor de estas fuerzas tendremos en cuenta los siguientes aspectos:

En la Figura 11.39 se han situado dos conductores paralelos, de longitud  $L$ , separados en el vacío por una distancia  $d$ , y que son recorridos por unas intensidades de corriente  $I_1$  e  $I_2$  de sentido contrario.

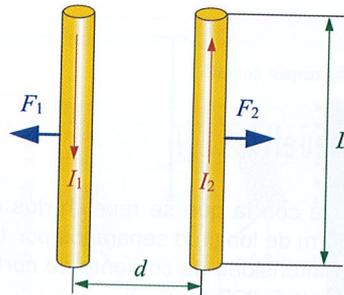


Figura 11.39.

La corriente  $I_1$  produce un campo magnético cuya inducción magnética en un punto situado en el segundo conductor será igual a:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d}$$

Por otro lado, la corriente  $I_2$  también produce un campo magnético sobre el primer conductor igual a:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{d}$$

Dado que los conductores son recorridos por sus propias corrientes y a su vez están inmersos en el campo magnético producido por el conductor contrario, estos desarrollan una fuerza que será igual a:

$$F_1 = B_1 L I_2 \quad F_2 = B_2 L I_1$$

Sustituyendo valores en estas últimas ecuaciones tenemos que:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L \quad F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2 \cdot I_1}{d} \cdot L$$

De donde se concluye que las fuerzas ejercidas por ambos conductores son del mismo valor.



**NOTA**

Las fuerzas con las que interactúan los conductores cuando son recorridos por corrientes eléctricas se ponen de manifiesto en instalaciones donde se producen grandes intensidades de cortocircuito. En instalaciones con conductores en forma de pletina de cobre rígida, los esfuerzos dinámicos a los que quedan sometidas las mismas en caso de un cortocircuito elevado puede llegar a doblarlas e incluso a partirlas si no se diseñan adecuadamente. También es posible observar cómo los conductores de una red aérea de alta tensión se balancean después de un cortocircuito.

**Actividad resuelta 11.7**

Calcula la fuerza con la que se repelen dos conductores paralelos de 50 m de longitud separados por 10 cm, si por ellos fluye una intensidad de corriente de cortocircuito de distinto sentido de 5.000 A.

**Solución:**

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{5.000 \cdot 5.000}{10 \cdot 10^{-2}} \cdot 50 = 2.500 \text{ N}$$

**11.4.2. Definición electromagnética de amperio**

Si en la expresión obtenida de la fuerza ejercida entre dos corrientes eléctricas, hacemos que ambas corrientes sean

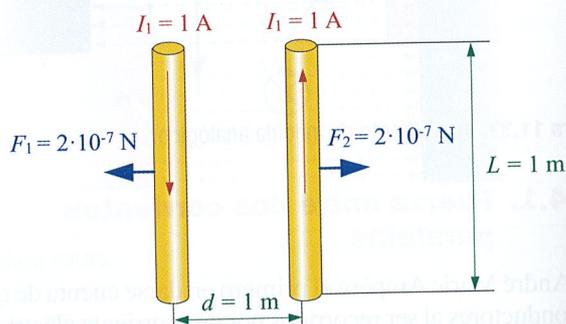
igual a un amperio, la longitud de los conductores sea de un metro y la distancia entre ambas sea también de un metro, tendremos que:

$$I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$$

$$d = L = 1 \text{ m}$$

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot 1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

De aquí se obtiene la definición de amperio, como la intensidad de corriente que al fluir por dos conductores rectos, paralelos, de longitud infinita, de sección despreciable, separados entre sí, por una distancia de un metro en el vacío, que hace que se desarrolle sobre cada uno de los mismos una fuerza igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por cada metro de longitud de conductor (Figura 11.40).



**Figura 11.40.** Definición de amperio.



## Comprobación práctica en el laboratorio

**11.1. Experiencia de Faraday.** Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de Electrotecnia y lleva a cabo la experiencia de Faraday (Figura 11.41).

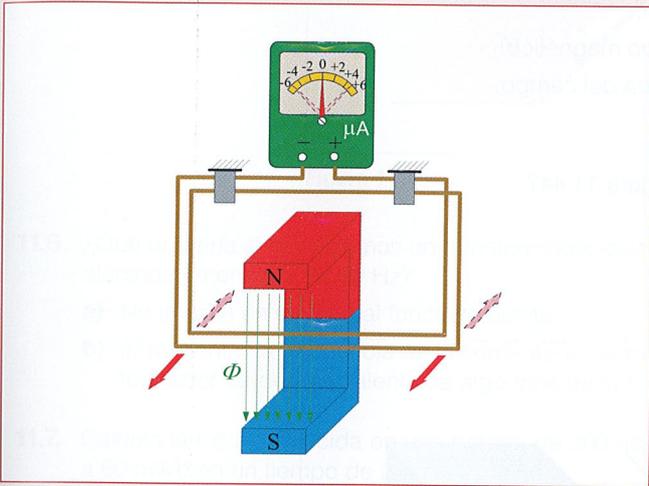


Figura 11.41. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

**11.2. Fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos.** Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de Electrotecnia y comprueba la fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos (Figura 11.42).

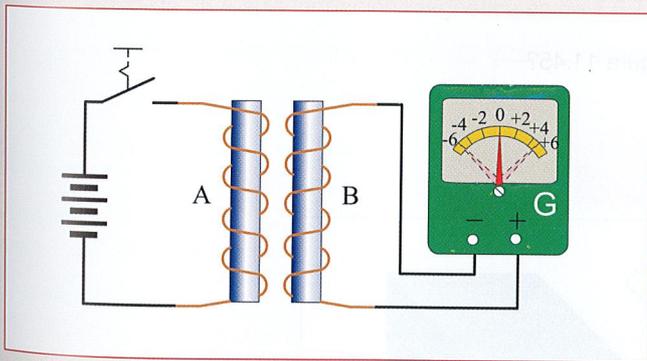


Figura 11.42. Montaje para la comprobación experimental de la f. e. m. inducida en circuitos próximos.

**11.3. Fuerza producida por un conductor.** Suspende una bobina en el seno del campo magnético de un imán. Comprueba que al hacer circular una C.C. por la bobina, en ella aparecen fuerzas que tienden a desplazarla (Figura 11.43).

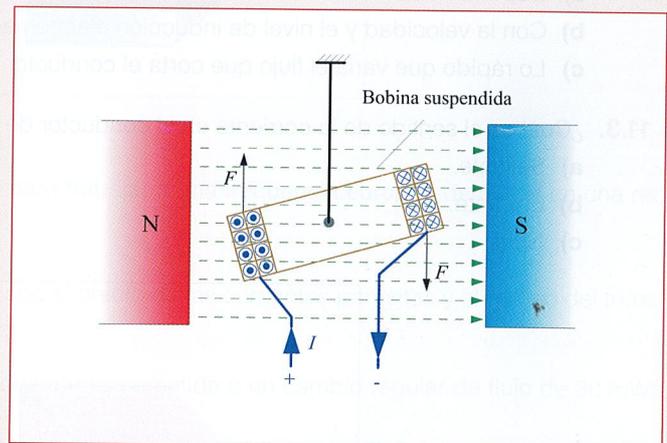


Figura 11.43. Montaje para la comprobación experimental de la fuerza producida por un conductor.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

## Actividades de comprobación

- 11.1.** La inducción electromagnética se produce cuando:
- Se mueven conductores en dirección perpendicular a un campo magnético fijo.
  - Se mueven conductores en dirección paralela a un campo magnético fijo.
  - Se somete a conductores fijos a la acción de un campo magnético variable.
- 11.2.** El valor de la f.e.m. inducida en un conductor aumenta con:
- Depende exclusivamente de lo intenso que sea el campo magnético.
  - Con la velocidad y el nivel de inducción electromagnética del campo.
  - Lo rápido que varía el flujo que corta el conductor.
- 11.3.** ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.44?
- Saliente.
  - Entrante.
  - Nula.

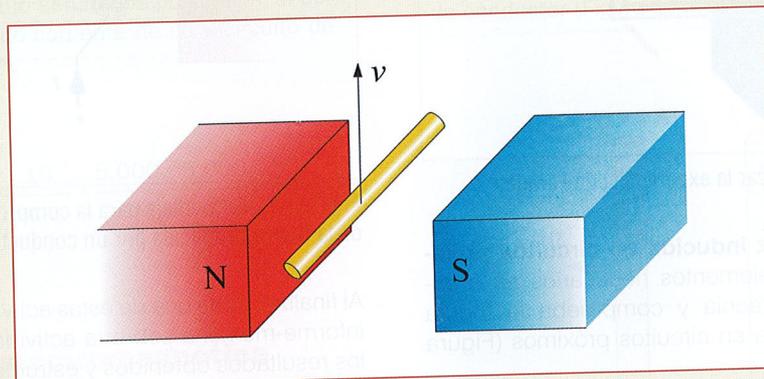


Figura 11.44.

- 11.4.** ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.45?
- Saliente.
  - Entrante.
  - Nula.

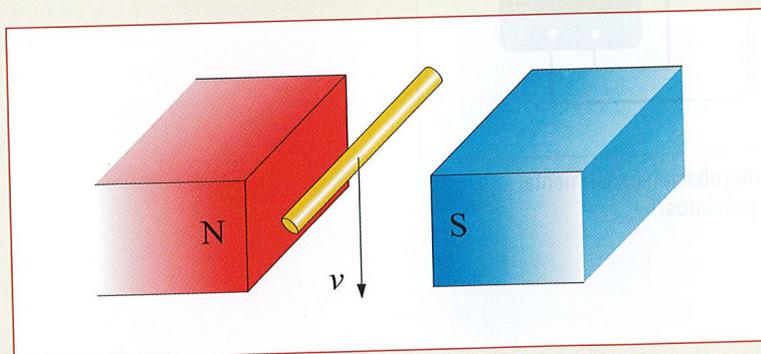


Figura 11.45.



11.5. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.46?

- a) Saliente.
- b) Entrante.
- c) Nula.

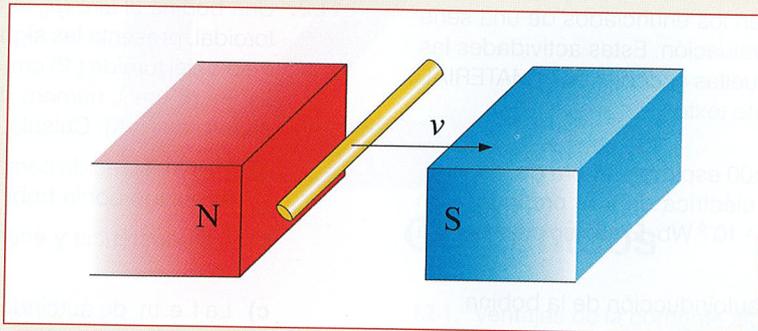


Figura 11.46.

11.6. ¿Qué ocurriría si utilizásemos un transformador diseñado para trabajar a una frecuencia europea de 50 Hz en una red eléctrica americana de 60 Hz?

- a) No influiría en su normal funcionamiento.
- b) Al aumentar la frecuencia de la corriente se ve potenciado el efecto de las corrientes parásitas y el núcleo del transformador tendería a calentarse algo más de lo habitual.

11.7. Calcula la f. e. m. inducida en una bobina de 300 espiras cuando es sometida a un cambio regular de flujo de 30 mWb a 60 mWb en un tiempo de 20 ms.

11.8. Un conductor recto se mueve perpendicularmente en el seno de un campo magnético de 0,95 teslas a una velocidad de 5 m/s. Determina el valor de la f. e. m. inducida si la longitud del conductor es de 15 cm.

11.9. ¿Cuál será el coeficiente de autoinducción de una bobina que, al ser sometida a un cambio de corriente de 1 A a 10 A en 40 ms, produce una f. e. m. de autoinducción de 220 V?

11.10. ¿En qué dirección y con qué fuerza se desplazará el conductor de la Figura 11.47 cuando sea recorrido por una intensidad de 25 A si la inducción magnética es de 1,6 T y su longitud es de 50 cm?

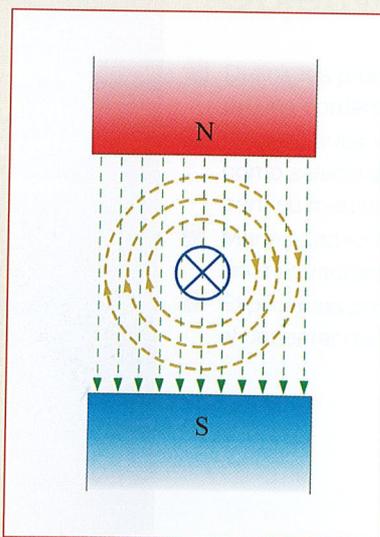


Figura 11.47.

## Actividades de evaluación resueltas



A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

**11.1.** Por un solenoide de 300 espiras y 15 cm de longitud, circula una corriente eléctrica de 4 A, creándose un flujo magnético de  $1,4 \cdot 10^{-5}$  Wb. El núcleo de la bobina es de aire. Calcula:

- El coeficiente de autoinducción de la bobina.
- La inducción magnética en el centro del solenoide.
- El valor de la sección transversal del núcleo.

(Dato:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

**11.2.** Una bobina al aire ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m), de estructura toroidal, presenta las siguientes características: radio medio del toroide (15 cm), superficie encerrada por la espira ( $6 \text{ cm}^2$ ), número de espiras (1.400), corriente absorbida (6 A). Calcula:

- La intensidad de campo, la inducción y el flujo total abrazado por la bobina.
- La inductancia y energía almacenada por la misma.
- La f. e. m. de autoinducción cuando se interrumpe la corriente linealmente en 3 ms.

## Actividades de ampliación



Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de «**actividades de evaluación propuestas de ampliación (11)**» para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.