

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).

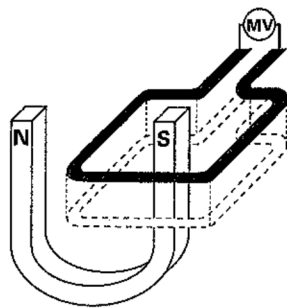


Figura 11.1. Al mover el conductor en el campo magnético del imán se genera una f.e.m.

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).

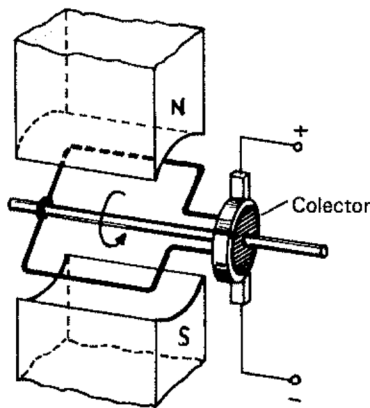


Figura 11.2. Dinamo elemental.

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 11.3, de tal 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.

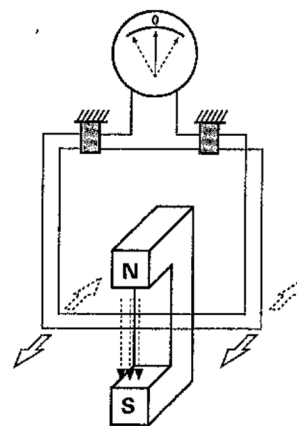


Figura 11.3. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

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

Si ahora movemos los conductores en sentido paralelo a las líneas de campo (hacia arriba y hacia abajo según la Figura 11.3) 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 sólo se produce f.e.m. mientras los conductores cortan el campo magnético. Además la f.e.m. depende de la velocidad relativa de corte de los conductores respecto al campo magnético, aumentando la f.e.m. 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. 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 $\Delta \Phi / \Delta t$ nos 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 a 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 al que se le aplica corriente alterna.

Ejemplo: 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. Averiguar la f.e.m. inducida.

Solución: $\Delta\Phi$ = variación de flujo = 10 - 2 = 8 mWb

Δt = 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 también se puede expresar de otra forma. Para un conductor de longitud L que se desplaza perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de inducción B a una velocidad v, tenemos que:

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

e = f.e.m. inducida en voltios

B = inducción magnética en teslas

L = longitud del conductor en metros

v = velocidad perpendicular en m/s

Ejemplo: 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. Determinar el valor de la f.e.m. inducida en el mismo si posee una longitud de 0,5 m.

Solución: $e = B L v = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 5 = 3 \text{ V}$

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 produce” (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 un 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 generará 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 los mismos.

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 complejo 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 11.4: 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**).

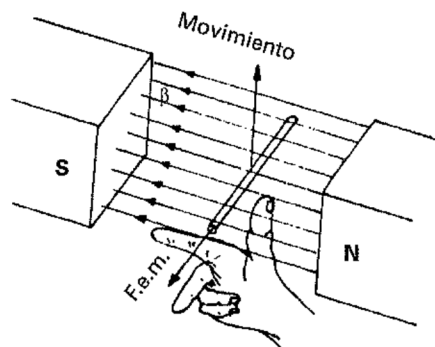


Figura 11.4. Regla de la mano derecha para determinar el sentido de la f.e.m. inducida.

Una forma sencilla de no olvidarse de esta regla es aplicando la siguiente regla nemotécnica: **mo-ca-co** que significa **movimiento, campo, corriente** (Figura 11.5).

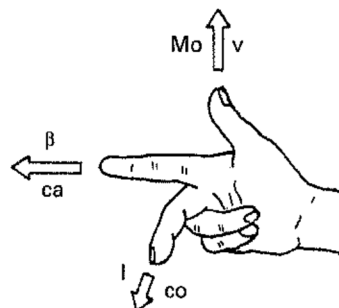


Figura 11.5. Regla de la mano derecha.

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

¿Qué ocurre si invertimos el sentido de giro de una dinamo?: Al moverse los conductores en sentido contrario al ante-

rior, la corriente también se invertirá, dando 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.

Ejemplo: 11.3

El sentido de la corriente inducida en el conductor eléctrico de la Figura 11.6 se ha determinado aplicando la regla de la mano derecha.

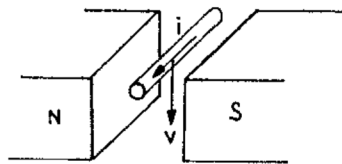


Figura 11.6

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 la otra, tal como se muestra en la Figura 11.7. 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 sólo durante un pequeño período de tiempo. Si ahora abrimos el interruptor podremos comprobar que el galvanómetro vuelve a detectar el paso de corriente, pero ahora en sentido contrario.

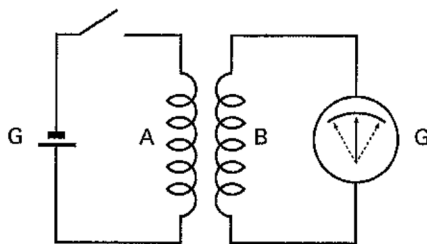


Figura 11.7. Comprobación experimental de la f.e.m. inducida en un circuito próximo.

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 misma un campo magnético variable y creciente. Al estar la bobina B muy próxima a la A, dicho campo magnético la atraviesa, produciéndose 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 sólo se produce mientras el campo magnético sea variable, es decir, mientras la corriente por la bobina A esté creciendo, hecho que ocurre sólo durante un pequeño período 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 que 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 variables producidos por sus conductores se establecen en un determinado radio de acción e inducen una elevada f.e.m. en todos aquellos conductores que atraviesa. Para evitar accidentes conviene conectar a tierra todos aquellos 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, pinza amperimétrica, hornos de inducción, etc.

11.2 Corrientes parásitas o de Foucault

Si observamos detenidamente los núcleos magnéticos de transformadores, motores y electroimanes de C.A., podremos observar que éstos 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 11.8).

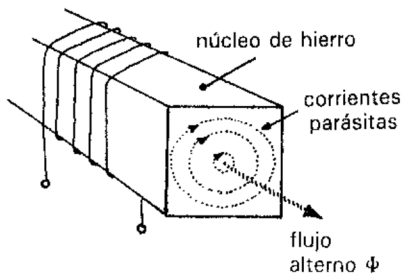


Figura 11.8. Corrientes parásitas en un núcleo de hierro macizo sometido a campos magnéticos variables.

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 estas corrientes 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.

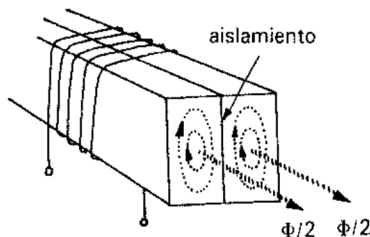


Figura 11.9. Al dividir en dos partes el núcleo de hierro se consigue dividir también el flujo en la misma proporción, por lo que la corriente inducida en cada una de las partes queda igualmente reducida.

La forma de minimizar al máximo estas corrientes consiste en dividir longitudinalmente el núcleo y aislar eléctricamente cada una de las partes (Figura 11.9), formando un

paquete de chapas magnéticas, tal como se muestra en la Figura 11.10. 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.

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 les alea con silicio en un pequeño porcentaje para elevar la resistividad y, así, reducir considerablemente estas pérdidas.

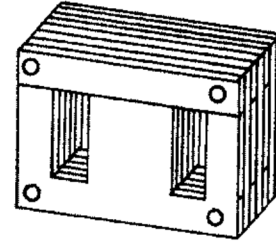


Figura 11.10. Núcleo de un transformador formado por chapas magnéticas apiladas.

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

Aprovechando este fenómeno y el de histéresis se pueden construir **hornos eléctricos de inducción para fundir chatarra** (Figura 11.11). El funcionamiento de éstos 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 la misma hasta fundirla.

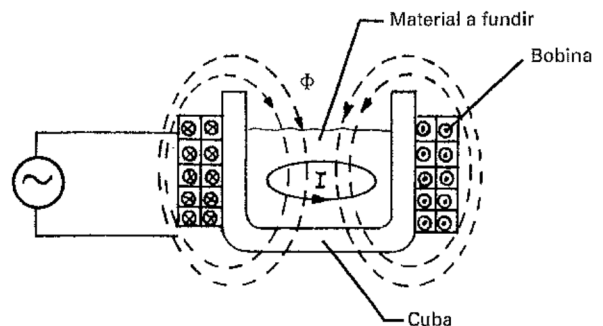


Figura 11.11. Horno de inducción.

Las modernas cocinas domésticas 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.

11.3 Autoinducción. Bobinas

Seguro que habrás podido observar en alguna ocasión que al abrir los contactos de un interruptor aparece entre los mismos 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 su palabra indica, significa inducirse a sí misma f.e.m. Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable, ésta genera, a su vez, un campo magnético también variable que corta a los conductores de la propia bobina. Esto origina en los mismos 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 11.12), 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 cortar a los mismos, 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.

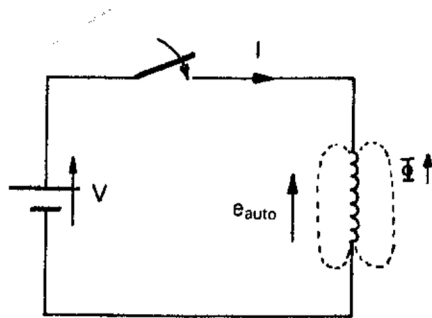


Figura 11.12. Cierre de un circuito con bobina.

Al abrir el interruptor (Figura 11.13), 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 desaparezca (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 los mismos. 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, tal como interruptores de maniobra, interruptores automáticos, relés de contactos, contactores, etc.

Una forma de alargar la vida de los mismos 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 enfriarlo en poco tiempo. Este último se consigue construyendo los dispositivos de apertura con muelles de recuperación.

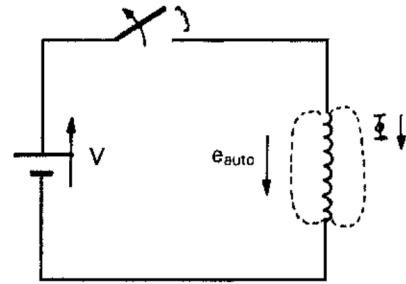


Figura 11.13. Apertura de un circuito con bobina.

En cierta forma, una bobina se puede comparar a un volante de inercia. Cuando el flujo magnético tiende a crecer en la misma, 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 la misma, es decir:

$$e_{auto} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

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 una bobina de generarse a sí misma f.e.m. de autoinducción.

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

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 misma y la intensidad de corriente que ha sido necesaria aplicarla. 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.

Ejemplo: 11.4

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

Ejemplo: 11.5

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

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

Aprovechando el efecto de la f.e.m. autoinducida en una bobina se pueden construir dispositivos sencillos que consiguieren elevar fuertemente la tensión, como por ejemplo el encendido de lámparas fluorescentes mediante la combinación de una reactancia y un cebador que abre y cierra un contacto muy rápidamente.

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.

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.

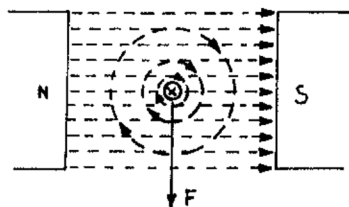


Figura 11.14. Fuerza que aparece en un conductor recorrido por una corriente eléctrica cuando está inmerso en un campo magnético.

En la Figura 11.14 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 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).

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

Para determinar el sentido de la fuerza se aplica la regla de Fleming de la mano izquierda (Figura 11.15). Se aplica utilizando el mismo procedimiento que seguimos para la mano derecha, teniendo en cuenta que se utiliza el sentido convencional de la corriente.

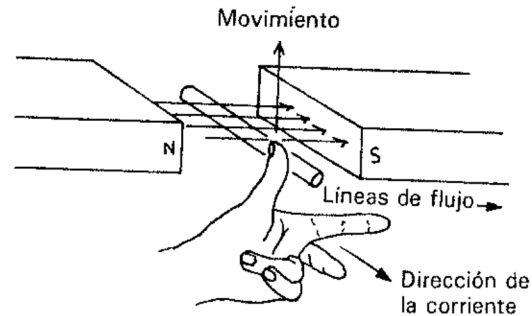


Figura 11.15. Regla de la mano izquierda para determinar el sentido de la fuerza.

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 (Nw)

B = Inducción (T)

L = Longitud del conductor (m)

I = Intensidad (A)

Ejemplo: 11.6

El conductor de la Figura 11.16 tiene una longitud de 0,5 metros y está inmerso en un campo magnético de 1,3 teslas de inducción. Averiguar el sentido de desplazamiento del mismo, así como la fuerza que desarrollará cuando circulen por él una intensidad entrante de 10 A.

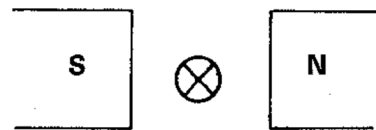


Figura 11.16

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

$$F = B L I = 1,3 \cdot 0,5 \cdot 10 = 6,5 \text{ Nw}$$

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, etc.

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 11.17).

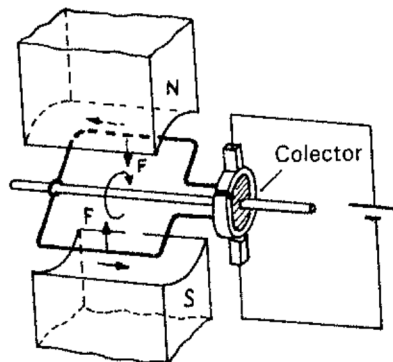


Figura 11.17. Motor de C.C.

En un instrumento de medida de bobina móvil se consigue que el par de fuerza 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 11.18).

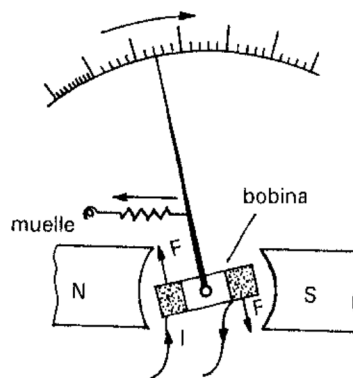


Figura 11.18. Instrumento de medida analógico.