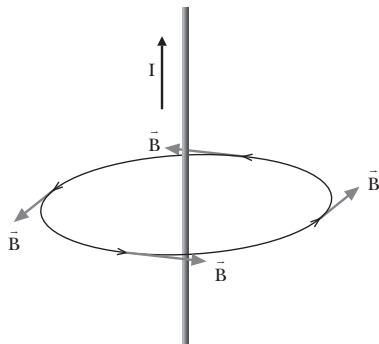


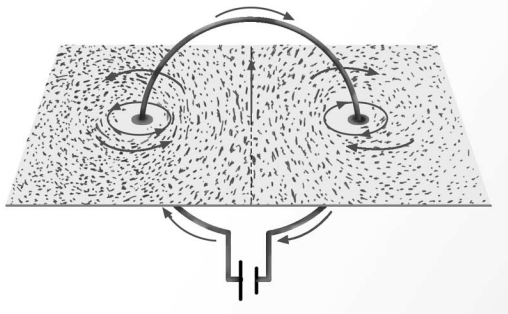
# 9. Inducción electromagnética

## PREPARACIÓN DE LA UNIDAD (pág. 219)

- Dibujamos las líneas de inducción del campo magnético creado por una corriente rectilínea e indefinida.

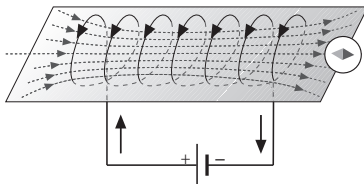


Dibujamos las líneas de inducción del campo magnético creado por una corriente eléctrica circular.



- Una bobina o solenoide es un conductor enrollado en espiral alrededor de un material aislante.

Las líneas de inducción magnética de un solenoide son idénticas a las de un imán recto.



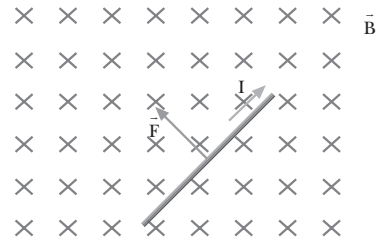
- Datos:  $N = 1\ 000$ ;  $l = 120\text{ cm} = 1,2\text{ m}$ ;  $I = 1,5\text{ A}$

Calculamos la inducción magnética en el interior del solenoide:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}\text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot 1\ 000 \cdot 1,5\text{ A}}{1,2\text{ m}}$$

$$B = 1,6 \cdot 10^{-3}\text{ T}$$

- 



- La ley de Ohm se enuncia así:

El cociente entre la diferencia de potencial aplicada a los extremos de un conductor y la intensidad de corriente que circula por él es una constante llamada resistencia eléctrica del conductor.

— Datos:  $R = 1,5\text{ k}\Omega = 1,5 \cdot 10^3\ \Omega$ ;  $V = 15\text{ V}$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{15\text{ V}}{1,5 \cdot 10^3\ \Omega} = 0,01\text{ A} = 10\text{ mA}$$

## 1. INDUCCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

(págs. 221, 222, 223, 225 y 227)

1. La inducción electromagnética consiste en la aparición de una corriente eléctrica en un circuito cuando varía el número de líneas de inducción magnética que lo atraviesan.
2. Para inducir una corriente eléctrica en un circuito es necesario variar el número de líneas de inducción magnética que lo atraviesan. Existen diferentes formas de conseguirlo. Por ejemplo, podemos mover un imán en las proximidades del circuito, o variar la intensidad de corriente en otro circuito próximo a aquél donde deseamos inducir la corriente.
3. No, no es necesario. Si mantenemos la espira fija, pero introducimos y extraemos sucesivamente un imán en la espira, también se induce una corriente eléctrica durante el movimiento del imán.
4. El físico inglés M. Faraday (1791-1867) observó experimentalmente que la intensidad de la corriente inducida aumentaba con la velocidad del movimiento del imán. Faraday interpretó que la corriente se induce cuando varía el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el circuito. Al aumentar la velocidad con que se aproxima el imán al circuito, el número de líneas de inducción que atraviesan el circuito crece con mayor rapidez y la intensidad de la corriente inducida es mayor.

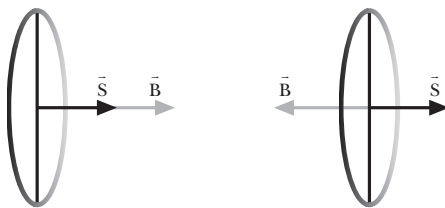
5. Algunas formas de producir una variación en el campo magnético pueden ser:
- Moviendo un imán en las cercanías de la espira.
  - Moviendo la espira en las cercanías de un imán.
  - Situando, en las cercanías de la espira, un circuito eléctrico de intensidad variable.
6. Si la inducción magnética  $\vec{B}$  forma un ángulo  $\alpha$  con el vector superficie  $\vec{S}$  de la espira, el flujo magnético viene dado por la expresión:

$$\phi = B S \cos \alpha$$

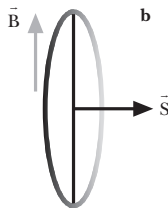
que, como vemos, depende directamente de  $\cos \alpha$ . Tenemos que, si  $\cos \alpha$  es máximo, mínimo o nulo, también lo será  $\phi$ .

Por lo tanto:

- a) Si el vector superficie  $\vec{S}$  tiene la misma dirección y el mismo sentido que el campo  $\vec{B}$ ,  $\cos \alpha = 1$  y, por lo tanto, el flujo es máximo.
- b) Si el vector superficie  $\vec{S}$  tiene la misma dirección y sentido contrario al campo  $\vec{B}$ ,  $\cos \alpha = -1$  y, por lo tanto, el flujo es mínimo.
- c) Si el vector superficie  $\vec{S}$  es perpendicular al campo  $\vec{B}$ ,  $\cos \alpha = 0$  y, por lo tanto, el flujo es nulo.



a Flujo máximo      b Flujo mínimo



c Flujo nulo

7. El flujo magnético a través de una superficie cerrada  $S$  es negativo cuando existe una cantidad neta de líneas de inducción que entran en la superficie. De la misma manera, si hubiera una cantidad neta de líneas de inducción que salieran de la superficie, el flujo sería positivo.
8. Datos:  $N = 120$ ;  $S = 30 \text{ cm}^2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $B = 4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

a)  $\alpha = 0^\circ$ ;  $\phi = N B S \cos \alpha$

$$\phi = 120 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cos 0^\circ$$

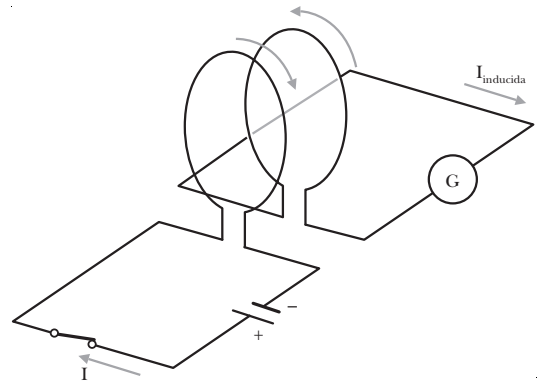
$$\phi = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

b)  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\phi = N B S \cos \alpha$

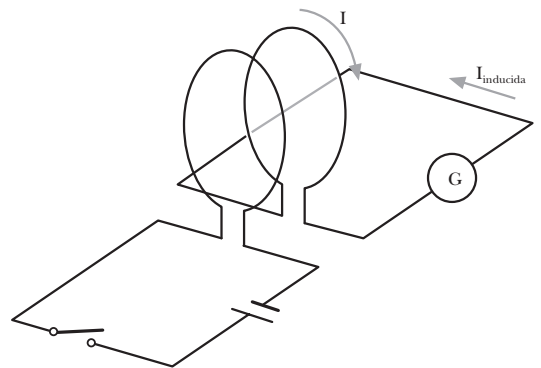
$$\phi = 120 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cos 60^\circ$$

$$\phi = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

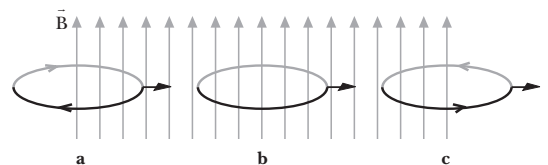
9. Al cerrar el interruptor, el sentido de la corriente inducida en  $S_2$  es contrario al que circula en  $S_1$ .



Al abrir el interruptor, el sentido de la corriente inducida en  $S_2$  es contrario que en el caso anterior.



10. a) Sí que circula corriente por la espira, pues el número de líneas de inducción que la atraviesan está aumentando.
- b) No circula corriente por la espira. Aunque la espira se mueve, el número de líneas de inducción que la atraviesan se mantiene constante.
- c) Sí que circula corriente por la espira, pues el número de líneas de inducción que la atraviesan está disminuyendo.



11. La fuerza electromotriz de un generador es el trabajo que realiza el generador por unidad de carga, o lo que es lo mismo, la energía que proporciona a la unidad de carga.

Un campo magnético variable induce una corriente eléctrica en un circuito por el fenómeno de la inducción electromagnética. Tendremos, por consiguiente, en este caso, una fuerza electromotriz denominada fuerza electromotriz inducida, que es la que causa la aparición de esta corriente inducida.

12. La intensidad de la corriente inducida viene dada por la expresión:

$$I = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

- a) Si doblamos la velocidad de giro de la bobina, la velocidad con la que varía el flujo,  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ , se multiplica por dos; en consecuencia, la intensidad de la corriente inducida aumenta al doble.
- b) Si la inducción magnética  $B$  se reduce a la mitad, la velocidad con que varía el flujo,  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ , se divide por dos; en consecuencia, la intensidad de la corriente inducida se reduce a la mitad.
- c) Si efectuamos los dos cambios anteriores simultáneamente, la intensidad de la corriente inducida permanece invariante.
13. Datos:  $B = 0,4 \text{ T}$ ;  $r = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ;  $R = 15 \Omega$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$

Inicialmente, el plano de la espira es perpendicular al campo magnético, por tanto, los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$  forman un ángulo  $\alpha = 0^\circ$ . En la situación final, la espira ha dado un cuarto de vuelta, por tanto,  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$  forman un ángulo  $\alpha = 90^\circ$ .

La variación del flujo viene dada por:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi - \phi_0 = B S (\cos \alpha - \cos \alpha_0) \\ \Delta\phi &= 0,4 \text{ T} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 (\cos 90^\circ - \cos 0^\circ) \\ \Delta\phi &= -3,14 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}\end{aligned}$$

La fem en la espira es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{-3,14 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}} = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ V}$$

Calculemos ahora la intensidad de la corriente inducida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{3,14 \cdot 10^{-2} \text{ V}}{15 \Omega} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 2,1 \text{ mA}$$

14. Datos:  $N = 200$ ;  $S = 30 \text{ cm}^2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  
 $B = (2t + 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ T}$

El flujo magnético a través de la bobina varía en el tiempo según la expresión:

$$\begin{aligned}\phi(t) &= N B S \cos \alpha = N B S \cos 0^\circ \\ \phi(t) &= 200 (2t + 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \phi(t) &= (12t + 4,8) \cdot 10^{-4} \text{ Wb}\end{aligned}$$

La fem inducida en la bobina es:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -1,2 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

15. En la experiencia de Henry se utiliza un conductor rectilíneo que se mueve perpendicularmente al campo magnético con objeto de que la fuerza magnética ejercida sobre las cargas del conductor tenga la dirección del pro-

pio conductor. De esta manera, las fuerzas eléctrica (que se opone a la separación de las cargas) y magnética que actúan sobre las cargas del conductor quedan compensadas y se obtiene:

$$\begin{aligned}F_m &= F_e \Rightarrow e v B = e E \\ E &= v B \\ \varepsilon &= E l = v B l\end{aligned}$$

Si el conductor se desplazara en una dirección diferente, deberíamos tener en cuenta el ángulo  $\alpha$  que formarán los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  en el cálculo de la fuerza magnética:

$$F_m = e v B \sin \alpha$$

16. Cuando desplazamos el conductor paralelamente a las líneas de inducción magnética, no actúa ninguna fuerza magnética sobre las cargas del conductor, por ser  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  paralelos:

$$\vec{F}_m = e (\vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

En consecuencia, no se produce una separación entre las cargas positivas y negativas del conductor, y no existe ninguna fem inducida.

17. Datos:  $l = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$ ;  $v = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\alpha = 90^\circ$ ;  $B = 0,3 \text{ T}$

- a) La fuerza magnética que actúa sobre un electrón de la barra viene dada por la ley de Lorentz:

$$\begin{aligned}F_m &= e v B \sin 90^\circ = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,3 \text{ T} \\ F_m &= 2,9 \cdot 10^{-19} \text{ N}\end{aligned}$$

- b) El campo eléctrico en el interior del conductor es:

$$E = v B = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ T} = 1,8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

- c) Calculamos la diferencia de potencial o fem inducida entre los extremos de la barra:

$$\varepsilon = v B l = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,3 \text{ T} \cdot 0,25 \text{ m} = 0,45 \text{ V}$$

## 2. APLICACIONES DE LA INDUCCIÓN

### ELECTROMAGNÉTICA (págs. 231, 233, 235 y 237)

18. La diferencia fundamental entre una dinamo y un alternador es que la dinamo es un generador que produce corriente eléctrica continua y el alternador es un generador que produce corriente alterna.

19. La fem inducida en un alternador se puede expresar:  
 $\varepsilon = B S \omega \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin \omega t$

- a) Si duplicamos la velocidad de giro de la bobina, la nueva fem inducida se puede expresar:

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= B S \omega' \sin \omega' t = B S 2\omega \sin 2\omega t \\ \varepsilon' &= 2 \varepsilon_0 \sin 2\omega t\end{aligned}$$

Es decir, se duplican la amplitud y la frecuencia angular de la fem inducida.

- b) Como la expresión de la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}; \quad f' = \frac{\omega'}{2\pi} = 2f$$

Es decir, la frecuencia de la corriente inducida también se duplica.

20. Datos:  $N = 25$ ;  $S = 60 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  
 $B = 0,4 \text{ T}$ ;  $R = 75 \Omega$

- a) La fem inducida en la bobina es la suma de las fuerzas electromotrices inducidas en cada una de las espiras que la componen:

$$\varepsilon = N B S \omega \sin \omega t = N B S 2\pi f \sin (2\pi f t)$$

$$\varepsilon = 25 \cdot 0,4 \text{ T} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \sin (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot t)$$

$$\varepsilon = 6\pi \sin (100\pi t) \quad (\text{en unidades SI})$$

- b) La fem máxima inducida en la bobina es:

$$\varepsilon_0 = N B S \omega = N B S 2\pi f$$

$$\varepsilon_0 = 25 \cdot 0,4 \text{ T} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} = 18,8 \text{ V}$$

- c) Calculamos la intensidad máxima:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R} = \frac{18,8 \text{ V}}{75 \Omega} = 0,25 \text{ A}$$

21. Respuesta sugerida:

Algunas de las ideas que se podrían exponer y desarrollar en el coloquio son las siguientes:

- La energía eléctrica es la forma de energía más consumida en la actualidad. Multitud de aparatos, en nuestros hogares y en la industria, funcionan con electricidad.
- El uso de la energía eléctrica está estrechamente relacionado con la mejora de la calidad de vida de un país.
- La energía eléctrica es muy versátil, pues se puede transformar en otros tipos de energía (mecánica, térmica, lumínica...) fácilmente y con un alto rendimiento.
- La energía eléctrica se puede producir y distribuir de forma económica y eficaz mediante líneas de alta tensión.
- La energía eléctrica no contamina ni produce residuos de ninguna clase.

Para la organización del coloquio se recomienda seguir estas pautas:

- **Determinar** los encargados de las distintas funciones:

- **Moderador.** Presentará a los participantes e introducirá el tema que se va a tratar. Además, concederá los turnos de palabra para que el coloquio se desarrolle de forma ordenada.

- **Participantes.** Darán sus opiniones sobre el tema elegido y escucharán las de los otros participantes. Generalmente, son un máximo de seis personas.

Todos los participantes deben investigar y documentarse sobre el tema con anterioridad.

- **Público.** Atenderá a las diversas opiniones. Podrá intervenir al final aportando sus propias opiniones o preguntando a los participantes alguna cuestión.

- **Iniciar** el coloquio. El moderador presentará a los participantes, introducirá el tema y planteará la primera pregunta a alguno de los participantes.

- **Desarrollar y concluir** el coloquio. Los distintos participantes desarrollarán sus argumentos conducidos por el moderador. Cada participante debe expresar sus opiniones y respetar las de los demás.

Al final del coloquio, el público podrá exponer sus opiniones y efectuar preguntas a los diferentes participantes. Por último, el moderador puede llevar a cabo un breve resumen de las intervenciones.

22. — Mientras el hilo está conectado a la pila, el clavo atrae a los clips cuando se acerca a ellos.

- Si el hilo se desconectara de la pila, el clavo dejaría de atraer a los clips cuando se acercara a ellos.

a) Sí, el campo magnético generado por el electroimán es más intenso que el que crea la bobina por sí sola, ya que el clavo es de hierro dulce y éste se imanta creando, así, su propio campo magnético, que se suma al de la bobina.

b) No, ya que desaparece el campo magnético, y puesto que el clavo actúa como un imán temporal, desaparecen sus propiedades magnéticas.

23. No, ambos procesos son manifestaciones distintas de un mismo fenómeno físico: la inducción de una fem en un circuito debido a la variación del flujo magnético a través de éste.

La diferencia estriba en que en la inducción electromagnética consideramos el inductor y el inducido como sistemas independientes, mientras que en el caso de la autoinducción estudiamos la creación de un campo magnético en un circuito debido a la variación de la corriente del propio circuito.

24. Un motor es un receptor que transforma algún tipo de energía con trabajo mecánico. Llamamos fuerza contraelectromotriz del motor al trabajo mecánico que realiza por unidad de carga.

$$\varepsilon' = \frac{W}{Q}$$

Su unidad es el voltio (V).

25. El coeficiente de autoinducción de una bobina viene dado por la expresión:

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

Si tenemos una sola espira,  $N = 1$ ,  $L = \mu_0 \frac{S}{l}$

Si tenemos 50 espiras,  $N = 50$ ,  $L = \mu_0 \frac{2500}{l} S$

Es decir, el coeficiente de autoinducción es 2 500 veces mayor en el caso de una bobina formada por 50 espiras que en el de una sola espira.

26. Datos:  $l = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ ;  $N = 200$ ;  
 $S = 40 \text{ cm}^2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $I_0 = 4 \text{ A}$ ;  $I = 0 \text{ A}$ ;  
 $\Delta t = 2 \text{ ms} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

Calculamos primero el coeficiente de autoinducción de la bobina:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \cdot \frac{(200)^2}{0,2 \text{ m}} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$L = 10^{-3} \text{ H}$$

La fem inducida es:

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -10^{-3} \text{ H} \cdot \frac{(-4 \text{ A})}{2 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 2,0 \text{ V}$$

27. Puesto que el coeficiente de inducción mutua se define como el cociente entre el flujo magnético a través de un circuito y la intensidad de corriente a través de otro circuito:

$$M_{12} = M_{21} = \frac{\Phi_2}{I_1}$$

En el SI tendrá unidades de:  $\frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{H}$

La unidad del coeficiente de inducción mutua en el SI es el henrio, H. Un henrio es la inductancia mutua entre dos circuitos tales que una variación de intensidad de un amperio por segundo en uno de los dos circuitos induce una fuerza electromotriz de un voltio en el otro circuito.

28. No, puesto que el transformador se basa en el fenómeno de inducción mutua, y éste sólo se puede producir si la corriente es variable en el tiempo.
29. Datos:  $N_1 = 100$ ;  $N_2 = 500$

La modificación de la tensión es:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 = 5 V_1$$

La tensión de salida es cinco veces mayor que la tensión de entrada, por lo que se trata de un transformador elevador.

Para el caso de la intensidad:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{1}{5} I_1$$

La intensidad de salida es una quinta parte de la intensidad de entrada, por lo que, al contrario que en la tensión, la intensidad se reduce a la salida.

30. Para resolver este ejercicio utilizaremos la relación de transformación de un transformador:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

— Si 400 son las vueltas del circuito primario y 50 las del circuito secundario, tendremos:

$$N_1 = 400; N_2 = 50$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 = 0,125 V_1$$

La tensión de salida disminuye.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = 8 I_1$$

La intensidad de salida aumenta.

— Si 50 son las vueltas del circuito primario y 400 las del circuito secundario, tendremos:

$$N_1 = 50; N_2 = 400$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 = 8 V_1$$

La tensión de salida aumenta.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = 0,125 I_1$$

La intensidad de salida disminuye.

31. Datos:  $V_1 = 3\,000 \text{ V}$ ;  $I_1 = 2 \text{ mA} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ ;  
 $N_1 = 900$ ;  $N_2 = 30$

Para resolver este ejercicio utilizaremos la relación de transformación de un transformador:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Calculamos primero la tensión de salida:

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} = 3\,000 \text{ V} \cdot \frac{30}{900} = 100 \text{ V}$$

La intensidad de salida es:

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \frac{900}{30} = 0,06 \text{ A}$$

32. Es debido a las ventajas que ésta presenta en relación a otras energías:

- Es fácilmente convertible en otras formas de energía.
- Se tiene acceso directo a ella desde nuestros hogares.
- Puede ser transportada a largas distancias desde su lugar de producción.
- No contamina ni produce residuos de ninguna clase.

33. La manera más económica de reducir las pérdidas de energía eléctrica en forma de calor por efecto Joule en los cables es disminuyendo la intensidad tanto como sea posible, para ello se transporta la corriente a alta tensión, de manera que la potencia transferida ( $P = V I$ ) se mantenga constante.

34. **Centrales hidroeléctricas:**

- Su rendimiento energético es alto.
- No producen residuos tóxicos.

### Centrales térmicas:

- Su rendimiento energético es bajo (solo un 30 % de calor pasa a energía eléctrica).
- Producen residuos tóxicos: óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, y partículas sólidas de la combustión.

### Centrales nucleares:

- Su rendimiento energético es alto.
  - Generan residuos radiactivos difíciles de eliminar o almacenar. Además, existe el riesgo de contaminación radiactiva por accidente.
35. La energía eólica es la energía cinética que procede de la fuerza del viento. Para poder aprovecharla y transformarla en energía eléctrica se utilizan los aerogeneradores, constituidos por unas palas que giran alrededor de un eje. Éstos transforman la energía cinética del viento en energía cinética de rotación y están unidos a la parte móvil de un generador (rotor) que transforma la energía mecánica en eléctrica.

Las principales ventajas de la energía eólica son:

- Es una energía renovable, es decir, de reservas ilimitadas.
- No produce residuos tóxicos.

Sus principales inconvenientes son:

- Para poder instalar un parque eólico, se necesita que la velocidad promedio del viento, en esta zona, sea de  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Tener una disponibilidad mínima de 2 500 h/año.

### 3. SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA (pág. 239)

36. La unificación electromagnética de Maxwell consistió en reunir todas las leyes de la electricidad y el magnetismo en sólo cuatro ecuaciones que relacionan los campos eléctrico y magnético con sus fuentes: las cargas eléctricas, las corrientes eléctricas y las variaciones de los propios campos.
37. Una carga eléctrica en movimiento, además de crear un campo eléctrico, por el hecho de estar en movimiento también crea un campo magnético. Por lo que las perturbaciones que produce en el espacio son de tipo electromagnéticas.
38. Las fuentes o causas del campo eléctrico son las cargas eléctricas, ya estén en movimiento o en reposo, y los campos magnéticos variables. Por otro lado, el campo magnético puede ser producido por una corriente eléctrica o por un campo eléctrico variable.
39. El flujo magnético que atraviesa una superficie cerrada no puede ser diferente de cero, puesto que tal y como se deduce de la segunda ecuación de Maxwell, el número de líneas de inducción que entran en la superficie es igual al número de líneas que salen.

El flujo eléctrico a través de una superficie cerrada solo sería cero si en el interior de la superficie no hubiera cargas. En caso contrario, éste sería proporcional a la carga, tal y como se deduce de la primera ecuación de Maxwell.

### FÍSICA Y SOCIEDAD (pág. 240)

- a) Un micrófono es un dispositivo que transforma las vibraciones sonoras en señales eléctricas que reproducen fielmente el sonido original. A continuación, esta corriente eléctrica es amplificada y transportada hasta un receptor. De esta manera se puede captar un sonido para amplificarlo o para registrarlo y reproducirlo posteriormente.

La ventaja de los micrófonos electromagnéticos frente a los de variación de resistencia está en que los primeros no tienen el problema de ruido que presentan los últimos. Así pueden ser usados en aplicaciones que requieran una reproducción fiel del sonido en bandas amplias de frecuencia.

- b) Como sabemos, el calor se disipa en el material por efecto Joule; por lo que la potencia disipada dependerá de la resistencia del material y de la intensidad de la corriente inducida ( $P = R I^2$ ). A su vez, la resistencia, de un material, es inversamente proporcional a su conductividad eléctrica, y a su sección, de manera que a menor conductividad eléctrica y menor sección, mayor potencia disipada y, por lo tanto, obtenemos más calor. Además, la intensidad también depende de la frecuencia:

El campo magnético generado en el interior del conductor es variable y tiene la misma frecuencia que la corriente alterna:

$$B = B_0 \cos \omega t$$

Por tanto, el flujo magnético a través de una sección del conductor es:

$$\phi = B S = B_0 S \cos \omega t$$

Según la ley de Faraday, la fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B_0 S \omega \sin \omega t = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

La intensidad de la corriente inducida tendrá una amplitud proporcional a la fem máxima ( $\varepsilon_0 = B_0 S \omega$ ), es decir, será proporcional a la frecuencia. Por tanto, la potencia ( $P = R I^2$ ) y el calor disipados aumentarán con la frecuencia.

- c) Respuesta sugerida:

Entre las varias aplicaciones del fenómeno de la inducción electromagnética, además del micrófono y los hornos de inducción que se mencionan en el libro del alumno, pueden proponerse para la redacción del informe:

- Los generadores eléctricos (dinamo y alternador).
- El motor eléctrico, que transforma energía eléctrica en energía mecánica.



- Dispositivos que utilizan las corrientes de Foucault, como frenos de emergencia para camiones.
- El betatrón, que es un dispositivo para acelerar electrones.
- La bobina o solenoide, un elemento de los circuitos eléctricos de corriente alterna donde tiene lugar el fenómeno de la autoinducción.
- Los transformadores, dispositivos esenciales en el transporte de la corriente alterna basados en el fenómeno de la inducción mutua.

## RESOLUCIÓN DE EJERCICIOS Y PROBLEMAS

(págs. 242 y 243)

40. Datos:  $N = 240$ ;  $S = 24 \text{ cm}^2 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $R = 50 \Omega$ ;  $\alpha_0 = 0^\circ$ ;  $B = 0,5 \text{ T}$ ;  $\Delta t = 4 \text{ ms} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ ;  $\alpha = 180^\circ$

- a) Calculamos en primer lugar la variación del flujo magnético:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = N B S (\cos \alpha - \cos \alpha_0)$$

$$\Delta\phi = 240 \cdot 0,5 \text{ T} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 (\cos 180^\circ - \cos 0^\circ)$$

$$\Delta\phi = -0,576 \text{ Wb}$$

La fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{-0,576 \text{ Wb}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 144 \text{ V}$$

- b) Hallamos la intensidad de la corriente inducida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{144 \text{ V}}{50 \Omega} = 2,88 \text{ A}$$

- c) La carga total que circula por la bobina es:

$$Q = I \Delta t = 2,88 \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ C}$$

41. Datos:  $N = 240$ ;  $S = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $R = 50 \Omega$ ;  $\alpha_0 = 0^\circ$ ;  $\alpha = 180^\circ$ ;  $\Delta t = 4 \text{ ms} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ ;  $B = 7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

- a) Calculamos en primer lugar la variación del flujo magnético:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = N B S (\cos \alpha - \cos \alpha_0)$$

$$\Delta\phi = 240 \cdot 7 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 (\cos 180^\circ - \cos 0^\circ)$$

$$\Delta\phi = -8,06 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

La fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{-8,06 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ s}}$$

$$\varepsilon = 2,02 \cdot 10^{-2} \text{ V} = 20,2 \text{ mV}$$

- b) Hallamos la intensidad de la corriente inducida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{2,02 \cdot 10^{-2} \text{ V}}{50 \Omega} = 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,40 \text{ mA}$$

- c) La carga total que circula por la bobina es:

$$Q = I \Delta t = 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

42. Datos:  $l = 1 \text{ m}$ ;  $R = 20 \Omega$ ;  $v = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $B = 0,6 \text{ T}$ ;  $\alpha = 90^\circ$

- a)  $\varepsilon = B l v = 0,6 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0,9 \text{ V}$

- b)  $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0,9 \text{ V}}{20 \Omega} = 0,045 \text{ A}$

- c) Como  $\vec{l}$  es perpendicular a  $\vec{B}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ):

$$F = I l B \sin \alpha = 0,045 \text{ A} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ T}$$

$$F = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

- d)  $W = F v t = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 15 \text{ s} = 0,61 \text{ J}$

43. Datos:  $l = 1 \text{ m}$ ;  $R = 15 \Omega$ ;  $v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 60^\circ$ ;  $B = 0,5 \text{ T}$

Si la velocidad del alambre  $\vec{v}$  forma un ángulo  $\alpha_1 = 60^\circ$  con el campo magnético  $\vec{B}$ , el ángulo entre el vector su superficie  $\vec{S}$  (perpendicular al plano determinado por los conductores y el alambre) y el vector  $\vec{B}$  será:

$$\alpha = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ.$$

- a)  $\varepsilon = B l v \cos 30^\circ = 0,5 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \cos 30^\circ$

$$\varepsilon = 0,87 \text{ V}$$

- b)  $I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0,87 \text{ V}}{15 \Omega} = 0,058 \text{ A}$

- c)  $F = I l B \sin 60^\circ = 0,058 \text{ A} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ T} \cdot \sin 60^\circ$

$$F = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

- d)  $W = F v t = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 15 \text{ s} = 0,75 \text{ J}$

44. Datos:  $L = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ ;  $I_0 = 0 \text{ A}$ ;  $I = 10 \text{ A}$ ;

$$\Delta t = 0,5 \text{ ms} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ H} \frac{(10 \text{ A} - 0 \text{ A})}{5 \cdot 10^{-4} \text{ s}} = -30 \text{ V}$$

El signo negativo indica que la fem se opone al aumento de la intensidad.

45. Datos:  $r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ ;  $S = 10 \text{ cm}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $\mu_r = 1500$ ;

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 20 \frac{\text{A}}{\text{s}}; \varepsilon = 0,03 \text{ V}$$

Calculamos en primer lugar el coeficiente de autoinducción:

$$L = \left| \frac{\varepsilon}{\Delta I / \Delta t} \right| = \frac{0,03 \text{ V}}{20 \frac{\text{A}}{\text{s}}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

A continuación calculamos el número de vueltas que tiene el toroide:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N S}{2\pi r}; N = \frac{2\pi r L}{\mu_r \mu_0 S}$$

$$N = \frac{2\pi \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}}{1500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 500$$

46. Datos:  $I = 10 \text{ sen}(100t)$  (SI);  $a = 0,05 \text{ m}$ ;  $b = 0,1 \text{ m}$ ;  $d = 0,05 \text{ m}$

Sustituimos la expresión de  $I$  en el flujo magnético a través de la espira:

$$\phi = \frac{\mu_0 10 \text{ sen}(100t) b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}$$

Aplicamos la ley de Faraday para hallar la fem inducida:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 10 \cos(100t) \cdot 100 b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}$$

$$\varepsilon = - \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} \cdot 10 \cdot \cos(100t) \cdot 100 \cdot 0,1 \text{ m}}{2\pi} \cdot \ln \frac{0,1 \text{ m}}{0,05 \text{ m}} = -1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(100t) \quad (\text{SI})$$

47. Datos:  $I_0 = 1 \text{ A}$ ;  $I = 0 \text{ A}$ ;  $\Delta t = 1 \text{ ms} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ ;  
 $a = 0,05 \text{ m}$ ;  $b = 0,1 \text{ m}$ ;  $d = 0,05 \text{ m}$

a) Sustituimos los datos del enunciado de la expresión del coeficiente de inducción mutua obtenida en el ejercicio resuelto D.

$$M = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}$$

$$M = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} \cdot 0,1 \text{ m}}{2\pi} \ln \frac{0,1 \text{ m}}{0,05 \text{ m}}$$

$$M = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

b) En la situación final la intensidad es nula ( $I = 0$ ), por lo cual el flujo final es cero.

El flujo inicial es:

$$\phi = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}$$

$$\phi_0 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m} \cdot 1 \text{ A} \cdot 0,1 \text{ m}}{2\pi} \ln \frac{0,1 \text{ m}}{0,05 \text{ m}}$$

$$\phi_0 = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Wb}$$

La fem inducida en la espira es:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = - \frac{0 \text{ Wb} - 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Wb}}{10^{-3} \text{ s}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

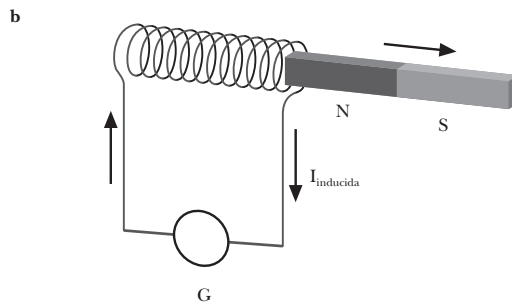
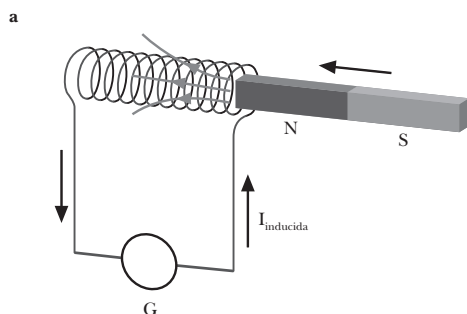
## EJERCICIOS Y PROBLEMAS (págs. 244 y 245)

### 48. — Movimiento de un imán en el interior de una bobina

Si acercamos el imán a la bobina, aparece una corriente inducida durante el movimiento del imán, pues el flujo magnético a través de la bobina aumenta.

Si alejamos el imán, se invierte el sentido de la corriente inducida, pues el flujo magnético a través de la bobina disminuye.

Si la bobina y el imán están fijos, no se observa corriente inducida.



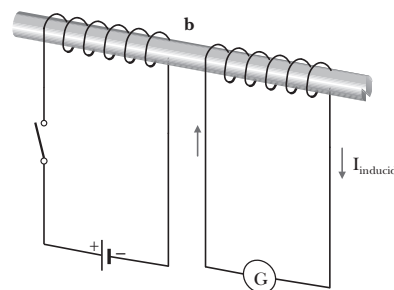
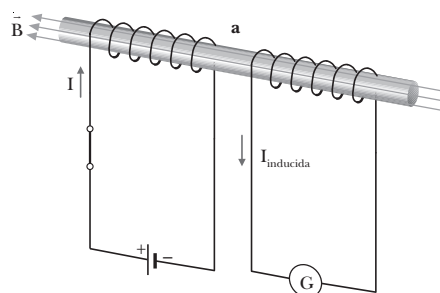
### — Cierre y apertura de un circuito eléctrico

Disponemos de dos bobinas enrolladas alrededor de una misma barra de hierro: la primera formando parte de un circuito con generador e interruptor y la segunda conectada a un galvanómetro.

Al conectar el interruptor se induce una corriente eléctrica en la segunda bobina, de sentido contrario a la corriente de la primera, pues el campo magnético creado por la primera bobina hace aumentar el flujo magnético a través de la segunda bobina.

Al desconectar el interruptor se induce una corriente eléctrica en la segunda bobina, de sentido opuesto al caso anterior, pues el flujo magnético a través de la segunda bobina disminuye.

Sólo se induce corriente en la segunda bobina si hay variación de la intensidad de corriente de la primera bobina.



### — Movimiento de un circuito eléctrico alrededor de una bobina

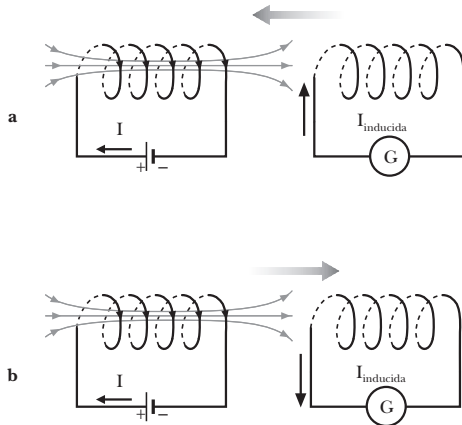
Disponemos de dos bobinas: una primera conectada a un generador y una segunda conectada a un galvanómetro. Ambas bobinas se colocan con sus ejes paralelos.



Al acercar y alejar la primera bobina, aparece una corriente eléctrica inducida en la segunda bobina, en un sentido u otro.

Si acercamos la primera bobina a la segunda, el flujo magnético a través de esta última aumenta, y se induce en ella una corriente eléctrica de sentido contrario a la que circula por la primera bobina.

Si alejamos la primera bobina de la segunda, el flujo magnético a través de esta última disminuye, y se induce en ella una corriente de igual sentido a la que circula por la primera bobina.



49. a) Falso.

La corriente inducida en un circuito se opone a la variación del flujo magnético que la produce. Si el flujo disminuye, la corriente inducida tiende a aumentarlo. En cambio, si el flujo aumenta, la corriente inducida tiende a disminuirlo.

b) Falso.

Según la ley de Faraday, la fem inducida es directamente proporcional a la variación del flujo magnético, y no al valor del flujo en sí.

50. El signo negativo nos indica que la fuerza electromotriz inducida se opone a la variación del flujo magnético (ley de Lenz).

51. Debe moverse perpendicularmente al campo magnético, de esta manera, según observó Henry, aparece una diferencia de potencial entre los extremos de la barra.

La diferencia de potencial se debe a que la fuerza de Lorentz que actúa sobre los electrones del interior del conductor arrastra a éstos hasta un extremo de dicho conductor. La acumulación de carga negativa en un extremo y de carga positiva en el extremo opuesto genera un campo eléctrico y la diferencia de potencial correspondiente a lo largo del conductor.

52. Tanto el funcionamiento de un generador eléctrico como el de un motor eléctrico se basan en el fenómeno de inducción electromagnética. La diferencia está en que un generador transforma una determinada forma

de energía en energía eléctrica, y un motor transforma energía eléctrica en trabajo mecánico.

53. Para generar una corriente alterna en la espira, hacemos girar a ésta sobre uno de sus diámetros en el interior del campo magnético, puesto que de esta manera conseguimos variar el flujo magnético en la espira, y por el fenómeno de la inducción electromagnética, se genera una corriente alterna en la espira.

54. Datos: 300 rpm

La velocidad angular en el sistema internacional es:

$$300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = 10\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Como la velocidad angular es constante, el ángulo que forman el vector superficie  $\vec{S}$  y el campo magnético  $\vec{B}$  se puede escribir como  $\omega t$  y, por tanto, el flujo magnético que atraviesa la espira y la fem inducida en ella son:

$$\phi = B S \cos \omega t$$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

Es decir, la fem es periódica y cambia alternativamente de polaridad. La frecuencia de la fuerza coincide con la del movimiento de la espira y viene dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{10\pi}{2\pi} = 5 \text{ Hz}$$

Las leyes en las que nos hemos basado para determinar la frecuencia  $f$  son las de la inducción electromagnética:

— Ley de Lenz: El sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

— Ley de Faraday: La fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a la velocidad con que varía el flujo magnético a través de dicho circuito cambiada de signo.

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

55. Al cerrar el circuito, la intensidad de corriente tarda un cierto tiempo en alcanzar su valor estacionario  $I$  y el flujo magnético a través de la bobina varía en este tiempo desde cero hasta su valor máximo. En consecuencia, se induce una fuerza electromotriz (llamada fuerza contraelectromotriz) que se opone al aumento instantáneo de la intensidad en el circuito.

De igual modo, al abrir el circuito, la intensidad tarda un cierto tiempo en anularse. En este caso, la fuerza electromotriz inducida se opone a que la intensidad caiga a cero de forma instantánea.

56. Un transformador es un dispositivo que modifica la tensión y la intensidad de corriente alterna.

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de inducción mutua. Consta de dos bobinas de hilo conductor enrolladas alrededor de un núcleo de hierro dulce y aisladas en-

tre sí. La bobina por la que se hace circular la corriente alterna de entrada recibe el nombre de circuito primario y la otra bobina, por la que circula la corriente transformada de salida, recibe el nombre de circuito secundario.

La corriente alterna que circula por el circuito primario produce un flujo magnético variable que origina una fem inducida alterna en el circuito secundario. La fuerza electromotriz inducida en la bobina secundaria tiene la misma frecuencia que la corriente alterna de entrada. Sin embargo, según las características de las bobinas, la tensión y la intensidad máximas de la corriente en los dos circuitos pueden ser distintas.

57. Datos:  $V_2 = \frac{1}{100} V_1$

Aplicamos la relación de transformación del transformador para hallar la relación entre las intensidades de entrada y salida:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{100} \rightarrow I_2 = 100 I_1$$

La intensidad de salida es de 100 veces mayor que la de entrada.

58. La diferencia estriba en la procedencia de la fuerza motriz que hace girar la turbina. Según la fuente de energía primaria que se transforma en energía eléctrica, tenemos distintos tipos de centrales:

— **Centrales hidroeléctricas.** Las turbinas son movidas por el agua que cae por un desnivel. La energía primaria es energía mecánica (energía potencial y gravitatoria del agua).

— **Centrales térmicas.** Las turbinas son movidas por vapor. El calor necesario para obtener vapor procede de la combustión de materiales fósiles, como carbón, petróleo o gas natural (energía química).

— **Centrales nucleares.** Las turbinas son movidas por vapor. El calor necesario para obtener vapor se obtiene de la fisión nuclear en un reactor (energía nuclear).

59. Las pérdidas son debidas a las corrientes de Foucault que aparecen en el núcleo de hierro del transformador cuando éste es atravesado por un flujo magnético variable. Estas corrientes se manifiestan en el calentamiento del metal con la consiguiente pérdida de energía y, además, obligan a disipar el calor que generan.

Para reducir estas corrientes se construye el núcleo del transformador mediante láminas finas de hierro unidas.

60. Datos:  $N = 320$ ;  $r = 4 \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  $B = 0,2 \text{ T}$

$$\phi = N B S \cos \alpha = 320 \cdot 0,2 \text{ T} \cdot \pi \cdot (4 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2$$

$$\phi = 0,32 \text{ Wb}$$

61. Datos:  $N = 220$ ;  $S = 30 \text{ cm}^2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $B = 0,4 \text{ T}$ ;  $\alpha_0 = 0^\circ$ ;  $\alpha = 180^\circ$ ;  $\Delta t = 15 \text{ ms} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

La variación del flujo es:

$$\Delta \phi = \phi - \phi_0 = N B S (\cos \alpha - \cos \alpha_0)$$

$$\Delta \phi = 220 \cdot 0,4 \text{ T} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot (\cos 180^\circ - \cos 0^\circ)$$

$$\Delta \phi = -0,528 \text{ Wb}$$

La fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\frac{(-0,528 \text{ Wb})}{1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}} = 35,2 \text{ V}$$

El valor positivo obtenido indica que la fem se opone a la disminución de flujo.

62. Datos:  $L = 0,4 \text{ H}$ ;  $I_0 = 2 \text{ A}$ ;  $I = 0 \text{ A}$ ;  $\Delta t = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

Calculamos en primer lugar el flujo magnético a través de la bobina:

$$\phi = L I_0 = 0,4 \text{ H} \cdot 2 \text{ A} = 0,8 \text{ Wb}$$

La fem inducida es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\frac{L(I - I_0)}{\Delta t} = -\frac{0,4 \text{ H} (0 \text{ A} - 2 \text{ A})}{3 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 266,7 \text{ V}$$

El signo positivo indica que la fem se opone a la disminución del flujo magnético.

63. Datos:  $l = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  $B = 2t^2 \text{ (SI)}$ ;  $t = 4 \text{ s}$

a)  $\phi = B S \cos \alpha = B l^2 \cos 0^\circ$

$$\phi = 2t^2 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot \cos 0^\circ = 5 \cdot 10^{-3} t^2 \text{ (SI)}$$

b)  $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -10^{-2} t \text{ (SI)}$

$$\varepsilon(t = 4 \text{ s}) = -4 \cdot 10^{-2} \text{ V}$$

El valor positivo obtenido indica que la fem se opone al aumento de flujo.

64. Datos:  $l = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ;  $B = 0,2 \text{ T}$ ;  $v = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

La diferencia de potencial entre los extremos de la barra es igual a la fem inducida.

$$\varepsilon = B l v = 0,2 \text{ T} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1,12 \text{ V}$$

65. Datos:  $N = 200$ ;  $r = \frac{10}{2} = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ;  $B = 0,3 \text{ T}$ ;

$$\omega = 3000 \text{ rpm} = 100\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

a) El flujo magnético a través de la bobina es:

$$\phi = N B S \cos \omega t$$

La fem inducida es entonces:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = N B S \omega \sin \omega t$$

$$\varepsilon = 200 \cdot 0,3 \text{ T} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \cdot 100 \pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot$$

$$\cdot \sin(100\pi t) = 148,0 \sin(100\pi t) \text{ (SI)}$$

b) La fem inducida máxima es la amplitud de la función

$$\varepsilon(t): \varepsilon_0 = N B S \omega$$

$$\varepsilon_0 = 200 \cdot 0,3 \text{ T} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \cdot 100 \pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\varepsilon_0 = 148,0 \text{ V}$$

66. Datos:  $I_0 = 24 \text{ A}$ ;  $I = 0 \text{ A}$ ;  $\varepsilon = 60 \text{ V}$ ;  $\Delta t = 1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \rightarrow L = -\frac{\varepsilon \Delta t}{\Delta I} = -\frac{60 \text{ V} \cdot 10^{-3} \text{ s}}{0 \text{ A} - 24 \text{ A}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

67. Datos:  $N_1 = 2\,400$ ;  $V_1 = 220 \text{ V}$ ;  $I_1 = 4 \text{ A}$ ;  $V_2 = 10 \text{ V}$

a) Calculamos primero el número de vueltas del circuito secundario:

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} N_1 = \frac{10 \text{ V}}{220 \text{ V}} \cdot 2\,400 = 109$$

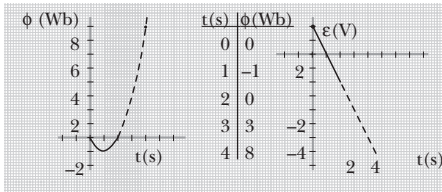
b) La intensidad de corriente de salida es:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{2\,400}{109} \cdot 4 \text{ A} = 88 \text{ A}$$

68. Datos:  $\phi = t^2 - 2t$ ;  $0 \leq t \leq 2 \text{ s}$

a)  $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -2t + 2$ ;  $0 \leq t \leq 2$

Representamos el flujo magnético y la fem inducida en función del tiempo.



b)  $|\phi|$  será máximo si:

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \rightarrow 2t - 2 = 0 \rightarrow t = 1 \text{ s}$$

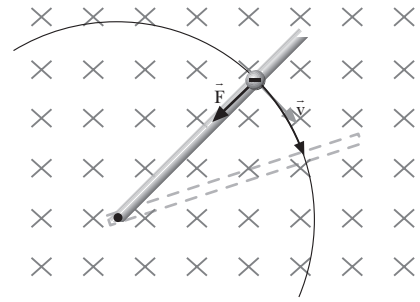
c)  $\varepsilon = -2t + 2$  es una recta comprendida entre 0 y 2, por lo que los dos máximos estarán en  $t = 0 \text{ s}$  y  $t = 2 \text{ s}$ .

El signo de  $\varepsilon$  sólo nos indica el sentido de la corriente.

d) El flujo magnético y la fem inducida no son máximos simultáneamente, puesto que la fuerza electromotriz inducida no se opone al flujo magnético sino a su variación.

69. Como sabemos, según la experiencia de Henry, si movemos un barra conductora dentro de un campo magnético uniforme, los electrones libres de la barra estarán sometidos a una fuerza que viene dada por la expresión:

$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ , y por lo tanto, depende del ángulo que forma el campo con la velocidad lineal que lleva la barra, de modo que:  $F = q v B \sin \alpha$ . Como la barra describe un movimiento circular, la velocidad lineal siempre será perpendicular o normal a la trayectoria y, por lo tanto, al campo magnético, por lo el valor de la fuerza será en todo momento  $F = q v B$ , su dirección será la dirección de la barra y su sentido vendrá dado por la regla de la mano derecha, como muestra la figura.



70. Datos:  $B = 0,6 \text{ T}$ ;  $I_0 = 2 \text{ A}$ ;  $N = 150$ ;  $r = 3 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ;  $R = 40 \Omega$ .

Determinamos la frecuencia angular a partir de la intensidad máxima de la corriente inducida.

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R} = \frac{N B S \omega}{R} \rightarrow \omega = \frac{I_0 R}{N B S}$$

$$\omega = \frac{2 \text{ A} \cdot 40 \Omega}{150 \cdot 0,6 \text{ T} \cdot \pi \cdot (3 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} = 314,38 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314,38 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}{2\pi} = 50,0 \text{ Hz}$$

71. Datos:  $l = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$ ;  $N = 1\,000$ ;  $S = 60 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $\mu_r = 1\,500$

Calculamos el coeficiente de autoinducción de la bobina:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \frac{(1\,000)^2}{0,3 \text{ m}} 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$L = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

Si introdujéramos un núcleo de hierro en su interior, el coeficiente de autoinducción de la bobina se vería modificado de esta manera:

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

$$L' = \mu_r L = 1\,500 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ H} = 37,5 \text{ H}$$

72. La fuerza contraelectromotriz de un motor es el trabajo mecánico que realiza por unidad de carga.

$$\varepsilon' = \frac{W'}{Q}$$

Los motores se caracterizan porque tienen una gran fuerza contraelectromotriz, ya que su función es transformar algún tipo de energía (por ejemplo, energía eléctrica) en trabajo mecánico.

73. Datos:  $I_0 = 2 \text{ A}$ ;  $\phi = 22 \text{ Wb}$ ;  $I = -2 \text{ A}$ ;  $\Delta t = 2 \text{ ms} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

Calculamos el coeficiente de autoinducción de la bobina.

$$\phi = L I \rightarrow L = \frac{\phi}{I} = \frac{22 \text{ Wb}}{2 \text{ A}} = 11 \text{ H}$$

Calculamos la fem inducida:

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -11 \text{ H} \frac{(-2 \text{ A} - 2 \text{ A})}{2 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 2,2 \cdot 10^4 \text{ V}$$

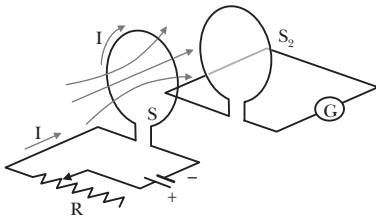
**COMPRUEBA LO QUE HAS APRENDIDO** (pág. 245)

1. El coeficiente de autoinducción representa la fem autoinducida en un circuito cuando la intensidad de corriente varía un amperio en un segundo.

La unidad del coeficiente de autoinducción en el SI de unidades es el henrio, H:

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

2. a) Si la corriente en la primera bobina aumenta, se incrementará también el flujo magnético en la segunda bobina, por lo que aparecerá en la segunda bobina una corriente inducida de sentido contrario al de la primera para contrarrestar este aumento del flujo magnético.
- b) Si en la primera bobina la corriente disminuye, también disminuirá el flujo magnético que atraviesa la segunda bobina, por lo que aparecerá una corriente inducida en esta segunda bobina del mismo sentido que en la primera para contrarrestar la disminución del flujo magnético.
- c) Si la corriente en la primera bobina se mantiene constante, no habrá variación de flujo en la segunda bobina y, por lo tanto, no aparecerá ninguna corriente inducida en la segunda bobina.



3. La tensión a la salida queda disminuida 100 veces respecto a su valor a la entrada.

La intensidad a la salida queda aumentada 100 veces respecto a la intensidad de entrada.

4. Datos:  $N = 500$ ;  $r = 0,005 \text{ m}$ ;  $B_0 = 0,1 \text{ T}$

- a) Si  $B = 0,2 \text{ T}$  en  $\Delta t = 0,02 \text{ s}$ :

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\frac{\phi - \phi_0}{\Delta t} = -\frac{N B S - N B_0 S}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = -\frac{N S (B - B_0)}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = -\frac{500 \cdot \pi \cdot (0,005 \text{ m})^2 \cdot (0,2 \text{ T} - 0,1 \text{ T})}{0,02 \text{ s}} = -0,20 \text{ V}$$

El signo negativo indica que la fem se opone al aumento del flujo magnético.

- b) Si  $\alpha = 180^\circ$  en  $\Delta t = 0,02 \text{ s}$ :

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\frac{\phi - \phi_0}{\Delta t} = -\frac{N B_0 S \cos 180^\circ - N B_0 S}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = -\frac{N S B_0 (\cos 180^\circ - 1)}{\Delta t}$$

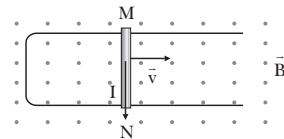
$$\varepsilon = -\frac{500 \pi \cdot (0,005 \text{ m})^2 \cdot 0,1 \text{ T} (-1 - 1)}{0,02 \text{ s}} = 0,39 \text{ V}$$

El signo positivo indica que la fem se opone a la disminución del flujo magnético.

5. Datos:  $B = 0,4 \text{ T}$ ;  $\alpha = 90^\circ$ ;  $l = 1 \text{ m}$ ;  $R = 15 \Omega$ ;  $v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- a)  $\varepsilon = v B l = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,4 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} = 0,8 \text{ V}$

- b) El sentido de la intensidad puede determinarse a partir de la ley de Lenz. Como el flujo magnético a través del circuito aumenta, la corriente inducida debe crear un campo magnético que contrarreste el aumento de flujo.



Calculamos la intensidad de la corriente inducida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0,8 \text{ V}}{15 \Omega} = 0,05 \text{ A}$$

- c) Calculamos la fuerza magnética sobre la barra:

$$\vec{F}_m = I (\vec{l} \times \vec{B})$$

$$F_m = I l B \sin 90^\circ = 0,05 \text{ A} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ T} = 0,02 \text{ N}$$