



FÍSICA

Onceno grado

Parte 2

Prof. Juan Núñez Viera
Dr. Lisardo García Ramis
Lic. Carlos Sifredo Barrios
Lic. Ángel Menéndez Valdés
Lic. Olga Castro Escarrá
Dr. José Ducongé Hernández
Dr. José Luis Hernández Báez



**Editorial
Pueblo y Educación**

Diseño: Osvaldo Valdés de la Nuez
Ilustración: Sonia Acosta Milián

© Décima reimpresión, 2013
© Primera reimpresión, 1991
© Ministerio de Educación, Cuba, 1990
© Editorial Pueblo y Educación, 1990

ISBN 978-959-13-0713-2 Obra completa
ISBN 978-959-13-0715-6 Parte 2

EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN
Ave. 3ra. A No. 4601 entre 46 y 60,
Playa, La Habana, Cuba. CP 11300.
epe@enet.cu

ÍNDICE

Capítulo 5 CORRIENTE ELÉCTRICA CONTINUA	146
5.1 <i>¿Qué es la corriente eléctrica?</i>	146
5.2 <i>Intensidad de la corriente</i>	146
5.3 <i>Fuerza electromotriz (fem)</i>	148
5.4 <i>Ley de Ohm para un circuito completo</i>	150
5.5 <i>Acoplamiento de fem</i>	152
<i>Tareas generales del capítulo</i>	158
 Capítulo 6 CORRIENTE ELÉCTRICA EN LOS DIFERENTES MEDIOS	160
6.1 <i>Introducción</i>	160
6.2 <i>Corriente eléctrica en los metales</i>	160
6.3 <i>Corriente eléctrica en los gases</i>	168
6.4 <i>Haces electrónicas. Tubo de rayos catódicos</i>	177
6.5 <i>Corriente eléctrica en los semiconductores</i>	180
6.6 <i>Aplicaciones de los semiconductores</i>	195
 Capítulo 7 CAMPO MAGNÉTICO	202
7.1 <i>El campo magnético. Antecedentes y aplicaciones prácticas</i>	202
7.2 <i>Interacción de conductores con corriente y el campo magnético</i>	204
7.3 <i>Vector inducción magnética</i>	207
7.4 <i>Líneas de inducción</i>	214
7.5 <i>Campo magnético de un conductor rectilíneo, una espira y un solenoide</i>	218
7.6 <i>Fuerzas que actúan sobre una carga eléctrica móvil. Fuerza de Lorentz</i>	224
7.7 <i>Fuerza de Ampere</i>	233
7.8 <i>Propiedades magnéticas de la sustancia. Hipótesis de Ampère</i>	237
<i>Tareas generales del capítulo</i>	241

Capítulo 8 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	246
8.1 <i>Introducción</i>	246
8.2 <i>Fenómeno de inducción electromagnética</i>	246
8.3 <i>Sentido de la corriente inducida. Ley de Lenz</i>	252
8.4 <i>Ley de la inducción electromagnética</i>	256
8.5 <i>Aplicaciones técnicas de la ley de inducción electromagnética: el generador y el transformador</i>	264
8.6 <i>Campo eléctrico inducido</i>	269
8.7 <i>Fem de inducción en los conductores en movimiento</i>	271
8.8 <i>Autoinducción</i>	273
8.9 <i>Inductancia</i>	276
8.10 <i>Energía del campo magnético de una corriente</i>	280
<i>Tareas generales del capítulo</i>	282
Capítulo 9 OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS	291
9.1 <i>Oscilaciones electromagnéticas libres</i>	291
9.2 <i>Oscilaciones electromagnéticas forzadas. Corriente alterna ..</i>	299
9.3 <i>Resonancia</i>	310
9.4 <i>Rectificación de la corriente alterna</i>	312
9.5 <i>Éxitos y perspectivas de la electrificación en Cuba</i>	316
<i>Tareas generales del capítulo</i>	322
Capítulo 10 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	330
10.1 <i>Campo electromagnético y progreso técnico</i>	330
10.2 <i>Relación entre los campos eléctrico y magnético variables ..</i>	330
10.3 <i>Hipótesis de Maxwell sobre la generación del campo electro- magnético</i>	334
10.4 <i>Obtención de las ondas electromagnéticas. Experimento de Hertz</i>	335
10.5 <i>Propiedades de las ondas electromagnéticas</i>	342
10.6 <i>Principios de la telecomunicación</i>	349
10.7 <i>Utilización de las ondas electromagnéticas</i>	357
<i>Respuesta a las tareas generales de los capítulos</i>	360

Capítulo 5

CORRIENTE ELÉCTRICA CONTINUA

5.1 *¿Qué es la corriente eléctrica?*

Ya conoces de la secundaria básica que la corriente eléctrica es el movimiento orientado (o dirigido) de partículas cargadas a través de la sección de un conductor. Es decir, siempre que se trasladen ordenadamente partículas cargadas se establece una corriente eléctrica.

Vimos también cómo estas partículas cargadas pueden ser de diferentes tipos. Por ejemplo, en los metales son electrones libres, y en los electrolitos y conductores gaseosos son iones positivos o negativos, o ambos simultáneamente. El movimiento de las partículas cargadas no podemos observarlo directamente, sino que podemos apreciar su existencia mediante la acción o influencia que produce. Un conductor, por el que circula una corriente eléctrica, generalmente se calienta; la corriente eléctrica puede variar la composición química de un conductor y ejercer una acción magnética, etcétera.

5.2 *Intensidad de la corriente*

El hecho de que en un circuito se establezca una corriente eléctrica significa que a través de la sección transversal del conductor se trasladan constantemente partículas cargadas. La carga total de las partículas que atraviesan dicha sección en una unidad de tiempo sirve como base para definir la magnitud que caracteriza a la corriente, la cual se denomina *intensidad de la corriente*.

Si a través de la sección transversal de un conductor, en un tiempo Δt , se trasladan partículas cargadas con una carga q , entonces la intensidad de la corriente, I , será:

$$I = \frac{q}{\Delta t} \quad (5.1)$$

En el caso de la corriente eléctrica continua la intensidad de la corriente no varía con el tiempo.

La intensidad de la corriente eléctrica, al igual que la carga, es una magnitud escalar que puede ser designada positiva o negativa.

Observemos un pequeño segmento de un conductor, en el cual la corriente puede estar dirigida de izquierda a derecha o de derecha a izquierda (fig. 5.1). La designación del signo (más o menos) que se le dé a la intensidad de la corriente eléctrica está determinada por el sentido de esta.



Fig. 5.1

Pero, ¿en qué caso considerarla positiva o negativa? En realidad, ambos sentidos podrían ser considerados con cualquier signo; sin embargo es necesario adoptar uno como positivo, por ejemplo, de izquierda a derecha (de forma análoga a como se designan los ejes de coordenadas). Entonces, la intensidad de la corriente eléctrica será positiva ($I > 0$) si el sentido de la corriente coincide con el escogido como sentido positivo en el conductor, y en el caso contrario será negativa ($I < 0$).

Para calcular la intensidad de la corriente eléctrica (I), debemos tener presente que depende del valor de la carga que posee cada partícula (q_0); de la concentración de las partículas (n), de la velocidad de su movimiento ordenado (v) y del área de la sección transversal del conductor.

Sea S el área de la sección transversal de un conductor por el que circula corriente (fig. 5.2), como sentido positivo en el conductor adoptaremos el de izquierda a derecha. La carga de cada partícula que circula es igual a q_0 (para el electrón $q_0 = -e$). En el volumen limitado por las secciones 1 y 2 hay entonces $nS\Delta l$ partículas, donde n es la concentración de las partículas. La carga total en dicho volumen será $q = q_0 nS\Delta l$.

Si las partículas se mueven de izquierda a derecha con una velocidad media v , en un tiempo $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$ todas las partículas contenidas en el volumen analizado pasarán a través de la sección 2. Por tanto:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l}{\frac{\Delta l}{v}} = q_0 n S v \quad (5.2)$$

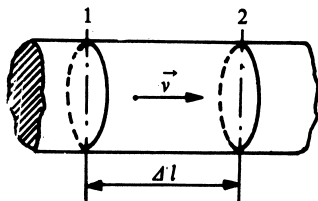


Fig. 5.2

En el S.I., la intensidad de la corriente se mide en ampére (A). Esta unidad se establece sobre la base de la interacción magnética de la corriente. La intensidad de la corriente se mide con el amperímetro, cuyo principio de funcionamiento fue estudiado en la secundaria básica.

Tareas

1. Si por la sección transversal de un conductor atraviesan partículas cargadas con una carga de:
 - a) 45 coulomb en 18 segundos;
 - b) 1 coulomb en 70 segundos;
 - c) 50 coulomb en 12 segundos;calcula la intensidad de la corriente en cada caso.
2. ¿Cuál será la carga de las partículas que atraviesan la sección transversal de un conductor en 10 s, si la intensidad de la corriente es 5 A?

5.3 Fuerza electromotriz (*fem*)

En el capítulo anterior vimos cómo, cuando un conductor aislado es situado en un campo eléctrico, se produce un movimiento de las partículas cargadas (las cargadas positivamente se mueven en el sentido de la disminución del potencial, y las negativas en sentido contrario), lo que da como resultado que esta corriente tenga una duración breve. Para mantener continuamente una corriente, debe existir un campo eléctrico permanente.

Por consiguiente, para sustentar una corriente eléctrica continua no es suficiente la existencia de electrones libres en el conductor; también es necesario que actúe una fuerza constante en determinado sentido sobre las partículas cargadas; o sea, debe existir una tensión constante aplicada en los extremos del conductor.

Es decir, en todo circuito debe haber una fuente que le ceda energía. En esta fuente, además de las fuerzas coulombianas, deben actuar necesariamente otras que no sean potenciales ni de origen electrostático. El trabajo realizado por estas fuerzas en el interior de la fuente es diferente de cero.

Las fuerzas no coulombianas a que nos referimos provocan el movimiento de las partículas cargadas en el interior de las fuentes de corriente. En la práctica, son los generadores de las centrales eléctricas, los elementos galvánicos, los acumuladores, etcétera.

Como resultado de la acción de dichas fuerzas, en los bordes de las fuentes aparecen partículas con cargas de signos contrarios y, por lo tanto, habrá una determinada tensión. En el interior de las fuentes las cargas se mueven bajo la acción de las fuerzas no coulombianas F_p , contra la

fuerza del campo eléctrico (de positivo a negativo). En el resto del circuito, su movimiento lo provoca el campo eléctrico (fig. 5.3).

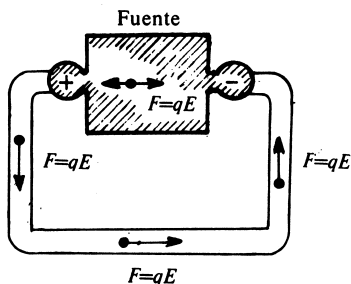


Fig. 5.3

La naturaleza de las fuerzas no coulombianas puede ser muy variada. Por ejemplo, en los generadores de las centrales eléctricas, esta fuerza es la que actúa sobre los electrones que se mueven en el interior de los conductores (esto se estudiará más adelante detalladamente). En un elemento galvánico, pongamos por caso una pila de Volta, actúan fuerzas de origen electromagnético producto de procesos químicos.

La acción de las fuerzas no coulombianas caracteriza una magnitud muy importante llamada *fuerza electromotriz (fem)*.

La fuerza electromotriz (ε) es la relación que existe entre el trabajo realizado por las fuerzas no coulombianas al trasladar una partícula cargada con carga q_0 a lo largo de un circuito, y el valor de dicha carga.

O sea:

$$\varepsilon = \frac{W}{q_0} \quad (5.3)$$

La fem, al igual que la diferencia de potencial, se mide en volt (V).

El trabajo específico de las fuerzas no coulombianas se refiere solo a una parte y no a todo el circuito. La fuerza electromotriz en un elemento galvánico, por ejemplo, es el trabajo de las fuerzas no coulombianas al trasladar una partícula, con una carga positiva de 1 C, de un polo a otro en el interior del elemento.

La fem representa un trabajo específico, el necesario para trasladar una partícula cargada positivamente. Por tanto, es una magnitud escalar que puede ser positiva o negativa.

Tareas

1. ¿A qué se denomina fuerza electromotriz? ¿Cómo se calcula?
2. ¿Qué significa que la fem de una batería sea de 12 V?
3. ¿Varía la fem de un elemento galvánico al cerrar el circuito?

5.4 Ley de Ohm para un circuito completo

Consideremos un circuito completo cerrado, compuesto de una fuente (elemento galvánico o generador) y una resistencia R (fig. 5.4).

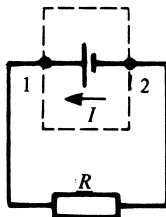


Fig. 5.4

La fuente de corriente tiene una fuerza electromotriz y una resistencia r . A esta resistencia frecuentemente se le denomina *resistencia interna*, a diferencia de la externa R del circuito (por ejemplo, en un generador, r es la resistencia del enrollado, y en un elemento galvánico, la resistencia de la disolución electrolítica y de los electrodos).

La ley de Ohm para un circuito completo relaciona la intensidad de la corriente I en el circuito, la fuerza electromotriz ε y la resistencia completa del circuito ($R + r$).

Esta relación puede plantearse utilizando la ley de conservación de la energía y la ley de Joule-Lenz, estudiadas en grados anteriores.

Consideremos que durante un tiempo Δt se traslada una partícula cargada con carga q , a través de la sección transversal de un conductor. Entonces, el trabajo W de las fuerzas no coulombianas será igual a:

$$W = q\varepsilon$$

y, utilizando la ecuación 5.1:

$$W = \varepsilon I \Delta t \quad (5.4)$$

Como consecuencia de este trabajo, tanto en la resistencia interna r como en la externa R se desprende una cantidad de calor Q que, de acuerdo con la ley de Joule-Lenz, es igual a:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t \quad (5.5)$$

Ahora bien, según la ley de conservación de la energía, $Q = W$. Por tanto, comparando (5.4) y (5.5) obtenemos:

$$\varepsilon = IR + Ir \quad (5.6)$$

Al producto de la intensidad de la corriente por la resistencia, en una porción de circuito, se le denomina *caída de tensión*. La fórmula 5.6 nos plantea que la fuerza electromotriz en un circuito completo es igual a la suma de las caídas de tensión en las resistencias externas e internas.

La ley de Ohm para un circuito completo se expresa generalmente de la forma:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (5.7)$$

y significa que *la intensidad de la corriente, en un circuito cerrado, es igual a la relación entre la fuerza electromotriz del circuito y su resistencia.*

De aquí vemos que la intensidad de la corriente en un circuito depende de tres factores: la fuerza electromotriz, la resistencia interna de la fuente r , y de la resistencia externa, R .

Si la resistencia interna es pequeña en comparación con la externa ($R \gg r$), no influye considerablemente sobre la intensidad de la corriente, por lo que la tensión en los bornes de la fuente es aproximadamente igual a la fuerza electromotriz.

Sin embargo, durante un cortocircuito ($R \rightarrow 0$) la intensidad de la corriente se determina, específicamente, por medio de la resistencia interna de la fuente. En estos casos, I puede ser considerablemente grande, aún cuando la fuerza electromotriz sea de algunos volt. Si r es pequeña (en los acumuladores $r \approx 0,1 - 0,001 \, \Omega$), los conductores pueden fundirse y la misma fuente deteriorarse. En las máquinas electrostáticas, por el contrario la resistencia del aislador de aire entre los discos es muy grande ($r \approx 10^7 - 10^8 \, \Omega$); debido a ello, con fuerzas electromotrices mayores de $10^4 \, \text{V}$, la intensidad de la corriente en el circuito es prácticamente nula.

TRABAJO DE LABORATORIO 5 Ley de Ohm para un circuito completo

Instrumentos y materiales: fuente de corriente continua; 2 interruptores, 2 multímetros (o un voltímetro y un amperímetro), 3 resistores de resistencia conocida, 8 conductores y 2 grapa-puentes.

Indicaciones para el trabajo

1. Estudia la ley de las tensiones en un circuito como el mostrado en la figura 5.5. Comprueba que se cumple:

$$U_{ad} = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd}$$

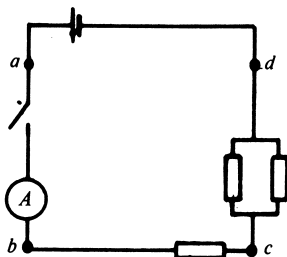


Fig. 5.5

2. Con el circuito cerrado, mide las tensiones entre los puntos ab , bc , cd , y ad y anota estos valores en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

<i>Tensión del circuito abierto (V)</i>	V_{ab} (V)	V_{bc} (V)	V_{cd} (V)	V_{ad} (V)
	IR_{ab}	IR_{bc}	IR_{cd}	IR_{ad}

3. Para verificar la ley de Ohm en las porciones de circuito señaladas, mide la intensidad de la corriente que circula por el circuito y, con los valores de resistencia conocidos o calculados, obtén los valores del producto IR y llévalos a la tabla 5.1.
Cuida que en estas mediciones el voltímetro esté desconectado.
4. ¿Será igual el valor de tensión medido cuando el circuito está cerrado que cuando está abierto? Abre el circuito y mide la tensión entregada por la fuente. Anótalo en la tabla 5.1.
5. *Tareas experimentales*
- ¿Por qué es necesario desconectar el voltímetro cuando se realizan mediciones de la intensidad de la corriente eléctrica?
 - Explica la igualdad entre los valores de tensión medidos con el voltímetro, y los hallados en el producto de la intensidad de la corriente por la resistencia de la porción.
 - Compara el valor de la tensión obtenida cuando el circuito estaba abierto y cuando estaba cerrado. Explica la diferencia que aparece entre ambas.

5.5 Acoplamiento de fem

Si un circuito posee algunas fuentes acopladas en serie, por ejemplo ε_1 , ε_2 , ε_3 , ..., ε_n , entonces la fuerza electromotriz total será la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de cada elemento por separado. Para

determinar el signo de las fuerzas electromotrices, es necesario elegir previamente un sentido para recorrer el circuito.

En la figura 5.6 se considera positivo el sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj. Si el sentido considerado va del polo negativo al polo positivo de una fem, entonces $\varepsilon_n > 0$, en el caso contrario $\varepsilon_n < 0$.

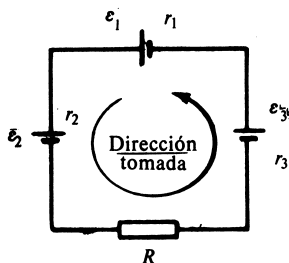


Fig. 5.6

Para el circuito mostrado, $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

En general, cuando hay n fuentes acopladas en serie se cumple:

$$I = \frac{\sum_1^n \varepsilon_n}{R + \sum_1^n r_n} \quad (5.8)$$

Si $\varepsilon > 0$, de acuerdo con la ley de Ohm, $I > 0$: es decir, el sentido considerado positivo para el recorrido del circuito coincide con el sentido de la corriente en dicho circuito.

Si las fuentes son iguales y se acoplan en paralelo (fig. 5.7), entonces la fuerza electromotriz de la batería equivale a la fuerza electromotriz de una de ellas.

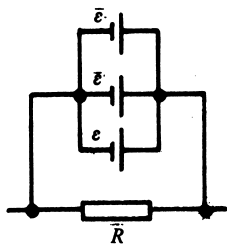


Fig. 5.7

La resistencia interna de la batería se calcula por la regla general para determinar la resistencia resultante en paralelo. Para el circuito mostrado, la resistencia interna resultante es $\frac{r}{3}$ y, por tanto:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{3}}$$

En general, cuando hay n fuentes en paralelo se cumple:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}} \quad (5.9)$$

Problemas resueltos

1. La tensión en los bornes de una fuente es de 100 V. ¿Cuál es el valor de la fem si la resistencia externa es 5 veces mayor que la interna?

Solución

En general, sabemos que $\varepsilon = U_r + U_R$. Ahora bien, según los datos del problema:

$$U_R = 100 \text{ V y } U_r = \frac{U_R}{5} = \frac{100 \text{ V}}{5} = 20 \text{ V}$$

entonces:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 100 \text{ V} + 20 \text{ V} \\ \varepsilon &= 120 \text{ V} \end{aligned}$$

2. En el circuito de la figura 5.8, determina el valor de la fem si la resistencia interna de la batería es 1Ω , la tensión en los bornes de la fuente es de 30 V y $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \Omega$.

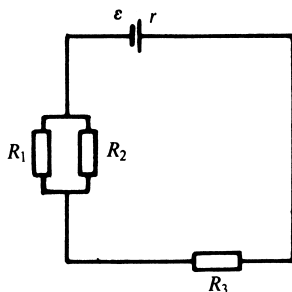


Fig. 5.8

Solución

La ley de Ohm para un circuito completo plantea que:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Despejando ε :

$$\varepsilon = I (R + r)$$

Debemos calcular primero los valores de la resistencia externa del circuito y de la intensidad de la corriente.

Datos:

$$U_R = 30 \text{ V}$$

$$r = 1 \text{ } \Omega$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ } \Omega$$

Ahora bien:

$$R = R_p + R_3$$

donde R_p es la resistencia equivalente de R_1 y R_2 que están en paralelo. Entonces:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1} + R_3$$

Si sustituimos los valores de R_1 , R_2 y R_3 , tendremos que:

$$R = 15 \text{ } \Omega$$

el valor de I lo podemos obtener a partir de la ley de Ohm para una porción del circuito (considerando toda la parte externa).

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{30 \text{ V}}{15 \text{ } \Omega}$$

$$I = 2 \text{ A}$$

y sustituyendo en la ecuación para ε , obtenemos:

$$\varepsilon = 2 \text{ A} (15 \text{ } \Omega + 1 \text{ } \Omega)$$

$$\varepsilon = 2 \text{ A} (16 \text{ } \Omega)$$

$$\varepsilon = 32 \text{ V}$$

3. Una lámpara de linterna está conectada a dos elementos galvánicos, como muestra la figura 5.9. Los valores de la fem de los elementos galvánicos son 4,5 V y 1,5 V, y sus resistencias internas son 1,5 Ω y 0,5 Ω respectivamente.

Calcula la intensidad de la corriente a través de la lámpara, si la resistencia del filamento es 27 Ω .

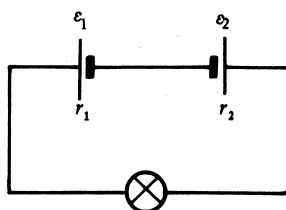


Fig. 5.9

Solución

Según la ley de Ohm para un circuito completo:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Como las fuentes están acopladas en serie:

$$\varepsilon = \sum_1^n \varepsilon_n$$

y:

$$r = \sum_1^n r_n.$$

Para nuestro caso:

$$\varepsilon = 4,5 \text{ V} - 1,5 \text{ V} = 3 \text{ V}$$

y:

$$r = 1,5 \, \Omega + 0,5 \, \Omega = 3 \, \Omega$$

luego:

$$I = \frac{3 \text{ V}}{27 \, \Omega + 3 \, \Omega} = \frac{3 \text{ V}}{30 \, \Omega}$$

$$I = 0,1 \text{ A}$$

4. Cinco baterías iguales, acopladas en paralelo, forman parte de un circuito cuya tensión en los bornes es de 22 V (fig. 5.10). Si la resistencia interna de cada elemento es 1 Ω y $R_1 = 20 \, \Omega$, $R_2 = R_3 = 5 \, \Omega$, determina la fem de cada elemento.

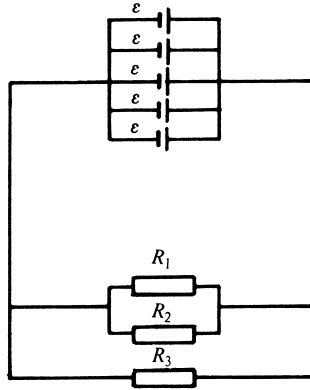


Fig. 5.10

Solución:

Sabemos que:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Como las fem son iguales y están acopladas en paralelo:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{5}}$$

de donde:

$$\varepsilon = I \left(R + \frac{r}{5} \right)$$

Ahora bien, como las resistencias R_1 , R_2 y R_3 están en paralelo, su resistencia equivalente será:

$$\frac{1}{R} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3}$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

y sustituyendo por los datos del problema, nos queda:

$$R = 2,2 \, \Omega$$

La intensidad de la corriente podemos obtenerla a partir de la ley de Ohm para una porción de un circuito:

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{22 \text{ V}}{2,2 \, \Omega}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

de ahí que:

$$\varepsilon = 10 \text{ A} \left(2,2 \, \Omega + \frac{1,0 \, \Omega}{5} \right)$$

$$\varepsilon = 10 \text{ A} (2,2 \, \Omega + 0,2 \, \Omega)$$

$$\varepsilon = 10 \text{ A} \cdot 2,4 \, \Omega$$

$$\varepsilon = 24 \text{ V}$$

Tareas generales del capítulo

1. Una fuente, con una fem de 24 V, produce una corriente de 10 A con una tensión en los bornes de 22 V. Halla la resistencia interna y la corriente de cortocircuito.
2. Un circuito está constituido por una batería de linterna y un reóstato. Para un valor de la resistencia del reóstato de $1,65 \, \Omega$, la tensión en él es de 3,30 V, y para una resistencia de $3,50 \, \Omega$, la tensión es 3,50 V. Calcula el valor de la fem de la batería y su resistencia interna.
3. Un circuito cerrado se alimenta de una fuente con una fem de 6 V y una resistencia interna de $0,1 \, \Omega$. Dibuja la gráfica de la tensión en los bornes de la fuente en función de la intensidad de la corriente.
4. La fem de una fuente es 12 V. Si la resistencia interna es 5 veces menor que la resistencia externa, ¿cuál es el valor de la tensión en los bornes de la fuente?
5. Una batería con una fem de 22,5 V y una resistencia interna de $0,5 \, \Omega$, está conectada en paralelo con dos conductores de $5 \, \Omega$ y $20 \, \Omega$ respectivamente, formando un circuito cerrado. ¿Qué intensidad de corriente circula por los conductores?
6. Diez elementos, con una fem de 2,1 V y una resistencia interna de $0,5 \, \Omega$ cada uno, están unidos en paralelo formando una batería. El circuito consta además de tres conductores unidos en paralelo con resistencias de $2 \, \Omega$, $6 \, \Omega$ y $12 \, \Omega$ respectivamente.
 - a) Determina la intensidad de la corriente en cada conductor.
 - b) Si los elementos de fem estuvieran en serie, ¿cuáles serían los valores de la intensidad de la corriente en los conductores?
7. Una fuente, con una fem de 27 V y una resistencia interna de $10 \, \Omega$, alimenta con una corriente de 10 mA una bobina de alambre de cobre

de 130 g. Determina la longitud y el diámetro del alambre de la bobina.

8. Determina el valor de I_1 , I_2 y la resistencia R_x en el circuito representado en la figura 5.11, si $I = 5$ A. Datos: $R_1 = 1 \, \Omega$; $R_2 = 2 \, \Omega$; $R_3 = 3 \, \Omega$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 27,5$ V; $r = 0,5 \, \Omega$

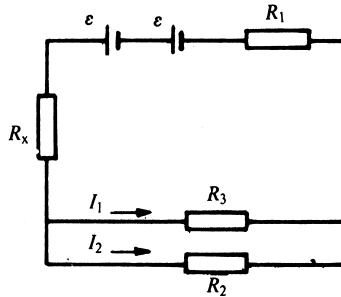


Fig. 5.11

9. Calcula la intensidad de la corriente y la caída de tensión en los resistores del circuito de la figura 5.12.

Datos: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 72$ V; $r_1 = r_2 = r_3 = 4 \, \Omega$; $R_1 = 5 \, \Omega$; $R_2 = R_3 = 6 \, \Omega$; $R_4 = 20 \, \Omega$; $R_5 = 10 \, \Omega$.

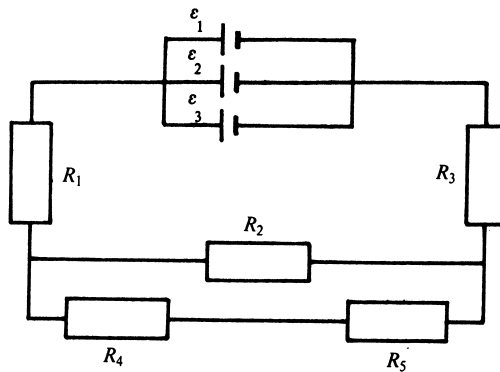


Fig. 5.12

Capítulo 6

CORRIENTE ELÉCTRICA

EN LOS DIFERENTES MEDIOS

6.1 *Introducción*

El hecho de que materiales de diferentes estructuras cristalinas posean diferentes capacidades para conducir la corriente eléctrica, indujo la idea de proponer que las propiedades eléctricas de diferentes sustancias están en dependencia del número de electrones libres en su estructura. Ya conoces que existen algunas sustancias que poseen un gran número de partículas cargadas libres y que, por tanto, conducen fácilmente la corriente eléctrica (conductores), y otras sustancias con pocas partículas cargadas libres, que conducen débilmente la electricidad aun cuando la diferencia de potencial sea grande (aisladores).

En la naturaleza existen un buen número de sustancias conductoras (metales, soluciones acuosas, sales electrolíticas fundidas, etc.) y aisladoras (ámbar, porcelana, vidrio, ebonita, etc.). Sin embargo, la mayoría de las sustancias conocidas forman un grupo intermedio: no conducen tan bien como para considerarlas conductoras, ni tan mal para considerarlas aisladoras, de ahí que se denominen *semiconductores*. Los semiconductores desempeñan un papel importante en el desarrollo actual de la ciencia y la técnica.

6.2 *Corriente eléctrica en los metales*

Experimentos realizados con conductores metálicos demostraron que en estos materiales son los electrones libres, y no los átomos o iones, los que intervienen en la conducción eléctrica. Las pruebas más convincentes de ello fueron los experimentos realizados por Mandelstam y Papalaxi (1913), y Tollman y Stuart (1916). Los primeros realizaron una serie de experimentos de carácter cualitativo, mediante los cuales se observó el hecho de que en una bobina de alambre que efectúa rotaciones alrededor de un eje, aparecía una corriente. Los segundos, con experimentos similares, obtuvieron resultados cuantitativos.

En la figura 6.1 se muestra el esquema del experimento de Tollman y Stuart. Consideremos una bobina constituida por un gran número de vueltas de alambre fino; los extremos de este alambre se sueldan a dos discos metálicos aislados entre sí, a los cuales se conecta un galvanóme-

tro por medio de contactos deslizantes. Un dispositivo especial permite detener bruscamente la bobina cuando esté girando con rapidez.

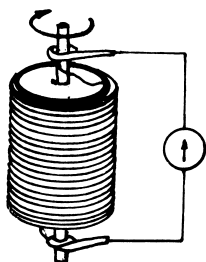


Fig. 6.1

Si la corriente en los metales se debe al movimiento de los electrones libres, entonces sucede que después de la parada brusca de la bobina los electrones libres continúan moviéndose por inercia algún tiempo y, por consiguiente, en la bobina se produce una corriente eléctrica de corta duración. Dicha corriente dura muy poco porque a causa de la interacción que se produce con los iones, los electrones son frenados y, en consecuencia, el movimiento ordenado de estos (la corriente) cesa.

Los experimentos demostraron que después de frenar la bobina, en el circuito se produce, durante algún tiempo, una corriente eléctrica cuyo sentido se corresponde con el de las partículas cargadas negativamente.

La medida de carga en la bobina durante este proceso depende de la carga de cada una de las partículas que originaron la corriente y de sus masas (e/m), por lo que al medir el valor de la carga que pasa por el galvanómetro durante todo el tiempo de existencia de la corriente eléctrica en el circuito, se logró definir la relación carga-masa (e/m), que resultó ser $1,8 \cdot 10^{-11}$ C/kg. Este valor coincide con el valor de la relación carga-masa para los electrones, determinado experimentalmente.

Campo eléctrico en el interior de un conductor con corriente

En la electrostática vimos que el campo eléctrico en el interior de un conductor aislado y cargado es nulo. También se estudió que la intensidad del campo eléctrico de una carga depende del cuadrado del inverso de la distancia y, en consecuencia, que el valor del campo disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia.

Ahora bien, ¿qué sucede cuando a un conductor metálico se le aplica una tensión constante entre sus extremos por medio de una batería, un acumulador o cualquier otra fuente de tensión? ¿Cómo es que el campo eléctrico se extiende a todo lo largo del conductor, incluso hasta considerables distancias de la fuente?

El campo eléctrico producido por un elemento galvánico está asociado con las partículas cargadas que se acumulan en sus bornes, a causa

de la acción de las fuerzas no coulombianas que actúan en el interior de la fuente. Sin embargo, el campo eléctrico que se extiende por el interior y a todo lo largo del conductor, y que determina que en estos se produzca una corriente eléctrica, no puede ser causado solo por las partículas cargadas que se encuentran acumuladas en los bornes de la fuente.

El campo eléctrico que actúa a lo largo de un conductor surge como consecuencia de la acción inicial de las partículas cargadas acumuladas en los bornes de la fuente, las cuales determinan que en los extremos del conductor, parte de los portadores libres existentes en su interior se desplacen hacia su superficie. Esta carga superficial, a su vez, actúa sobre los portadores libres que están en sus proximidades, y así, sucesivamente, se va propagando este efecto que determina que aparezca un campo eléctrico a todo lo largo del conductor. Ese campo provoca el movimiento de los electrones libres del metal y, en consecuencia, la existencia de una corriente eléctrica.

El fenómeno del surgimiento de las cargas superficiales y del establecimiento del campo por el interior del conductor, se produce a una velocidad extraordinariamente grande. Por eso al cerrar el interruptor de un circuito la corriente eléctrica se establece casi instantáneamente a todo lo largo del conductor.

Cuando la intensidad de la corriente permanece constante, ello significa que el campo eléctrico asociado a los portadores eléctricos superficiales no varía con el tiempo (campo eléctrico estacionario). Esto es una consecuencia de que la densidad de las cargas superficiales se mantenga invariable, pues la cantidad de portadores que se trasladan desde un sector del conductor hacia otro en un intervalo de tiempo Δt , es sustituida por otra igual que llega a ese mismo sector en dicho intervalo de tiempo.

El campo eléctrico estacionario, que determina la existencia de una corriente de valor constante, es muy similar al campo electrostático uniforme.

Movimiento de los electrones en los metales. Ley de Ohm a partir de la teoría electrónica clásica

Ya conoces que los electrones libres dentro del metal se mueven desordenadamente en ausencia de un campo eléctrico. En estas condiciones, la trayectoria que describe cada electrón es una línea quebrada, como consecuencia de los múltiples choques que experimenta contra los iones que integran la estructura del conductor. El movimiento del electrón entre dos choques sucesivos se puede considerar rectilíneo y uniforme. La distancia promedio que recorre un electrón entre dos choques recibe el nombre de recorrido libre medio (λ), y al tiempo que emplea en recorrer dicha distancia se le llama tiempo medio (τ). La medida de τ depende de la medida del recorrido libre y de la velocidad del movimiento térmico de los electrones, V_T , es decir:

$$\tau = \frac{\lambda}{V_T}$$

Es evidente que un incremento de la temperatura determina un incremento de V_T y, por tanto, una disminución de τ . Además, se incrementa el número de choques que experimenta un electrón en la unidad de tiempo.

Si se le aplica al conductor un campo eléctrico, los electrones, además del movimiento térmico, adquieren un movimiento orientado en sentido contrario al del campo aplicado (por ser la carga del electrón negativa).

Al aplicar entre los extremos de un conductor metálico de longitud l una tensión U , el valor del campo eléctrico que se manifiesta en el interior del conductor tiene un valor:

$$E = \frac{U}{l}$$

Entonces, sobre los electrones libres del conductor actúa una fuerza $\vec{F} = e\vec{E}$. Bajo la acción de esta fuerza los electrones, entre dos choques sucesivos, adquieren un movimiento uniformemente acelerado. Como consecuencia de esto se desplazan, en su conjunto, ordenadamente con una velocidad media $\bar{v}$.

Para determinar la intensidad de la corriente que se establece en el conductor a causa del campo eléctrico $\vec{E}$, es necesario conocer la dependencia de la velocidad media $\bar{v}$ con la fuerza F que actúa sobre cada electrón.

El valor medio de la velocidad del movimiento dirigido (ordenado) de los electrones, es igual a la velocidad media del movimiento uniformemente acelerado que adquiere el electrón entre dos choques sucesivos, o sea:

$$v = \frac{v_0 + v_F}{2}$$

pero después de cada choque se puede considerar que $v_0 = 0$, luego:

$$\bar{v} = \frac{v_F}{2}$$

Ahora bien, considerando que $v_F \ll V_T$, podemos plantear que $v_F = a\tau$, donde a es la aceleración que adquiere el electrón bajo la acción del campo eléctrico $\vec{E}$ y τ es el tiempo transcurrido entre dos choques sucesivos, por lo que:

$$v_F = \frac{F}{m} \tau$$

$$v_F = \frac{eE}{m} \tau$$

y:

$$\bar{v} = \frac{e\tau}{2m} E \quad (6.1)$$

La velocidad media del movimiento ordenado de los electrones es proporcional a la intensidad del campo E .

Si sustituimos la fórmula 6.1, en la expresión obtenida en el capítulo anterior para la intensidad de la corriente (ecuación 5.2), obtendremos:

$$I = \frac{n e^2 \tau S}{2 m l} U \quad (6.2)$$

Del análisis de esta expresión es evidente que la intensidad de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la tensión, lo cual es lo que expresa la ley de Ohm. Si comparamos la ecuación 6.2 con la expresión de la ley de Ohm para una porción de un circuito, estudiada en secundaria básica ($I = \frac{U}{R}$), obtendremos una expresión para la resistencia del conductor metálico en función de las constantes microscópicas del metal, es decir:

$$R = \frac{2 m l}{n e^2 \tau S}$$

y como $R = \rho \frac{l}{S}$, entonces la resistencia específica será:

$$\rho = \frac{2 m}{e^2 n \tau} \quad (6.3)$$

de donde vemos que la resistencia específica de los conductores metálicos depende de la carga del electrón (e), de su masa (m), de la concentración de electrones (n) y del tiempo medio (τ) entre dos choques.

Dependencia de la resistencia de los conductores metálicos con la temperatura

La resistencia de los conductores metálicos varía al cambiar la temperatura. Esto se puede comprobar fácilmente haciendo pasar una corriente eléctrica por una espiral de acero, que se calienta con una llama. Con un amperímetro conectado al circuito se mostrará que a medida que aumenta la temperatura en la espiral la intensidad de la corriente eléctrica disminuye.

Analicemos la variación relativa de la resistencia con la temperatura. Si a una temperatura de 0°C la resistencia de un conductor dado es R_0 y a una temperatura de $t^\circ\text{C}$ la resistencia es R , entonces el cambio relativo de la resistencia es:

$$\frac{R - R_0}{R_0}$$

El experimento demuestra que la variación relativa de la resistencia con la de la temperatura es directamente proporcional a la variación de la temperatura:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha \Delta t$$

por tanto:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t) \quad (6.4)$$

El coeficiente de proporcionalidad α tiene un valor aproximadamente constante y se denomina coeficiente térmico de resistencia. Caracteriza la dependencia de la resistencia de una sustancia con la temperatura, y equivale al cambio relativo de la resistencia del conductor al variar su temperatura en 1 °C.

Los experimentos para determinar α , utilizando la expresión 6.4 demuestran que para los metales puros, $\alpha \approx \frac{1}{273}$ grados

Al calentar un conductor metálico sus dimensiones geométricas varían muy poco. Su resistencia varía fundamentalmente a causa de las variaciones de la resistividad con la temperatura. La dependencia de la resistividad con la temperatura se puede obtener a partir de la expresión 6.4 si:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

y:

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$$

con lo cual se llega a que:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (6.5)$$

Entonces, la resistividad varía linealmente con la temperatura (fig. 6.2).

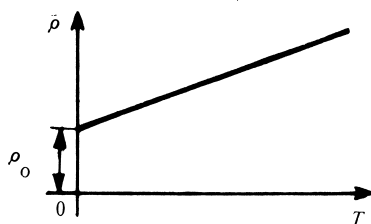


Fig. 6.2

A pesar de ser el coeficiente α bastante pequeño, es imprescindible tener en cuenta la dependencia de la resistencia con la temperatura al calcular las características de un dispositivo cualquiera cuya temperatura varíe.

Así, por ejemplo, la resistencia del hilo de wolframio de una lámpara incandescente aumenta en más de diez veces al pasar por ella la corriente. En algunas aleaciones, pongamos por caso el constantán (60% Cu y 40% Ni), α es muy pequeña, aproximadamente 10^{-5} grados $^{-1}$, y sin embargo la resistencia específica del constantán es grande (10^{-6} $\Omega \cdot m$). Tales aleaciones se utilizan en la fabricación de resistencias patrones, resistencias adicionales y *shunts* para aparatos de medición; o sea, en aquellos casos en que es necesario que la resistencia no varíe apreciablemente con la temperatura.

La dependencia de la resistencia de los metales con la temperatura se utiliza también en los "termómetros de resistencia" (sondas termométricas).

Hay algunos metales y aleaciones en los cuales la resistencia disminuye bruscamente hasta llegar a ser prácticamente nula, para temperaturas muy bajas (entre 1 y 7 K). Este fenómeno fue descubierto por el físico holandés Kamerling Onnes en el año 1911 y se denomina superconductividad. Onnes observó que al enfriar en helio líquido el mercurio, su resistencia variaba primero paulatinamente y, a partir de 4,1 K disminuía bruscamente, haciéndose casi cero (fig. 6.3).



Fig. 6.3

La superconductividad se observa a temperaturas muy bajas, por debajo de los 20 K. En la actualidad, la superconductividad se ha logrado para un gran número de elementos y aleaciones. En la tabla 6.1 aparecen las temperaturas de paso al estado de superconductividad de algunas sustancias.

Al pasar una sustancia al estado de superconductividad, varían otras de sus propiedades: la capacidad calorífica, las propiedades magnéticas, etcétera.

En cada conductor en estado de superconductividad hay un valor crítico de la intensidad de la corriente, el cual no se puede sobrepasar sin destruir el estado de superconductividad. Los superconductores tienen una amplia aplicación práctica.

Tabla 6.1

Sustancia	Temperatura de transición al estado de superconductividad (K)
Circonio	0,3
Cadmio	0,6
Cinc	0,79
Aluminio	1,14
Mercurio	4,12
Tantalio	4,38
Plomo	7,26
Niobio	9,22

Problemas resueltos

1. ¿Cómo y en cuánto varía la resistencia de un conductor metálico si su temperatura se lleva de 0 a 60 °C?

Solución

Sabemos que

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

Ahora bien, como dato del problema tenemos que $\Delta t = 60$ °C, por tanto:

$$R = R_0 \left(1 + \frac{1}{273} \text{°C}^{-1} \cdot 60 \text{°C} \right)$$

$$R = R_0 (1 + 0,2)$$

$$R = 1,2 R_0$$

Por lo tanto, la resistencia del conductor metálico aumenta en 1,2 veces al aumentar su temperatura en 60 °C.

2. A través de un conductor metálico fluye una corriente eléctrica de 50 mA a 0 °C y una tensión de 10 volt. Si al aumentar la temperatura la corriente disminuye a 25 mA, manteniendo constante la tensión, determina la variación de temperatura experimentada por el conductor.

Solución

Tenemos que:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

luego:

$$\Delta t = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}$$

Con los datos del problema podemos calcular R y R_0 :

$$R_0 = \frac{10 \text{ V}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 2 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R = \frac{10 \text{ V}}{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 4 \cdot 10^3 \Omega$$

Entonces Δt nos queda:

$$\Delta t = \frac{4 \cdot 10^3 \Omega - 2 \cdot 10^3 \Omega}{\frac{1}{273} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 2 \cdot 10^3 \Omega}$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot 10^3 \Omega}{\frac{1}{273} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 2 \cdot 10^3 \Omega}$$

$$\Delta t = 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tareas

1. Explica cómo es posible determinar experimentalmente la naturaleza de los portadores de carga de un metal.
2. ¿De qué factores depende la resistencia específica de los conductores metálicos?
3. Explica cómo varía la resistencia y la resistividad de los conductores metálicos con la temperatura.
4. Explica en qué consiste el fenómeno de superconductividad.
5. A 0°C fluye una corriente de 64 mA a través de un alambre de cobre, a una tensión de 2,4 V. A 100°C , para una misma tensión, la corriente es de 46 mA. ¿Cuál es el valor del coeficiente de resistencia térmica (α) para el cobre?
6. Determina a qué variación de temperatura fue sometido un conductor de cobre si, antes de calentarse, al estar bajo una tensión de 0,8 V, por él circuló una corriente de 0,25 A; y en estado incandescente a una tensión de 0,9 V, la corriente que circuló fue de 62,5 mA.

6.3 Corriente eléctrica en los gases

Ya conoces que los gases, normalmente, no son conductores de la electricidad. Sin embargo, bajo determinadas condiciones es posible lograr en ellos conductividad eléctrica. Los rayos que se producen en las

tormentas, el arco eléctrico y las descargas en los anuncios luminicos son algunos de los fenómenos que evidencian que los gases pueden conducir la corriente eléctrica.

Conducción en los gases. Ionización

Analicemos uno de los procesos que da lugar a la conducción en los gases.

Utilizamos un carrete de inducción (transformador que genera en su enrollado secundario miles de volt) en cuyos terminales hemos colocado previamente dos alambres, doblados de forma que sus extremos disten algunos centímetros (fig. 6.4). En estas condiciones no sucederá nada que induzca a pensar que entre los dos alambres pueda circular una corriente eléctrica. El aire, en condiciones normales, se comporta como un dieléctrico, pues no existen en él partículas cargadas que sean capaces de producir una corriente eléctrica.

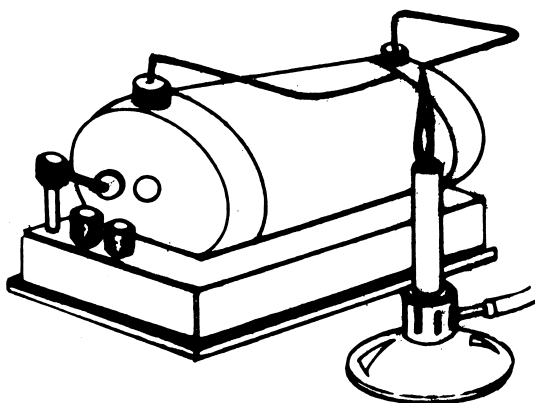


Fig. 6.4

Sin embargo, si acercamos la llama de un mechero al espacio entre los dos alambres, se observarán chispas violáceas que saltan entre ellos. En estas condiciones, ante una diferencia de potencial y bajo la acción de un agente externo (calor), el aire es capaz de conducir la corriente eléctrica.

En el caso anterior, el calor dotó a los átomos de cierta cantidad de energía cinética. Al chocar entonces más violentamente que antes, pierden electrones. A este fenómeno de ruptura se le denomina *ionización*, y al agente que lo provoca *ionizador*. Por acción del calor, parte de los átomos se ionizan. Los electrones o iones positivos formados contribuyen al salto de la chispa y, por consiguiente, al establecimiento de una corriente eléctrica. La energía necesaria para producir la división del átomo se denomina *energía de ionización*, y posee un valor característico para cada

átomo. La tabla 6.2 muestra algunos valores de esta energía para distintas sustancias.

Tabla 6.2

Sustancia	Energía de ionización (eV)
He	24,5
Ne	21,5
Ar	15,7
N	14,5
O	13,6
K	13,6
Li	5,39
Cs	3,89

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

La energía de ionización puede ser entregada al átomo de diferentes formas: incidencia de rayos X, radiaciones, etcétera.

Los electrones que se separan de los átomos neutros bajo la acción de los agentes ionizadores, pueden unirse a otros átomos neutros formando iones negativos. En otras palabras, la conducción en el gas se efectúa por los iones positivos y negativos, y además, como en los metales, por los electrones.

Si el agente ionizador deja de actuar, se comprueba experimentalmente que, al cabo de un cierto tiempo, el gas de nuevo se torna dieléctrico. Se produce una recombinación, producto de la cual las diferentes partículas cargadas forman átomos neutros, incapaces de conducir (fig. 6.5). Este proceso, denominado recombinación, ocurre también cuando el ionizador aún no ha dejado de actuar. Por ello, el número de átomos neutros que se ionizan en la unidad de tiempo es igual al número que se recombina.

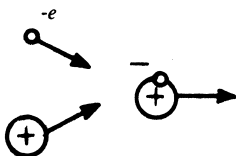


Fig. 6.5

Hasta aquí hemos analizado una parte de los procesos que generan las partículas cargadas en el seno del gas. No obstante, para que se produzca la conducción es indispensable la acción de un campo eléctrico que pon-

ga en movimiento a los portadores de carga. En este caso, las partículas positivas se moverán en el mismo sentido del campo, y las negativas en sentido contrario.

Si el gas en cuestión está muy enrarecido, es decir, si hay pocos átomos por unidad de volumen, el movimiento de las partículas será acelerado. No obstante, si la concentración de átomos es grande, las partículas cargadas experimentarán un número enorme de choques cuyo efecto promedio es equivalente al de una fuerza resistiva o de fricción a su desplazamiento. En este caso, el movimiento se realiza a velocidad constante, cumpliéndose que:

$$\vec{v} \propto \vec{E}$$

donde $\vec{v}$ es la velocidad con que se mueve la partícula y $\vec{E}$ la intensidad del campo eléctrico. Esta relación es válida, en general, para presiones mayores que algunas decenas de milímetros de Hg.

Si se comparan los gases con los metales, podemos apreciar que los primeros reúnen portadores de carga de ambos signos, o sea, electrones e iones. Además, durante el proceso de conducción, la concentración de los portadores de carga varía grandemente de un lugar a otro, lo cual crea un factor extra que influye en el movimiento de los portadores.

Descargas autónoma y no autónoma

Para investigar las descargas en los gases a distintas presiones, se utiliza un tubo de vidrio lleno de algún gas, en el cual se introducen dos electrodos metálicos que se encuentran separados a una determinada distancia (fig. 6.6).

Por medio de una fuente de tensión y la resistencia variable R se regula la tensión aplicada a los electrodos, cuyo valor puede ser determinado con un voltímetro. También se puede medir la corriente que pasa por el tubo con ayuda de un amperímetro (A).

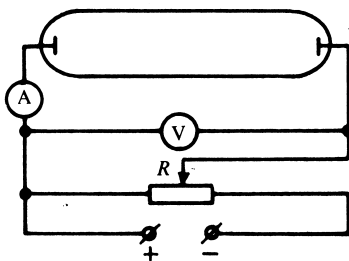


Fig. 6.6

Para valores pequeños de la tensión el amperímetro no indicará corriente alguna, pero si ionizamos el gas de alguna forma (ya sea con rayos X ultravioleta, etcétera.) se detectará el surgimiento de una corriente

eléctrica, que irá aumentando a medida que la tensión U aumente (tramo OA de la figura 6.7). Si la tensión entre los electrodos crece hasta alcanzar valores mayores ($U > U_a$) llega un momento en que la corriente deja de crecer y permanece constante. A esta corriente se le llama *corriente de saturación* I_s (rama AB de la figura 6.7) y su intensidad depende de las características del agente ionizador.

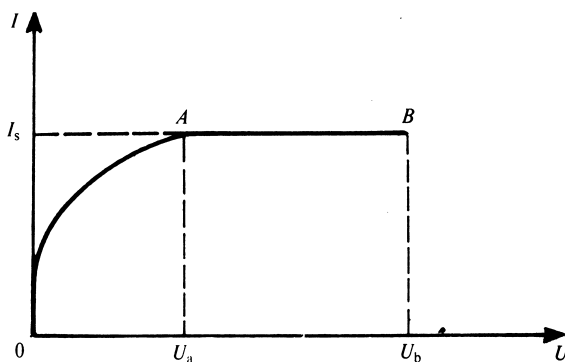


Fig. 6.7

Estos tipos de descargas gaseosas (las representadas por cualquier punto de las ramas OA y AB de la figura 6.7) tienen una particularidad: si en algún momento cesa la acción del ionizador, rápidamente cesará la corriente a través del tubo, pues ya no habrá nada que genere los iones y electrones que daban lugar a ella. Es por eso que a las descargas en las cuales el ionizador es una condición necesaria de existencia, se les llama *no autónomas*.

Ahora, ¿se mantendrá constante el valor de la corriente de saturación a través del tubo si se aumenta continuamente la tensión U entre los electrodos?

La respuesta es negativa. Se ha comprobado experimentalmente que cuando la tensión U se eleva más allá de cierto valor U_b , la corriente aumenta rápidamente (fig. 6.8). Esto nos lleva a pensar que ha sucedido algo que creará nuevos portadores de carga en el interior del tubo. En efecto, en el gas aparecen iones complementarios en cantidad superior a los que se forman por la acción del ionizador. La corriente puede aumentar en cien y hasta en mil veces, y la cantidad de iones que aparecen en el proceso de descarga es tan grande que el ionizador externo ya no es necesario para mantener la descarga. Así, a diferencia de las descargas no autónomas, vistas anteriormente, llamaremos *autónomas* a aquellas que no necesitan de un ionizador externo para mantenerse.

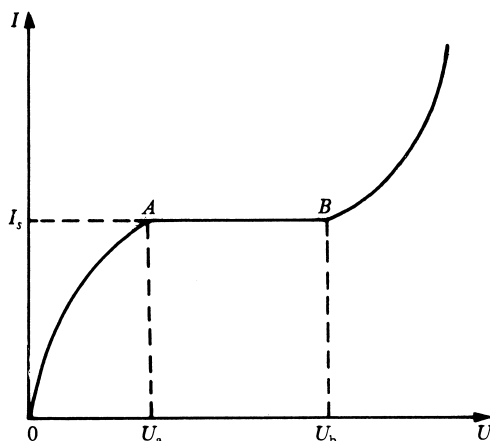


Fig. 6.8

Veamos ahora cómo se produce la descarga autónoma. Para tensiones mayores que U_a (fig. 6.8), los electrones e iones generados por el ionizador externo son arrastrados rápidamente hacia los electrodos, sin dar tiempo a que se recombinen. El campo eléctrico $\vec{E}$ entre los electrodos actúa sobre una partícula con la fuerza:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

donde q es la carga de la partícula (supongamos en lo sucesivo que es un electrón). Si l es la distancia que separa los electrodos, la intensidad del campo eléctrico vendrá expresada por:

$$E = \frac{U}{d}$$

Sustituyendo, resulta que:

$$F = \frac{qU}{d} \quad (6.6)$$

De donde puede apreciarse que la fuerza F que acelera los electrones es proporcional a la tensión U aplicada a los electrodos. Los electrones adquieren energía cinética en virtud del trabajo que sobre ellos realiza el campo eléctrico. Este proceso se realiza ininterrumpidamente, pues los electrones al chocar en sus recorridos con algunas de las partículas que componen el gas, les entregan parte de su energía. Después de cada choque, los electrones son acelerados de nuevo para volver a chocar, y así sucesivamente, hasta llegar al electrodo positivo.

De la ecuación 6.6 se comprende que si la tensión U es muy grande, la fuerza F también lo será y, por tanto, el electrón adquirirá una energía

cinética bastante grande en muy poco tiempo. Si el electrón, al chocar con un átomo neutro del gas, tiene una energía igual o mayor que la energía de ionización del átomo en cuestión, este se ionizará y se formarán así dos nuevas partículas: un ion positivo y otro electrón (fig. 6.9). Este tipo de ionización es una de las fuentes que generan los portadores en la descarga autónoma, y que hacen que cuando la tensión rebase un cierto valor U_p (tensión de cebado), la corriente aumente notablemente, pues los electrones liberados pueden ionizar otros átomos neutros, multiplicándose extraordinariamente el número de partículas cargadas. A ese proceso se le llama *ionización por choques electrónicos*.

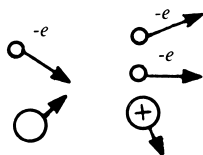


Fig. 6.9

Pero este tipo de ionización no resulta suficiente para explicar la descarga autónoma. Por mucha multiplicación de partículas que haya en el seno del gas, si se quita el ionizador llegará un momento en que todas las partículas cargadas que se generaron lleguen a los electrodos, con el consiguiente cese de la corriente. Sin embargo, no solo los electrones son acelerados por el campo eléctrico hacia el ánodo, sino que los iones positivos son acelerados hacia el cátodo, y la energía con que chocan contra este depende de la tensión U . Para tensiones lo suficientemente altas, los iones positivos son capaces de arrancar electrones del cátodo, los cuales, al encontrarse bajo los efectos del campo eléctrico, son acelerados hacia el ánodo. Este proceso de extracción de electrones, denominado *emisión electrónica secundaria*, junto con la ionización por choques electrónicos, aporta las partículas cargadas necesarias para el establecimiento de la descarga autónoma.

Los tipos de descarga autónoma estudiados reciben el nombre de descarga oscura. Sin embargo, a bajas presiones (del orden de un centenar de hPa), al alcanzarse la tensión de cebado, se produce una descarga luminiscente automantenida, caracterizada por dos zonas bien definidas: una oscura, próxima al electrodo negativo (espacio oscuro catódico), y una zona iluminada que se extiende hasta el electrodo positivo (columna positiva).

Esta luminiscencia es debida fundamentalmente a la recombinación de los iones con los electrones, para convertirse en átomos o moléculas neutras. En este caso, la energía tomada por dichas partículas al ionizarse, es devuelta en forma de luz durante la recombinación.

También se produce emisión de luz por los átomos y moléculas durante el choque de los electrones contra ellos aun sin llegar a ionizarlos.

Este fenómeno se denomina excitación del átomo. Después de excitado, al volver a su estado normal, el átomo emite en forma de luz la energía adquirida durante el choque.

La tonalidad o colorido de la zona iluminada depende de la naturaleza del gas. Así, por ejemplo, la descarga en el neón se caracteriza por su color rojizo, mientras que en el helio es amarillenta.

Si se reduce la presión por debajo del valor antes mencionado, la longitud de la columna positiva también lo hace. A una presión del orden de los décimos de hPa el espacio oscuro catódico ocupa casi todo el tubo. En este caso, la conducción está determinada fundamentalmente por el movimiento de los electrones que se producen por efecto secundario. Ellos se desplazan hacia el ánodo sin sufrir colisiones con las escasas moléculas del gas. Estos haces de electrones reciben la denominación de *rayos catódicos* y son detectados por el efecto que provocan al chocar contra las paredes de vidrio del tubo que fluorescen tenuamente con una luz de color verdoso.

Cuando el enrarecimiento es casi total (presiones inferiores a 0,001 hPa), la conducción cesa, ya que prácticamente no existen iones capaces de provocar la emisión secundaria.

Trabajo de extracción. Emisión fotoelectrónica y termoelectrónica

Hemos analizado cómo los iones positivos, cuando adquieren la energía necesaria, arrancan electrones del cátodo. Estudiemos más detalladamente este proceso.

Los metales conducen la corriente eléctrica gracias a la gran cantidad de electrones libres que pueden desplazarse en su interior. Pero es necesario considerar que esos electrones se encuentran limitados a moverse en el interior del metal (al menos en condiciones normales). Para extraer un electrón del metal hay que suministrarle cierta cantidad de energía o, en otras palabras, hay que realizar un determinado trabajo sobre él, conocido como trabajo de extracción, y que es característico para cada metal.

El trabajo de extracción se debe fundamentalmente a potenciales de origen electrostático que se producen en las proximidades de la superficie de los metales. En la tabla 6.3 aparecen los trabajos de extracción de algunos metales.

Tabla 6.3

<i>Metal</i>	<i>Trabajo de extracción (eV)</i>
W	4,50
Mo	4,27
Pt	5,29
Fe	4,36
Mg	3,46
Na	2,27

En la práctica, el trabajo de extracción puede ser realizado de varias formas, lo que da lugar a los diferentes tipos de emisiones electrónicas. En el epígrafe anterior estudiamos una de ellas, la emisión electrónica secundaria, en la cual los electrones adquirirían la energía necesaria de los iones positivos que golpeaban el cátodo.

Otro de los métodos de extracción consiste en iluminar el metal con luz ultravioleta, que es capaz de entregar a los electrones la energía necesaria para realizar el trabajo de extracción. Este proceso se conoce con el nombre de *emisión fotoelectrónica*.

Por último, debemos conocer una forma de emisión muy importante, dada la utilidad tecnológica que ha tenido y aún mantiene.

Cuando un metal es calentado, adquiere determinada energía que desde el punto de vista microscópico es almacenada en las vibraciones de los átomos que lo componen. Parte de esta energía es adquirida por los electrones y es utilizada por ellos para salir del metal; en las inmediaciones de la superficie se forma una nube electrónica. Este tipo de emisión recibe el nombre de *emisión termoelectrónica*.

Este tipo de emisión puede tener lugar en el caso de una descarga autónoma, pues si los iones positivos que llegan al cátodo son numerosos y muy energéticos, pueden calentarlo hasta tal punto que comience la emisión termoelectrónica.

Tareas

7. Di en qué consisten los procesos de ionización y recombinación.
8. Explica cómo se puede provocar la ionización de las moléculas de un gas.
9. ¿En qué se diferencian las descargas no autónomas de las autónomas y las oscuras de las luminiscentes?
10. En la gráfica de la figura 6.10 se representa la característica voltamétrica para el paso de la corriente a través de un gas. Explica las características de la descarga en los tramos AB y BC; y en los subtramos 0-1, 1-2 y 2-3.

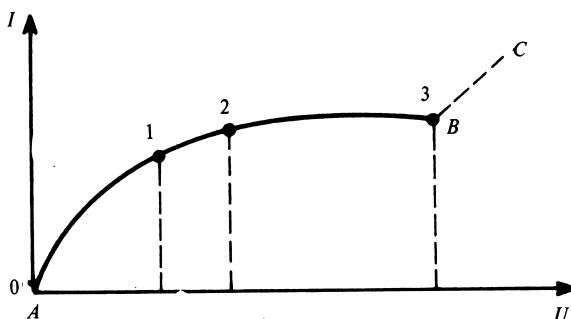


Fig. 6.10

11. ¿Cómo se define el trabajo de extracción de un electrón de un metal?
12. Explica en qué consiste la emisión termoelectrónica.

6.4 Haces electrónicas. Tubo de rayos catódicos

Vimos que en un tubo con alto enrarecimiento (al vacío), la conducción eléctrica no se produce, pues no existen portadores de carga. No obstante, existen numerosos medios técnicos cuyo funcionamiento se basa en la conducción que se logra en tubos con un alto grado de enrarecimiento. Tal es el caso de las pantallas de los televisores, los *display* de computadoras, los radares, los equipos médicos de diagnóstico y control, de investigación, los osciloscopios, etcétera.

Ahora, ¿cómo se logra la conducción en un tubo al vacío? Un tubo de rayos catódicos (tubo de Braun) está constituido por un recipiente de vidrio cerrado herméticamente en cuyo interior existe un alto grado de enrarecimiento (fig. 6.11). Los portadores de carga se obtienen en un cañón electrónico.

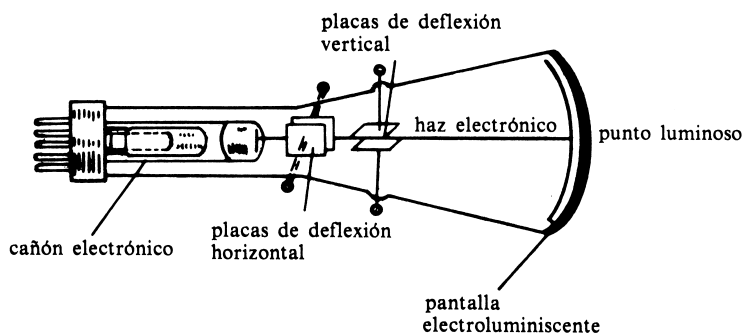


Fig. 6.11

En el cañón (fig. 6.12), la fuente generadora de electrones está constituida por un filamento contenido por un cátodo. La función del filamento es calentar el cátodo hasta la incandescencia. Por efecto termoiónico, este emite entonces una cantidad apreciable de electrones. La cantidad de electrones por unidad de volumen (densidad electrónica especial), se regula mediante el cilindro de control o rejilla, el cual se conecta a una tensión negativa respecto al cátodo. Cuanto más negativo se hace el cilindro de control, menos electrones emite el cátodo y viceversa.

Los electrones emitidos por el cátodo son acelerados por los ánodos. El primer ánodo les imprime un gran impulso atrayéndolos hacia él. Entre el primer y el segundo ánodo se manifiesta un campo eléctrico que

tiene como función concentrar los electrones para que tomen un haz estrecho que es proyectado a lo largo del eje central del tubo. Al atravesar los ánodos y salir fuera del cañón, los electrones viajan por inercia; por eso la trayectoria del haz es rectilínea.

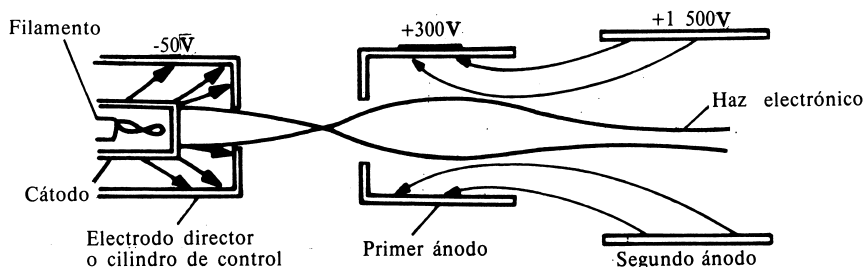


Fig. 6.12

El movimiento del haz electrónico en un tubo de rayos catódicos se puede controlar de dos formas: mediante un campo eléctrico o mediante un campo magnético. Así, si entre las placas 1 y 2 de la figura 6.11 se aplica una tensión, el campo eléctrico que se manifiesta entre ellas hace que el haz se desvíe de su trayectoria rectilínea inicial. El grado de desviación del haz depende del valor de la tensión aplicada a las placas.

También se puede desviar la trayectoria del haz electrónico si se le somete a la acción de un campo magnético (por ejemplo, el de un imán o el de un enrollado con corriente).

En conclusión, en los tubos de vacío la conducción se debe a los electrones que se producen en el cátodo por medio del efecto termoiónico, y que son impulsados por los ánodos aceleradores.

Analicemos una de las aplicaciones prácticas del tubo de rayos catódicos: el tubo de pantalla de los osciloscopios. En estos, la parte frontal del tubo, denominada pantalla, está recubierta interiormente por una sustancia fosforescente que se ilumina cuando los electrones chocan contra ella.

El haz electrónico se controla mediante un sistema de placas deflectoras que lo desvían en dos direcciones mutuamente perpendiculares entre sí. Una pareja de placas lo hace en dirección horizontal y la otra lo hace en dirección vertical.

De décimo grado conoces que en un osciloscopio se produce el movimiento periódico, en la dirección horizontal, de un punto luminoso. Esto se logra aplicando una tensión periódica entre las denominadas placas de deflexión horizontal. En la figura 6.13 se muestra la gráfica de una tensión que posee esa característica, y que recibe la denominación de tensión de diente de sierra.

Observa que la tensión crece linealmente hasta cierto valor, después disminuye con gran rapidez, y de nuevo comienza a crecer, repitiéndose el ciclo. En ello se emplea un tiempo (período) de valor T .

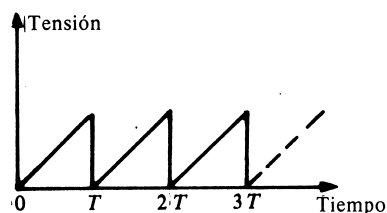


Fig. 6.13

La tensión aplicada entre las placas hace que el haz electrónico recorra la pantalla en dirección horizontal en el tiempo T , al cabo del cual regresa a la posición inicial, al disminuir bruscamente la tensión. El proceso se repite cada período y el punto luminoso recorre sucesivamente la pantalla de un lado al otro, a intervalos regulares de tiempo.

Si el período es pequeño, el haz electrónico recorre la pantalla tan rápidamente que el ojo humano no puede seguir el movimiento del punto luminoso, y percibimos una línea brillante horizontal (fig. 6.14).

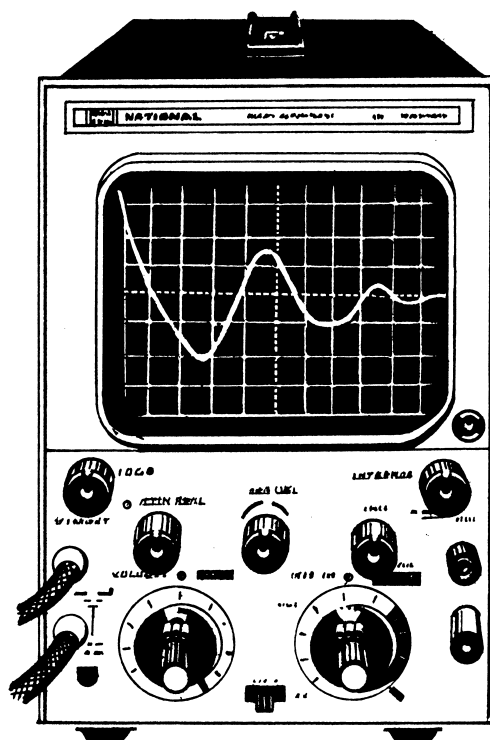


Fig. 6.14

La tensión de diente de sierra la produce un generador que recibe el nombre de *generador de barrido*. Si, mientras está conectado el generador de barrido, se aplica una tensión variable a las placas de deflexión vertical, entonces en la pantalla el haz electrónico traza una figura luminosa que expresa cómo varía la tensión aplicada en función del tiempo de barrido. En la figura 6.14 se muestra el oscilograma que se obtiene al aplicar, entre las placas verticales (*Y*) de un osciloscopio, la tensión suministrada por un micrófono activado por el sonido emitido por un diapasón.

Tareas

13. Representa esquemáticamente las partes principales del tubo de rayos catódicos utilizado en los osciloscopios. Describe brevemente sus funciones.

6.5 Corriente eléctrica en los semiconductores

No existe prácticamente un campo de la ciencia o la técnica modernas (las radiocomunicaciones, la electrónica, la televisión, la computación, las comunicaciones espaciales y otros muchos), que no hallen amplia utilización los materiales semiconductores, y mucho más específicamente los dispositivos y equipos semiconductores.

Los semiconductores son materiales en los cuales el proceso de conducción de la corriente eléctrica tiene un grupo de características propias muy originales y, desde el punto de vista práctico, muy importantes.

Estos materiales, como estudiaste en secundaria básica, no son tan buenos conductores de la corriente eléctrica como los metales, ni tan malos como los dieléctricos. De ahí su nombre de materiales semiconductores. Sus conductividades siempre se encuentran entre las de los metales (del orden de $10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) y la de los aisladores (10^{-8} a $10^{-13} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Algunos materiales semiconductores son: el germanio (Ge), el silicio (Si), el arseniuro de galio (GaAs), el sulfuro de cadmio y otros.

Dependencia de la resistencia eléctrica de los materiales semiconductores con la acción de agentes externos

Para valorar la resistencia eléctrica de los materiales semiconductores recurriremos a un experimento.

Tomemos una muestra de un material semiconductor, por ejemplo, el germanio, a la temperatura ambiente, preservándolo de la luz. Conectémosla a un circuito eléctrico, tal como se muestra en la figura 6.15. En estas condiciones se aprecia una pequeña corriente en el circuito.

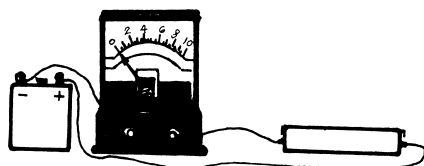


Fig. 6.15

Si la muestra semiconductor se somete a la acción de una fuente térmica, pongamos por caso un mechero, se observa que la aguja del galvanómetro se deflexa un ángulo mayor (fig. 6.16), indicando la presencia de una corriente eléctrica mayor en el circuito. Si se retira la fuente de calor, se observa que la aguja del galvanómetro regresa a su posición inicial.

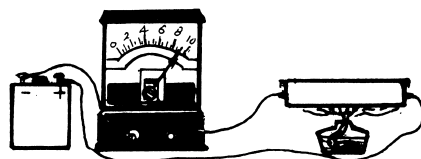


Fig. 6.16

Los experimentos anteriores evidencian la dependencia inversa de la resistencia eléctrica de los materiales semiconductores con la temperatura. Esta característica los diferencia de los metales, en los cuales la resistencia eléctrica aumenta con el aumento de la temperatura. En la figura 6.17 se muestran las curvas experimentales de dependencia de la resistencia eléctrica de un semiconductor (1) y un metal (2) con la temperatura.

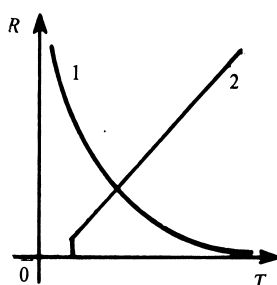


Fig. 6.17

¿Variará el comportamiento del material semiconductor si lo sometemos a la acción de una fuente intensa de luz? Si repetimos el experimento

anterior, pero en lugar de someter al material a la acción de una fuente térmica le hacemos incidir una fuente luminosa (fig. 6.18), observamos que la aguja del galvanómetro nuevamente se deflexa un ángulo grande, indicando el flujo de una corriente eléctrica por el circuito. Mientras mayor es la iluminación sobre el material, más se observa el incremento de la corriente eléctrica en el circuito.

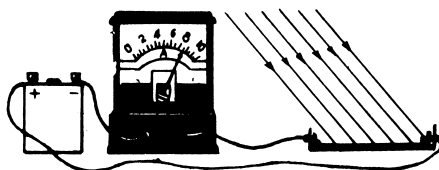


Fig. 6.18

El experimento anterior muestra que la resistencia eléctrica de un material semiconductor depende de la iluminación. Nuevamente, la variación de la resistencia con la temperatura tiene una forma aproximada a la mostrada en la figura 6.17.

De epígrafes anteriores conoces que la conducción de la corriente eléctrica en un circuito es inversamente proporcional a la resistencia. Entonces, de los experimentos anteriores podemos concluir que la conducción eléctrica en los materiales semiconductores aumenta con el incremento de la temperatura y con la iluminación. Este comportamiento es característico en la generalidad de los semiconductores. En el silicio, por ejemplo, la conductividad puede variar desde 10^{-2} hasta $10^2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, es decir, diez mil veces.

¿Por qué los semiconductores son tan sensibles a la acción de los agentes externos? Para dar respuesta a esta pregunta es necesario estudiar la estructura microscópica de estos materiales.

Conducción intrínseca de los semiconductores. Bandas energéticas

Escojamos una muestra de un semiconductor típico, por ejemplo, el germanio, y estudiemos su estructura microscópica.

De Química conoces que de acuerdo con la posición que ocupa el germanio en la tabla periódica, un átomo de este elemento tiene 32 electrones, de los cuales los 28 primeros están distribuidos en capas completas y, por consiguiente, no interactúan con el resto de los átomos. Sin embargo, los cuatro restantes, llamados electrones de valencia, sí lo hacen. Cada uno de estos cuatro electrones es compartido con otro átomo semejante, formando un enlace covalente, por lo que cada átomo de germanio está rodeado por cuatro átomos vecinos (fig. 6.19).

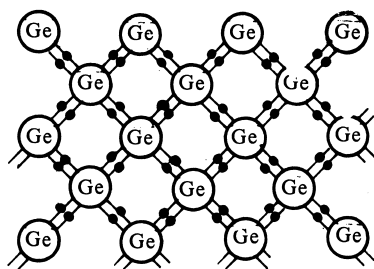


Fig. 6.19

Como se puede apreciar, los átomos se distribuyen regularmente. A esta estructura se le denomina monocristal. Los electrones de valencia están débilmente ligados a sus núcleos, y al aumentar la temperatura, llega un momento en que las vibraciones que afectan al cristal les transmiten a estos electrones una energía tal, que se desprenden de sus estados originales y pasan a ser electrones libres del cristal (fig. 6.20). Estos, bajo la acción de un campo eléctrico externo, pueden desplazarse por el cristal dando motivo a una corriente eléctrica de conducción. A estos electrones se les denomina electrones de conducción.

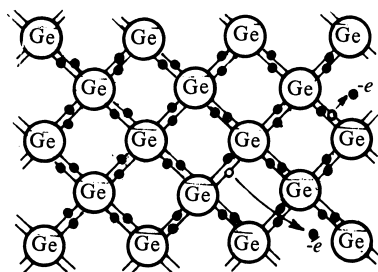


Fig. 6.20

La existencia de un número n de electrones de conducción en el cristal, es una de las razones por la cual la conductividad de los semiconductores, en general, aumenta con la temperatura. Cuando a un semiconductor se le aplica un campo eléctrico externo, éste no solo actúa sobre los electrones de conducción, sino que también lo hace sobre los electrones de valencia.

En el primer caso el resultado es conocido. Los electrones de conducción, bajo la acción del campo eléctrico, se mueven por el cristal produciendo una corriente eléctrica. En el segundo caso no es tan sencillo. Los electrones de valencia se encuentran ligados a sus núcleos formando enlaces covalentes. Sin embargo, cada electrón de conducción que se libera del enlace deja vacío el lugar en el cual se encontraba y, por tanto, una

carga positiva descompensada. Es decir, el espacio vacío tiene asociado una carga positiva de igual valor que la del electrón. Al espacio vacío se le denomina *hueco* (fig. 6.21).

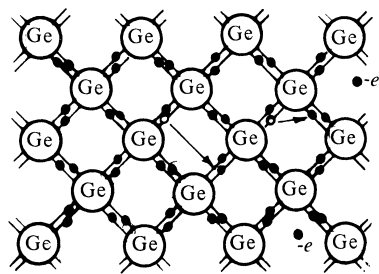


Fig. 6.21

El hueco puede ser ocupado por un electrón de valencia bajo la acción del campo eléctrico. De esta forma, si el sentido del campo eléctrico es hacia la derecha, el espacio vacío se desplazará en ese mismo sentido (fig. 6.22).

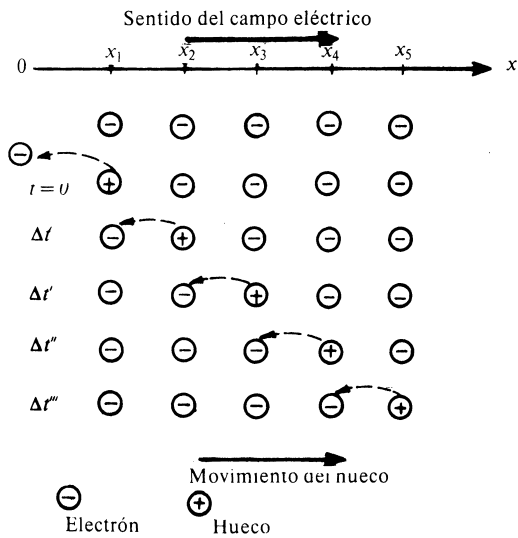


Fig. 6.22

Exteriormente, este proceso se considera como el desplazamiento de una carga eléctrica positiva, que condiciona la existencia de una corriente eléctrica debido al movimiento de los huecos.

El análisis anterior permite considerar que en el interior del semiconductor hay dos tipos de partículas cargadas: los electrones de conducción negativos y los huecos positivos. Es por ello que los semiconductores presentan dos tipos de conductividad: la conductividad electrónica y la conductividad por los huecos.

En un cristal semiconductor ideal, la corriente eléctrica se crea por el movimiento de idénticas cantidades de electrones cargados negativamente y de huecos cargados positivamente. A este tipo de conducción se le denomina *conducción intrínseca del semiconductor*.

Bandas energéticas

En epígrafes anteriores estudiamos la dependencia existente entre la conductividad de los materiales semiconductores y la temperatura. Analizamos cómo, cuando un material semiconductor se somete a la acción de una fuente térmica, la energía térmica absorbida por el cristal hace que algunos de los electrones de valencia salten de la zona de los enlaces covalentes, convirtiéndose en electrones de conducción. ¿Cómo analizar este proceso desde el punto de vista energético? En condiciones normales, en un monocristal de germanio a temperatura ambiente y preservado de la luz, los electrones de valencia se encuentran en un conjunto de estados energéticos llamado *banda de valencia*.

Al adquirir determinada cantidad de energía, estos electrones pasan a ser libres, moviéndose en otro conjunto de estados denominado *banda de conducción* (fig. 6.23).

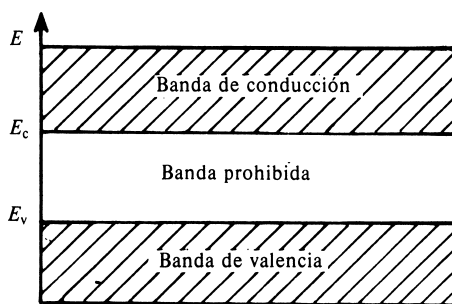


Fig. 6.23

Entre estas dos bandas se encuentra un intervalo de energía cuyos valores no pueden poseer los electrones. O poseen energía suficiente para convertirse en electrones de conducción o permanecen como electrones de valencia. Esta banda se denomina *banda prohibida*.

En la banda superior, en la figura 6.23, los electrones de conducción se desplazan en el cristal con valores de energía iguales o superiores a E_c , mientras que los huecos se desplazan con energías E_v o inferiores a esta.

A partir del establecimiento de las bandas energéticas, podemos explicar los resultados de los experimentos realizados.

Cuando un monocristal de germanio se expone a la acción de una fuente de calor, la energía térmica absorbida por el cristal hace que algunos de los electrones salten desde la zona de los enlaces covalentes, es decir, desde la banda de valencia, a la banda de conducción. De esa forma se producen los huecos en la banda de valencia, por lo que se incrementa el número de partículas cargadas, aumentando considerablemente la conductividad del semiconductor. Para que esto ocurra resulta necesario que el valor de la energía térmica entregada al cristal sea igual o mayor que la energía correspondiente a la banda prohibida.

Impurezas donadoras e impurezas aceptadoras. Conducción extrínseca

Si, durante la realización del experimento de la figura 6.16, utilizamos distintas muestras de germanio, observaremos que, para una misma temperatura y en completa oscuridad, los valores medidos de conductividad varían entre sí. ¿A qué se debe esta diferencia? ¿Acaso no hemos tomado siempre muestras de Ge? La respuesta a estas interrogantes la encontramos en la composición interna del germanio. Toda sustancia tiene una determinada cantidad de impurezas, las cuales son capaces de influir grandemente en el comportamiento de sus propiedades, aunque solo constituyan una pequeña parte del material.

Supongamos que un cristal de germanio tiene una cantidad de átomos de arsénico (As) distribuidos en su interior. De Química conoces que el átomo de este elemento tiene 33 electrones, de los cuales 5 son de valencia; o sea, tiene uno más que el de germanio.

Cuando un átomo de arsénico se encuentra en la red del germanio, solo tendrá cuatro átomos vecinos próximos con los cuales compartir sus cinco electrones de valencia, por lo que un electrón, el quinto, estará más débilmente ligado al átomo que los restantes electrones de valencia, que formarán parte de los cuatro enlaces covalentes. Esto significa que se necesita una menor cantidad de energía para arrancar este electrón del átomo y hacer que forme parte de los electrones de conducción, con plena libertad de movimiento por todo el cristal (fig. 6.24).

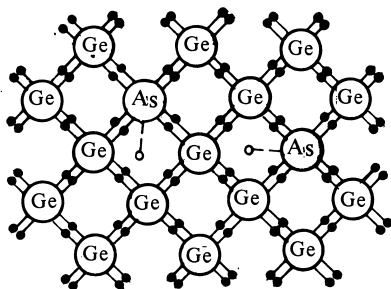


Fig. 6.24

Este electrón deja tras sí una carga positiva, no compensada, del núcleo de As. Como los cuatro enlaces en torno a este núcleo están ocupados, no hay movimiento de los electrones de valencia bajo la acción de un campo eléctrico externo y, por consiguiente, en este caso no habrá formación de un hueco, como ocurre en los semiconductores puros.

Desde el punto de vista energético, este quinto electrón tendrá una energía (E_d) inferior, pero muy cercana a la energía E_c de los electrones de conducción, por lo que los estados energéticos de estos “quintos” electrones se pueden representar, en el diagrama de bandas, como se muestra en la figura 6.25.

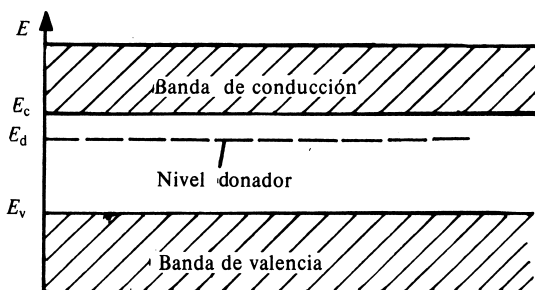


Fig. 6.25

Al nivel energético de esos electrones se le llama nivel donador, pues la impureza cede electrones. Por eso, al As y a otros elementos químicos del grupo V de la tabla periódica se les denomina impurezas donadoras.

En un semiconductor con impurezas donadoras, los electrones son los portadores principales de la corriente, aunque no los únicos, ya que existen un determinado número de huecos.

A los materiales semiconductores con impurezas donadoras, en los cuáles los electrones son los portadores principales de la corriente eléctrica, se les denomina semiconductores del tipo *n*.

¿Existirán solamente impurezas donadoras? Veamos qué sucede si a un cristal de germanio se le añaden átomos de boro (B). Conoces de Química que este elemento tiene cinco electrones, de los cuáles tres son de valencia. Por tal razón, al ser introducido un átomo de boro en la red del germanio, le falta un electrón para formar los enlaces con los cuatro electrones de valencia vecinos (fig. 6.26). Entonces, con una cantidad mínima de energía, un electrón de valencia de otro enlace puede pasar a ocupar el espacio vacío que queda en el enlace entre el boro y uno de los átomos de germanio que le rodea.

Los estados energéticos que ocuparán estos electrones de valencia atrapados, estarán situados en el diagrama de bandas por encima de la banda de valencia, pero muy cerca de ella (fig. 6.27).

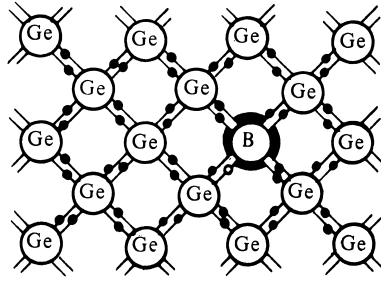


Fig. 6.26

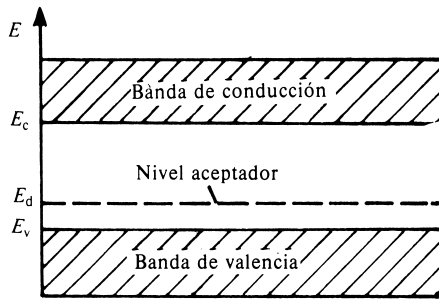


Fig. 6.27

Al nivel formado por estos estados se le llama nivel aceptador, porque realmente los átomos de boro “aceptan” electrones e indirectamente crean huecos.

En este proceso, el átomo de boro se transforma en un ion negativo, a la vez que se produce un hueco en la zona del enlace desde donde se produjo el salto. Además de estos huecos, aportados por los átomos de las impurezas, existe cierta cantidad de portadores minoritarios, debido a las características intrínsecas del semiconductor.

Las impurezas que toman electrones y originan idénticas cantidades de huecos móviles, sin que el número de electrones de conducción aumente, se denominan impurezas aceptadoras. Para temperaturas pequeñas, los principales portadores de la corriente en los semiconductores con impurezas aceptadoras son los huecos (aceptadores mayoritarios), y los electrones son los portadores secundarios (portadores minoritarios).

Los semiconductores en los cuales la concentración de los huecos supera a la concentración de los electrones de conducción, son denominados semiconductores del tipo *p*.

Tanto en los semiconductores donde predominan las impurezas donadoras (tipo *n*), como en los que predominan las impurezas aceptadoras (tipo *p*), la conducción se efectúa por los portadores originados por las

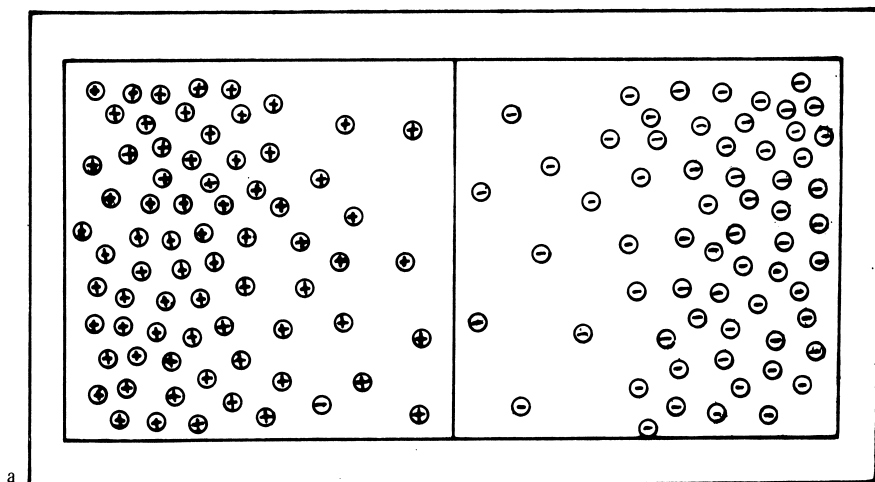
impurezas. Por esta razón a este tipo de conducción se le denomina conducción extrínseca, a diferencia de la intrínseca, donde los portadores son generados por el propio material semiconductor.

Juntura p - n . Diodo semiconductor

¿Te has preguntado cuál es la base del principio de funcionamiento de la mayoría de los dispositivos semiconductores? En el presente epígrafe, durante el estudio de la juntura p - n , hallarás respuesta a esta importante pregunta. Inicialmente, debes conocer que una juntura p - n representa la unión o contacto de dos semiconductores con distintos tipos de conductividad eléctrica; esto es, la unión de un semiconductor con impurezas donadoras (tipo n) con un semiconductor con impurezas aceptadoras (tipo p).

Para formar una juntura p - n en un cristal que posee una conductividad electrónica, por ejemplo, es necesario crear una región con conductividad originada por huecos, o viceversa. La constitución de esta región se logra introduciendo impurezas en el proceso de crecimiento de un cristal, o introduciendo átomos de impurezas en un cristal ya preparado.

Veamos qué sucede en la frontera que separa las regiones del cristal con distintos tipos de conductividad. Para ello, utilicemos un modelo formado por dos semiconductores, uno p y otro n , que se unen íntimamente (fig. 6.28a). En este caso, se produce una difusión de electrones y huecos (fig. 6.28b). En virtud de su composición, el semiconductor n posee una cantidad grande de electrones de conducción, y el p posee una cantidad grande de huecos. Los electrones de conducción se precipitan desde el semiconductor n hacia el p , recombinándose con los huecos y ocasionando la aparición de cargas no compensadas (iones negativos) en la frontera del semiconductor p (fig. 6.28c).



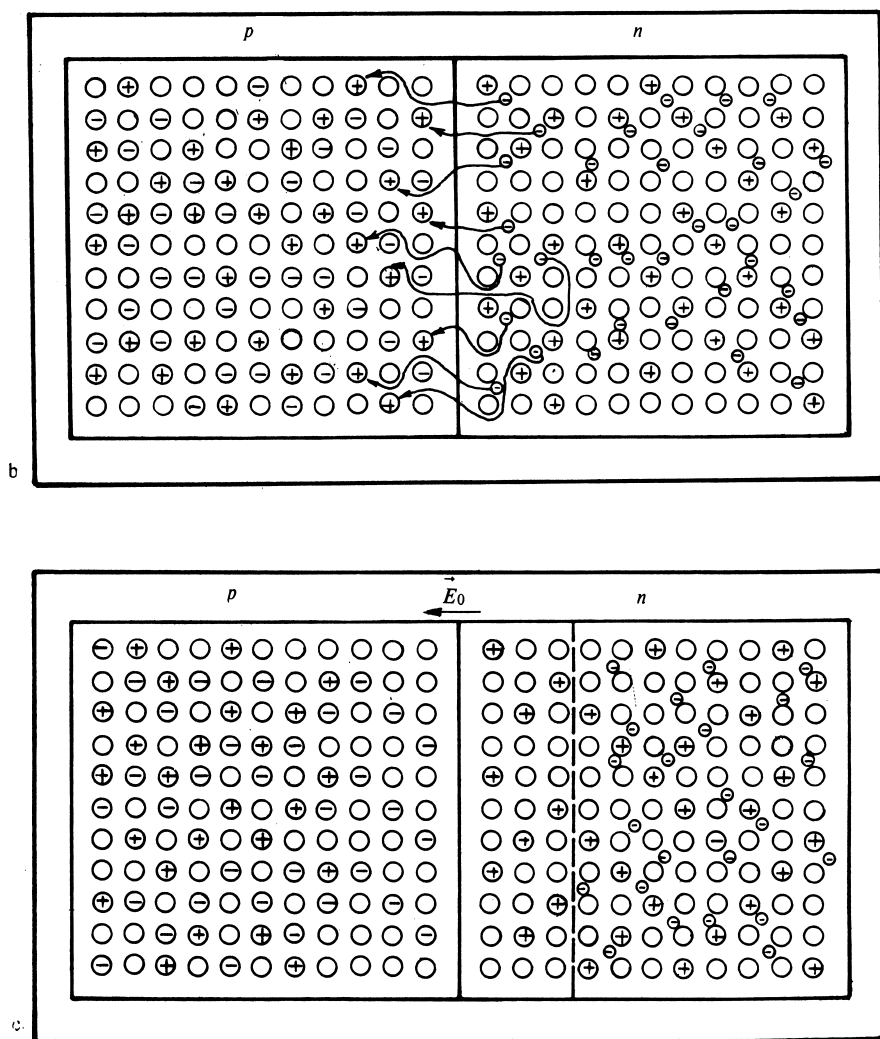


Fig. 6.28

La difusión de electrones desde el semiconductor n al p , ocasiona la aparición de iones positivos no compensados en la capa límite del semiconductor n (fig. 6.28c).

Así en el límite de los dos semiconductores se crea una capa eléctrica doble y se origina un campo eléctrico E_0 , en dirección a las cargas eléctricas negativas (fig. 6.28c). Este campo eléctrico se opone al paso de los electrones del semiconductor n al p , y de los huecos del semiconductor p al n . Constituye, pues, una barrera para los portadores mayoritarios.

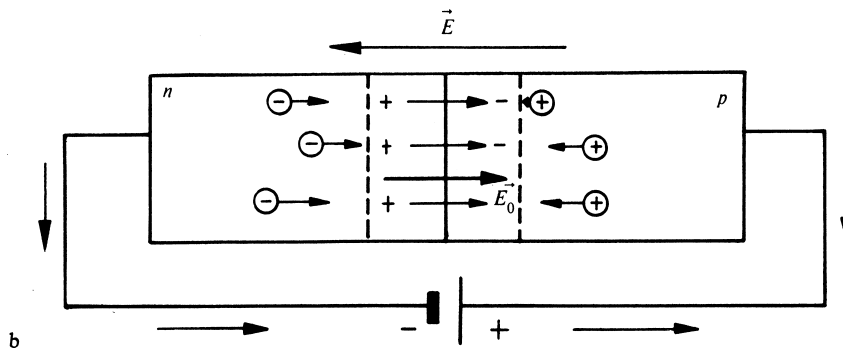
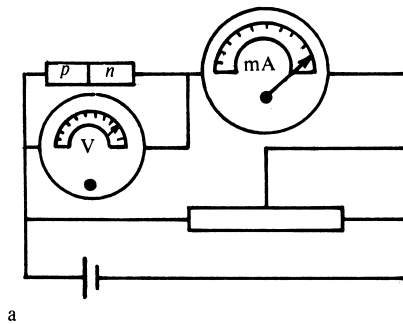
Este campo eléctrico recibe el nombre de *campo barrera* y la tensión formada por él se llama *barrera de potencial*; en los diodos de silicio, por ejemplo, es de 0,6 V.

Ahora, ¿qué pasa cuando la juntura *p-n* así formada se conecta a un circuito eléctrico?

Supongamos que a la juntura *p-n* se conecta una fuente, como se muestra en la figura 6.29a. El campo eléctrico de la fuente, E_s , es de sentido contrario al campo barrera, E_b , y lo reduce. Por lo tanto, los portadores de carga mayoritarios (electrones y huecos) pueden atravesar con facilidad la juntura (fig. 6.29b). Esto da como resultado que a partir de una tensión pequeña, aproximadamente 0,6 V en los diodos de Si y 0,21 en las de Ge, pueda fluir a través de la juntura una corriente relativamente intensa.

Si se hace variar la tensión y medimos la intensidad de la corriente que circula por el circuito, obtendremos una característica voltampérica similar a la que se muestra en la figura 6.29c.

Cuando el semiconductor se conecta como en el caso de la figura 6.29a, se dice que está polarizado en directa o en sentido de paso.



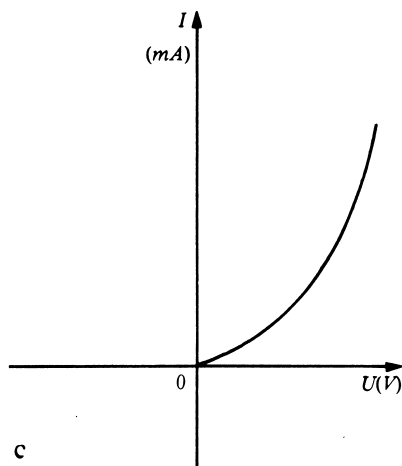


Fig. 6.29

Si invertimos la conexión de la batería (fig. 6.30a). El sentido del campo eléctrico de la fuente, E , es igual al del campo barrera, E_0 . Esto hace que el campo eléctrico E_0 se intensifique, oponiendo una mayor resistencia al paso de los portadores mayoritarios. En estas circunstancias, solo pueden pasar la barrera los portadores minoritarios que existen en ambos semiconductores. La intensidad de la corriente es muy pequeña, del orden de los microamperes (fig. 6.30 b). Por esta razón, la curva voltamétrica de esta conexión adopta la forma que se muestra en la figura 6.30c. Se dice que la juntura se encuentra, entonces, polarizada en sentido inverso.

La capacidad de la juntura $p-n$ de conducir bien la corriente eléctrica en un sentido y mal en el otro, se utiliza en dispositivos electrónicos denominados *diodos semiconductores*, que se utilizan para rectificar la corriente alterna en directa.

En la figura 6.31a se muestran distintos tipos de diodos semiconductores, así como su representación simbólica. La conducción se produce en el sentido indicado por la flecha.

Existe un tipo de diodo, denominado emisor de luz (LED), en el cual se produce, al hacerle circular la corriente en sentido de paso, un proceso de recombinación de electrones y huecos, en la zona de unión, que provoca emisión de luz. En la figura 6.31b se muestra el esquema representativo de un LED. Ellos se emplean como fuentes de luz con un bajo índice de pérdida de energía. En lo demás, este diodo se comporta como los otros.

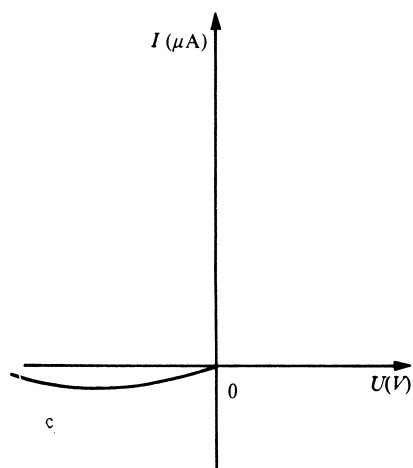
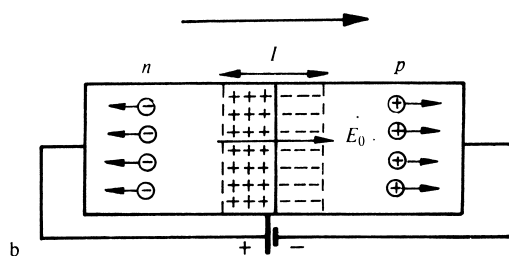
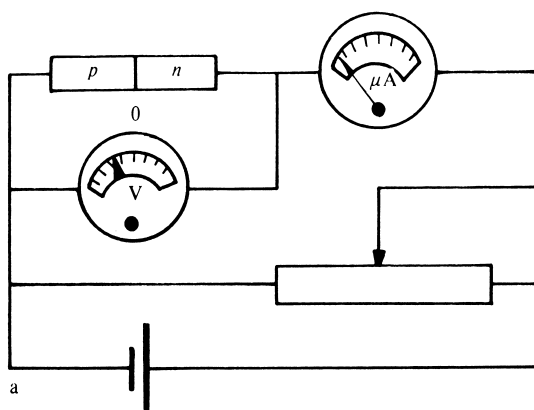


Fig. 6.30

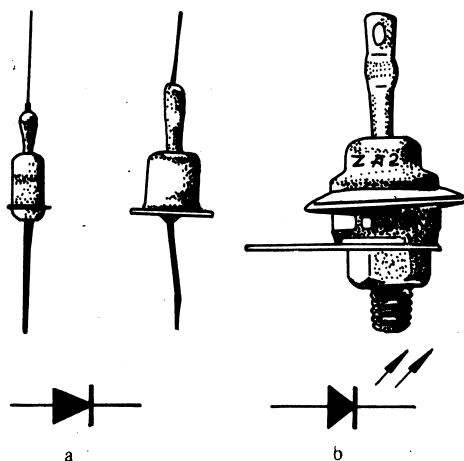


Fig. 6.31

TRABAJO DE LABORATORIO 6 Conducción unidireccional del diodo

Instrumentos y materiales: tablero universal de montaje, conjunto de semiconductores, multímetro, cables de conexión, fuentes de CD.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito como el que se muestra en la figura 6.32.

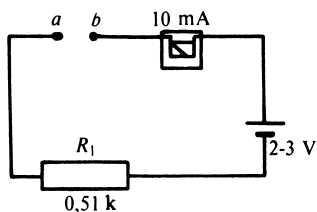


Fig. 6.32

La resistencia R_1 se ha colocado para limitar el valor de la corriente, cuando el diodo esté conectado en el sentido de paso. Esta medida de precaución, que tiene por objetivo evitar el deterioro del diodo, debes tenerla siempre en cuenta. El valor de la tensión de la fuente debe ser de 2 a 3 V.

2. Comprueba la conducción unidireccional de los diodos de silicio (Si) y germanio (Ge). Determina en cada caso la posición de los semiconductores de tipo n y de tipo p .
3. Procede de forma similar con el diodo emisor de luz (LED). ¿Qué condiciones deben darse para que el LED emita luz?

4. Tarea experimental

Si cuentas con un diodo, un condensador, un multímetro, una resistencia de $0,5\ \Omega$ y una fuente de CD, planifica un experimento con el cual puedas mostrar la existencia real, en el diodo, de la barrera de potencial.

Las ventajas de los diodos semiconductores radican en sus pequeñas dimensiones y masas, su largo tiempo de explotación, alta resistencia mecánica y gran coeficiente de rendimiento. La principal desventaja consiste en que sus parámetros dependen grandemente de la temperatura. La temperatura mínima de trabajo es de aproximadamente $-70\ ^\circ\text{C}$, y la máxima de 80 y $125\ ^\circ\text{C}$, para diodos de germanio y silicio respectivamente.

6.6 Aplicaciones de los semiconductores

El transistor

Resulta cotidiano, en diversas ramas de la ciencia, la técnica moderna, la industria, la vida práctica y otros muchos campos del quehacer diario, encontrarnos multitud de equipos e instrumentos cuyo funcionamiento se basa en la utilización de circuitos eléctricos y electrónicos, en la composición de los cuales se encuentren diversos tipos de transistores.

El transistor o triodo semiconductor fue inventado en el año 1948. Por su modo de fabricación no se distingue grandemente del diodo semiconductor. En él se utilizan, como principio de funcionamiento, las propiedades de la juntura $p-n$.

Para la fabricación de un transistor se toma un monocristal de germanio con conductividad electrónica y, por cada uno de sus extremos, se le introducen impurezas, por ejemplo, de átomos de indio.

En estas condiciones, dos regiones del monocristal se tornan semiconductores con conductividad por huecos. En sus regiones de contacto con el cristal primario aparecen dos junturas $p-n$.

La región media del cristal se denomina base, y las regiones extremas del semiconductor, emisor y colector respectivamente (fig. 6.33a). En la figura 6.33b se muestra la representación convencional de un transistor.

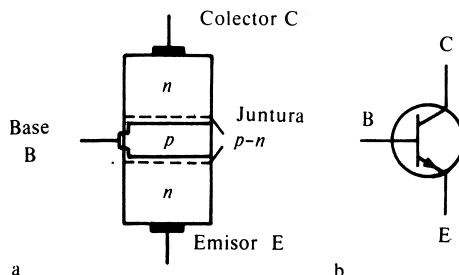


Fig. 6.33

Los transistores así formados pueden ser de dos tipos, en dependencia del tipo de conductividad que posean la base (parte central), y el emisor y el colector (extremos).

Si la base del transistor posee conductividad electrónica, y el emisor y el colector conductividad por huecos, esto se denomina transistor $p-n-p$ (fig. 6.34a).

Si, por el contrario, la base tiene conductividad por huecos, y el emisor y el colector, conductividad electrónica, entonces el transistor se denomina $n-p-n$ (fig. 6.34 b).

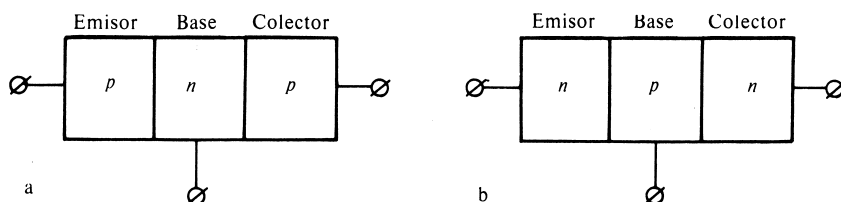


Fig. 6.34

Analicemos el proceso de funcionamiento de un transistor, pongamos por caso, de tipo $n-p-n$ (podríamos utilizar uno $p-n-p$, pues los mecanismos de conducción en ellos son similares).

En la figura 6.35a se muestra un esquema del montaje que emplearemos. La resistencia R_1 la utilizaremos para limitar el valor de la corriente base-emisor, la R_2 controlará el circuito colector-emisor. Así evitaremos el posible deterioro del transistor. En la figura 6.35b se muestra la modelación del proceso de la conducción para el montaje seleccionado

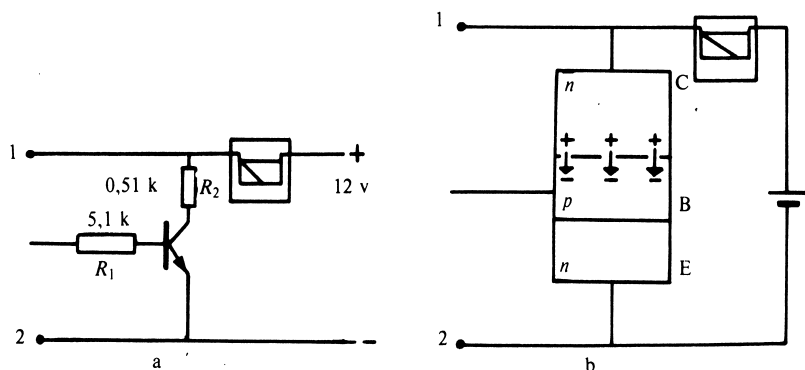


Fig. 6.35

Por la forma en que están conectados el emisor y el colector en la fuente, la unión colector-base se comporta como un diodo conectado en el sentido de paso. Observa que en la unión colector-base la barrera de potencial está fortalecida y, por no existir portadores en la base que con-

tribuyan a la conducción en esta zona, el transistor está bloqueado para la conducción colector-emisor.

Si conectamos la base con el punto 1 del circuito, es decir, lo hacemos positiva, entonces la corriente comienza a circular a través de la unión base-emisor. Los electrones mayoritarios en el emisor se difunden a través de dicha unión, parte de ellos circulan por el circuito de base y el resto son inyectados en el colector, acelerados por el campo barrera de la unión colector-emisor. El tránsito continuo de portadores del emisor al colector determina una corriente a través del transistor, la cual se detecta con el miliamperímetro.

Si desconectamos la base del punto 1 y la conectamos con el punto 2, es decir, la hacemos negativa, en estas condiciones el emisor no inyecta (emite) electrones hacia la base y no hay circulación de corriente a través del transistor (circuito colector-emisor).

Una conclusión importante a la que podemos arribar es que el transistor conduce por el circuito colector-emisor solo cuando se produce una corriente base-emisor, y ello tiene lugar en los transistores *n-p-n* solo cuando la base se hace positiva con respecto al emisor. Este comportamiento del transistor es consecuencia de la función de control que ejerce la base sobre el circuito colector-emisor, y se le ha dado una gran aplicación, por ejemplo, para controlar la realimentación de los circuitos autosciladores, que estudiaremos más adelante.

Otro resultado importante, que le confiere a los transistores un gran valor, es la función de amplificación. Si en el circuito representado en la figura 6.35a, medimos la corriente de base y la comparamos con el valor de la corriente que circula por el circuito colector-emisor, comprobaremos que pequeñas corrientes de base provocan corrientes de valor muchas veces mayor en el circuito colector-emisor,

Esta propiedad del transistor se utiliza para amplificar corrientes pequeñas como, por ejemplo, las que se producen en un micrófono. Estudiaremos experimentalmente un modelo sencillo de amplificador que nos permitirá comprender esta función del transistor.

TRABAJO DE LABORATORIO 7 El transistor como amplificador de corriente

Instrumentos y materiales: tablero universal para el montaje de circuitos eléctricos y electrónicos, conjunto de semiconductores, modelo de micrófono dinámico (elaborado por el CIR-MINED), fuente de CD, multímetro.

Indicaciones para el trabajo

1. Conecta el micrófono dinámico con las tomas del multímetro, cuyo rango de medición debe ser el de mayor sensibilidad (0 a 0,3 V). Ha-

bla frente al micrófono. Observa las indicaciones del multímetro mientras estás hablando. ¿Cuál es el valor máximo de corriente indicada por el multímetro?

2. Monta un circuito como el representado en la figura 6.36.

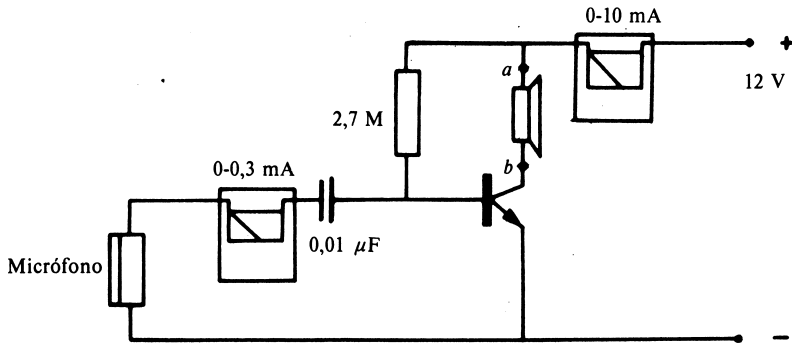


Fig. 6.36

Observa la posición del multímetro. El rango de medición de este debe ser de 0 a 10 V. Entre los puntos a y b se deben conectar los audífonos.

3. Habla frente al micrófono. Un compañero, desde el puesto de trabajo, debe escuchar a través de los audífonos. Observa las indicaciones del multímetro. ¿Cuál es el máximo valor de variación en la corriente que indica el instrumento de medición? ¿En cuántas veces es amplificada la corriente inducida por la base del transistor?

Con un osciloscopio se puede comprobar el efecto de amplificación del circuito que se muestra en la figura 6.36. En este proceso la forma de la variación de la corriente se conserva, solo se amplifica su valor.

Existen otros tipos de transistores en los que la función de control, en vez de efectuarse mediante una corriente que se hace circular por el circuito de base, se realiza iluminándolo con luz visible. En este caso se encuentran los fototransistores.

En la práctica, los transistores han desplazado a las válvulas electrónicas en los equipos e instrumentos científicos, industriales y domésticos. Radios, televisores, amplificadores, grabadoras, muchos equipos que te son familiares en la vida diaria utilizan en sus circuitos eléctricos multitud de transistores.

Las ventajas de los transistores, al igual que los diodos semiconductores, son su bajo consumo de energía eléctrica, dimensiones y masas pequeñas, y utilización de bajos voltajes de trabajo, en comparación con las válvulas electrónicas (fig. 6.37a).

En el actual período de desarrollo de la revolución científico-técnica, se diseñan circuitos electrónicos semiconductores, llamados circuitos integrados (CI) o comúnmente, “pastillas” (*chips*) (figura 6.37b), que son capaces de sustituir cientos, miles, y hasta cientos de miles de transistores, resistencias, condensadores y diodos. En la actualidad, su principal utilización se halla en la construcción de relojes digitales, calculadoras electrónicas, microcomputadoras, computadoras, en los complejos circuitos electrónicos de naves y satélites espaciales, etc. (fig. 6.37c).

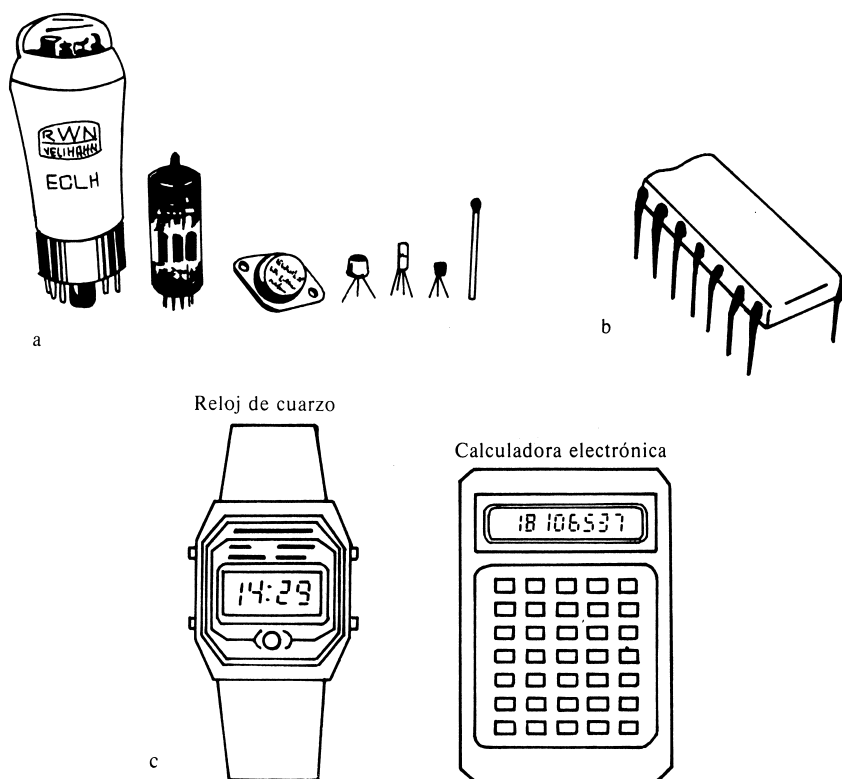


Fig. 6.37

Sus desventajas son la alta sensibilidad con el aumento de la temperatura, las sobrecargas eléctricas y las radiaciones.

El termistor

La experiencia demuestra que la resistencia eléctrica de los materiales semiconductores disminuye con el aumento de la temperatura. Esta propiedad se utiliza en la construcción de dispositivos semiconductores

denominados termistores. Insertados en un circuito, se utilizan como medidores de temperatura (sensores o sondas térmicas). Para ello, el termorresistor se coloca en el lugar donde es necesario medir la temperatura, conectando sus extremos a una fuente de corriente. Midiendo la intensidad de la corriente que circula por el circuito y la tensión en el termistor se puede determinar su resistencia mediante curvas graduadas o la lectura de instrumentos especiales (fig. 6.38).

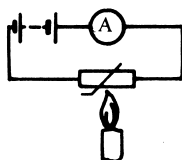


Fig. 6.38

El rango de medición de la temperatura, en la gran generalidad de los termistores, se encuentra entre los 170 y 570 K. No obstante, en la actualidad se han diseñado termistores para medir tanto grandes temperaturas, del orden de los 1 300 K, como pequeñas temperaturas en el rango de 4 a 80 K.

El fotorresistor

Como su nombre lo indica, es un dispositivo cuyo principio de funcionamiento se basa en la propiedad que tienen los materiales semiconductores de variar su resistencia eléctrica bajo la acción de la luz.

Los fotorresistores se utilizan en distintos dispositivos automáticos. En la figura 6.39 se ilustra el principio de su funcionamiento. En ausencia de luz el amperímetro no señala prácticamente circulación de corriente por el circuito. Al exponer al fotorresistor a la acción de un flujo luminoso, se detecta en el amperímetro el paso de una corriente eléctrica.

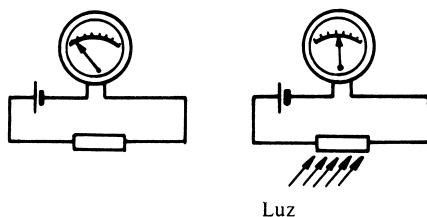


Fig. 6.39

La celda fotoeléctrica

Basado en el principio de que los materiales semiconductores tienen la propiedad de variar su resistencia eléctrica con el incremento de la luz

incidente, se construyen otros dispositivos semiconductores que son capaces de comportarse como fuentes de energía eléctrica. Uno de los más difundidos y conocidos en la técnica y la vida cotidiana es la celda fotoeléctrica. Este es un dispositivo semiconductor que es capaz de transformar las radiaciones luminosas en energía eléctrica.

Una celda fotoeléctrica es, a grandes rasgos, una juntura $p-n$. La luz, al incidir sobre ella, es capaz de generar electrones y huecos, que se mueven bajo la acción de un campo eléctrico (fig. 6.40).

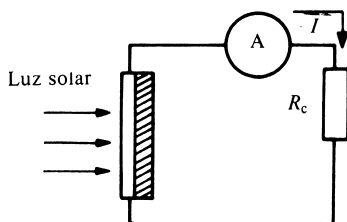


Fig. 6.40

La corriente así producida puede hacer funcionar un radio, abrir una puerta, incluso proveer la energía necesaria para hacer funcionar determinados dispositivos electrónicos a bordo de un satélite artificial de la Tierra.

Los paneles exteriores que forman parte de estos satélites, o de las naves espaciales, están revestidos con celdas fotoeléctricas que convierten la energía que reciben del Sol en energía eléctrica, para alimentar los distintos dispositivos eléctricos y electrónicos que trabajan en la nave.

Capítulo 7

CAMPO MAGNÉTICO

7.1 *El campo magnético. Antecedentes y aplicaciones prácticas*

Desde que Hans Christian Oersted descubrió experimentalmente la estrecha relación que existe entre la corriente eléctrica y el campo magnético, la humanidad ha recorrido un fructífero camino en las investigaciones y las aplicaciones, tanto en la ciencia y la técnica como en la vida, de los fenómenos electromagnéticos.

Los experimentos realizados a partir del descubrimiento de Oersted, demuestran que las propiedades del entorno que rodea a los distintos conductores por los que circula la corriente eléctrica, se modifica. Es el campo magnético el causante de este hecho, y el encargado de transmitir las interacciones que se producen entre los conductores con corriente.

En secundaria básica estudiaste también que alrededor de un imán existe un campo magnético, y que la Tierra se comporta como un gigantesco imán cuyo campo magnético, aunque débil, tiene una gran importancia para la orientación durante los viajes aéreos, marítimos y terrestres.

También sabes que para descubrir la presencia e investigar algunas de las propiedades del campo magnético se utiliza una aguja magnética. Con ella analizaste cualitativamente las características del campo magnético de distintos componentes de un circuito: un conductor rectilíneo, una espira y un solenoide.

Conociste también, y en este grado lo has confirmado, que sobre las partículas eléctricas en movimiento, a través de cualquier medio conductor y en presencia de un campo magnético, actúan fuerzas que las desvían de su trayectoria inicial y que, en muchos casos, provocan cambios en el estado de los conductores por los que circulan.

Sobre este fenómeno se sustentan los métodos modernos para la detección y estudio del campo magnético, y constituye la base sobre la que se apoya el desarrollo impetuoso de gran parte de la tecnología más contemporánea. La obtención de energía en grandes cantidades, de forma económica y fácil de controlar y distribuir, se ha logrado mediante los generadores electromagnéticos de energía eléctrica.

El formidable desarrollo industrial se sustenta en las máquinas, y en estas el motor eléctrico hace la función del corazón impulsor que les da movimiento convirtiéndolas en fuentes productoras de todo tipo de

artículos y bienes de consumo. No existe una rama industrial ni tecnológica en la que la presencia del campo magnético y su influencia sobre la sustancia no sea imprescindible.

En la propagación masiva de las manifestaciones artísticas, culturales, de recreación e informativas, han desempeñado una extraordinaria función las caseteras magnetofónicas y videocaseteras, que emplean cintas magnéticas para su funcionamiento. Los discos duros y disquetes flexibles constituyen las actuales bases de memoria de las computadoras y microcomputadoras. Estas, en combinación con el motor eléctrico, constituyen el cerebro y la fuerza motriz de la nueva generación de máquinas robotizadas, que paulatinamente irán liberando al hombre del trabajo pesado, a la vez que lo hace más eficiente y productivo (fig. 7.1).

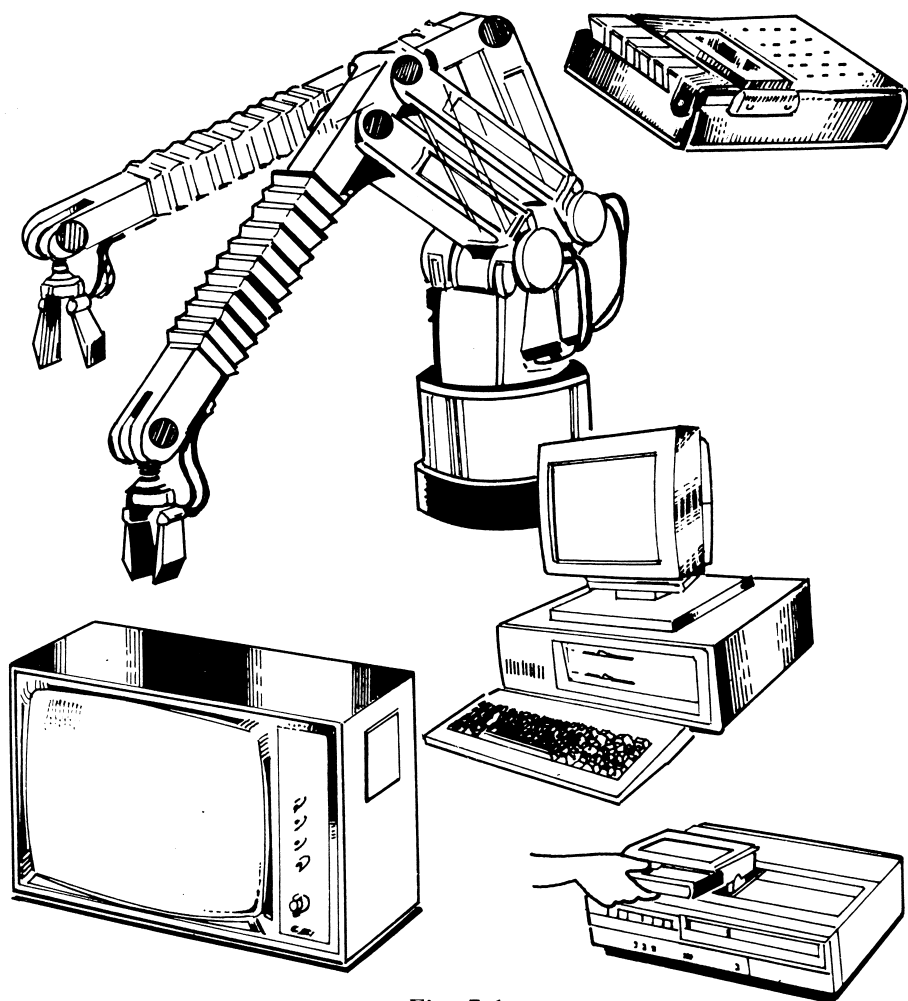


Fig. 7.1

7.2 Interacción de conductores con corriente y el campo magnético

La existencia objetiva del campo magnético se evidencia por los efectos que produce en los cuerpos que se someten a su acción.

De secundaria básica conoces que cuando por dos conductores paralelos y próximos se hace circular corriente eléctrica, ellos interactúan. No resulta difícil comprobar que las fuerzas que se manifiestan en ellos son de naturaleza distinta a la electrostática y, por supuesto, diferente a la gravitatoria.

Por ejemplo, cuando se colocan dos conductores paralelos separados una distancia d , como se muestra en la figura 7.2a, no se manifiestan, en forma evidente, ni la fuerza de atracción gravitatoria que se produce entre ellos, ni la fuerza de atracción electrostática que actúa cuando los conductores se conectan a las tomas de una fuente de corriente, manteniendo el interruptor K abierto.

De este experimento se deduce que cualquier efecto que se produzca en dichos conductores, no es el resultado de la acción del campo gravitatorio ni del eléctrico, pues los efectos de ambos, en este caso, son muy débiles.

Sin embargo, al cerrar el interruptor, en cuanto circula la corriente por los conductores estos se deforman, alejándose uno del otro, si las corrientes en ellos tienen sentidos opuestos (fig. 7.2b), y acercándose cuando son del mismo sentido (fig. 7.2c).

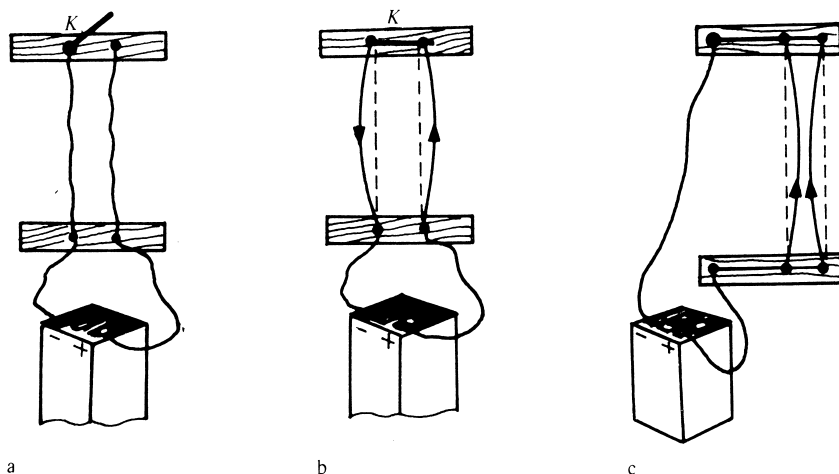


Fig. 7.2

Un efecto similar se produce cuando se hace circular corriente por un conductor que se ha colocado entre las ramas de un imán de herradura.

En este caso, el conductor muestra que sobre él actúa una fuerza cuya dirección es paralela a las ramas del imán (fig. 7.3).

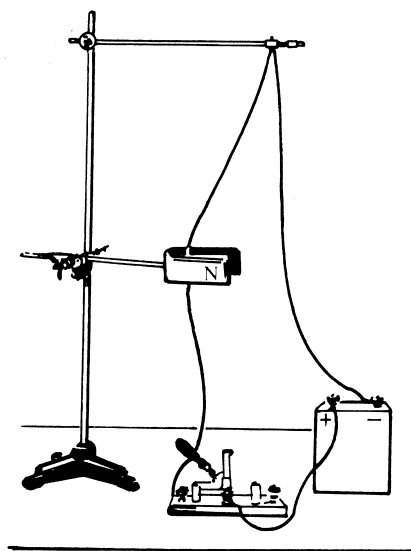


Fig. 7.3

Al estudiar la corriente eléctrica en los tubos de rayos catódicos, comprobamos que un haz de electrones se desvía de su dirección inicial si se le aproxima un imán. Se produce un efecto similar si le acercamos un conductor rectilíneo con corriente (fig. 7.4a), o un enrollado hecho con un largo conductor por el que circula corriente (fig. 7.4b).

Las interacciones analizadas se producen sin el contacto directo de los cuerpos que participan en el fenómeno, de forma similar a como se producen las interacciones eléctricas y gravitatorias, pero mediante un ente material distinto a los campos que las provocan.

Es el campo magnético el causante de las interacciones antes analizadas. Tratemos de explicar estos fenómenos.

Las partículas con carga eléctrica determinan un campo magnético a su alrededor cuando están en movimiento. Si están en reposo, sólo manifiestan un campo eléctrico. El campo magnético de las partículas cargadas en movimiento sólo ejerce su influencia sobre las partículas cargadas del otro conductor cuando estas también se encuentran en movimiento. Si están estáticas, no se produce fuerza magnética sobre ellas. Por esta razón, en los casos de las figuras 7.2b, 7.2c, 7.3 y 7.4 sólo se observa la existencia de las fuerzas cuando circula la corriente por los conductores.

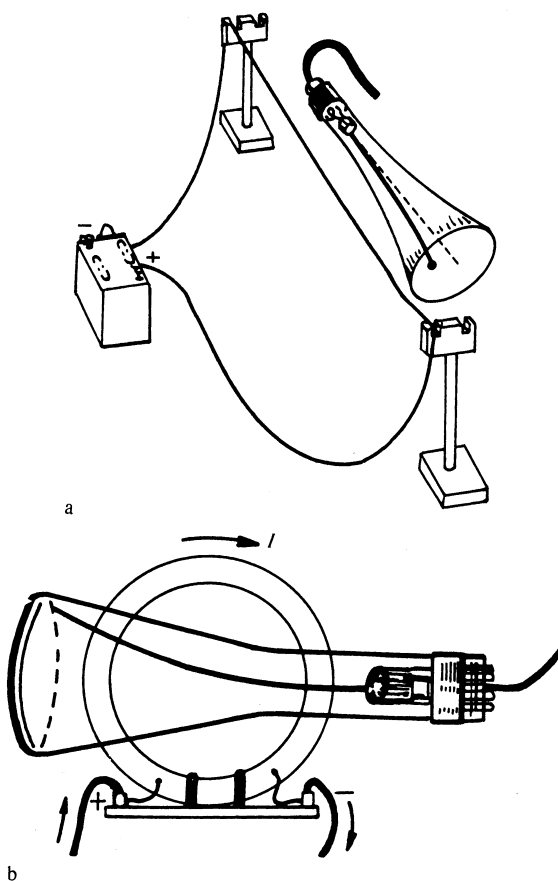


Fig. 7.4

Por otra parte, las partículas cargadas en movimiento del segundo conductor determinan a su vez un campo magnético, que provoca una fuerza sobre el primero. Por esta causa, las acciones en la interacción de los conductores son recíprocas.

Ahora bien, ¿cómo estudiar el campo magnético? ¿Qué magnitud física lo caracteriza? ¿Cómo medirla?

Tareas

1. Justifica con tus palabras por qué los experimentos que se realizan con los montajes que se muestran en las figuras 7.2b y 7.2c, evidencian que la interacción observada de los conductores con corriente no es el resultado de la acción de los campos gravitatorio y eléctrico.
2. ¿Por qué no se produce la interacción de los conductores cuando por uno circula la corriente y por el otro no?

3. ¿Por qué, en el caso de la figura 7.3, sí se produce una fuerza magnética, aún cuando hay un solo conductor con corriente?
4. Explica con tus palabras cómo se produce la interacción de los conductores que se muestran en la figura 7.2 b y c.
5. ¿Por qué el haz de electrones emitidos por el cañón electrónico del tubo de rayos catódicos que se muestra en la figura 7.4, se desvía al colocar en sus proximidades un conductor y un enrollado con corriente?

7.3 Vector inducción magnética

Para estudiar algunas de las propiedades del campo magnético en la secundaria básica empleamos como medios de investigación la aguja magnética y las limaduras de hierro. Mediante ellas pudimos obtener alguna información cualitativa sobre el campo magnético.

Para estudiar el campo eléctrico utilizamos un cuerpo con carga eléctrica que denominamos cuerpo explorador de prueba. Esto nos permitió obtener no sólo información cualitativa sobre el campo eléctrico (su dirección y sentido), sino también el valor de la magnitud que lo caracteriza en cada uno de los puntos del espacio donde exploramos, es decir, el valor de la intensidad del campo eléctrico E . Recuerda que esta magnitud expresa el valor de la fuerza que actúa sobre la unidad de carga, y se calcula mediante la ecuación:

$$E = \frac{F}{q}$$

En el caso del campo magnético emplearemos un método similar, con la diferencia de que en este caso las partículas cargadas exploradoras no pueden estar estáticas, sino en movimiento.

El método consiste en lanzar partículas cargadas, con una velocidad v conocida, en la región del espacio en la que se desea comprobar la existencia del campo magnético. Si sobre las partículas en movimiento actúa una fuerza que las desvía de su trayectoria, ello confirma la presencia del campo magnético.

Con un tubo de rayos catódicos es fácil comprobar este hecho.

Cuando el tubo no está en presencia de un campo magnético, la trayectoria del haz electrónico es rectilínea y los electrones inciden en el centro de la pantalla del tubo, como se indica en la figura 7.5a. Sin embargo, cuando le aproximamos un enrollado con corriente, el haz se desvía y se descubre la existencia del campo del enrollado (fig. 7.5b).

En el experimento antes mencionado, se comprueba que la fuerza que actúa sobre cada partícula cargada, integrante del haz, se manifiesta siempre según una dirección perpendicular a la dirección de la velocidad con que ellas se mueven. Por eso la trayectoria del haz se hace curvilínea.

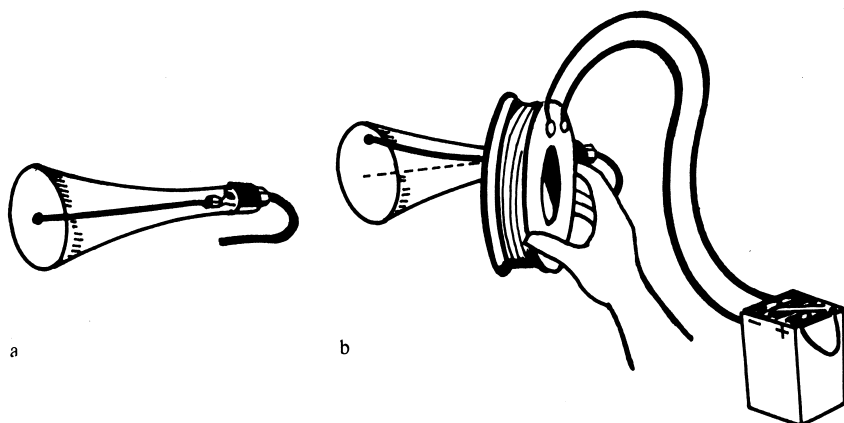


Fig. 7.5

Ahora, el efecto que provoca el campo magnético sobre las partículas cargadas móviles, ¿es el mismo en cada uno de sus puntos?

Explorando las proximidades del enrollado con corriente, comprobaremos que la medida de la desviación que sufren las partículas cargadas en movimiento, en diferentes puntos del campo, es distinta, aunque haya permanecido constante el valor de la velocidad de las partículas. Esto significa que la fuerza magnética que actúa sobre las partículas cargadas depende de la posición en el espacio donde se investiga el campo, y que, como en el caso del campo eléctrico, es necesario contar con una magnitud que permita caracterizarlo.

Esta magnitud física, análoga a la intensidad del campo eléctrico $\vec{E}$, recibe la denominación de vector inducción magnética y se representa por la letra $\vec{B}$.

Por la analogía que existe entre los métodos de exploración de los campos eléctrico y magnético, el vector inducción magnética se calcula mediante la ecuación:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_{\text{máx}}}{q v} \quad (7.1)$$

y expresa el valor de la fuerza que actúa sobre la unidad de carga eléctrica que se mueve con una velocidad unitaria.

La ecuación 7.1 sólo es válida para el caso en que la fuerza magnética toma su valor máximo. Ello ocurre cuando la dirección de la velocidad es perpendicular a la dirección del vector inducción magnética.

La unidad de la inducción magnética, en el S.I., es el tesla (T).¹

¹ En el Sistema Internacional, el tesla se define de la forma siguiente: el tesla es igual a la inducción magnética por la cual a través de una sección transversal de 1 m^2 pasa un flujo magnético de un weber (Wb). El concepto flujo magnético se estudia en el capítulo 8.

La inducción magnética posee el valor de un tesla cuando sobre una partícula con una carga de 1 coulomb, que se mueve con una velocidad de 1 m/s, actúa en una dirección perpendicular a la de la velocidad una fuerza de 1 newton; es decir:

$$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ C} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}.$$

(ten en cuenta que $1 \text{ C/s} = 1 \text{ A}$).

En ocasiones es conveniente utilizar submúltiplos del tesla, por ejemplo, el militesla (mT) o el microtesla (μT):

$$1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$$

$$1 \mu\text{T} = 10^{-6} \text{ T}$$

El valor de la inducción magnética del campo magnético terrestre en el ecuador es de $34 \mu\text{T}$, y en los polos de $66 \mu\text{T}$.

Al igual que la intensidad del campo eléctrico, la inducción magnética posee un manifiesto carácter vectorial. Esto es fácil de comprobar con la ayuda del tubo de rayos catódicos. Si lo colocamos próximo al enrollado con corriente, como se indica en la figura 7.5b, el haz se desvía en sentido contrario al que toma cuando el enrollado se gira 180° (fig. 7.6). Este resultado confirma la existencia de un sentido en el vector inducción magnética.

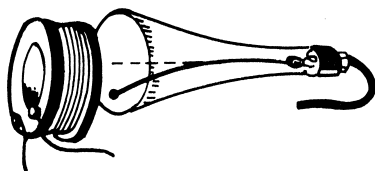


Fig. 7.6

¿Cómo determinar la dirección y el sentido de la inducción magnética?

Si colocamos el tubo de rayos catódicos de forma que el haz electrónico experimente la máxima desviación, y después lo hacemos girar, encontraremos una dirección en la cual las partículas no se desvían y, por tanto, no actúa fuerza alguna sobre las partículas cargadas móviles. Esta dirección es la que se ha adoptado como dirección del vector inducción magnética.

Para determinar su sentido se emplea una regla sencilla, basada en la observación de múltiples fenómenos similares al antes descrito. En esta regla se relacionan las magnitudes involucradas en la ecuación 7.1 con las partes que integran nuestra mano derecha.

Sabemos que la fuerza F_{max} es perpendicular a la velocidad v , y que esta es perpendicular a la dirección de la inducción B . Pues bien, la regla consiste en hacer coincidir la dirección y sentido de la fuerza con el dedo pulgar de la mano derecha. La dirección y sentido de la velocidad, en el caso de las cargas positivas, se hace corresponder con los dedos restantes. Al rotar estos últimos 90° , quedarán indicando la dirección y sentido del vector inducción magnética $\vec{B}$ (fig. 7.7a).

Si las partículas poseen carga negativa, la regla se aplicará de la misma forma, considerándolos como si sus cargas fuesen positivas, pero moviéndose en sentido contrario (fig. 7.7b). Es decir, se mantiene la misma consideración que la adoptada al definir al sentido convencional de la corriente.

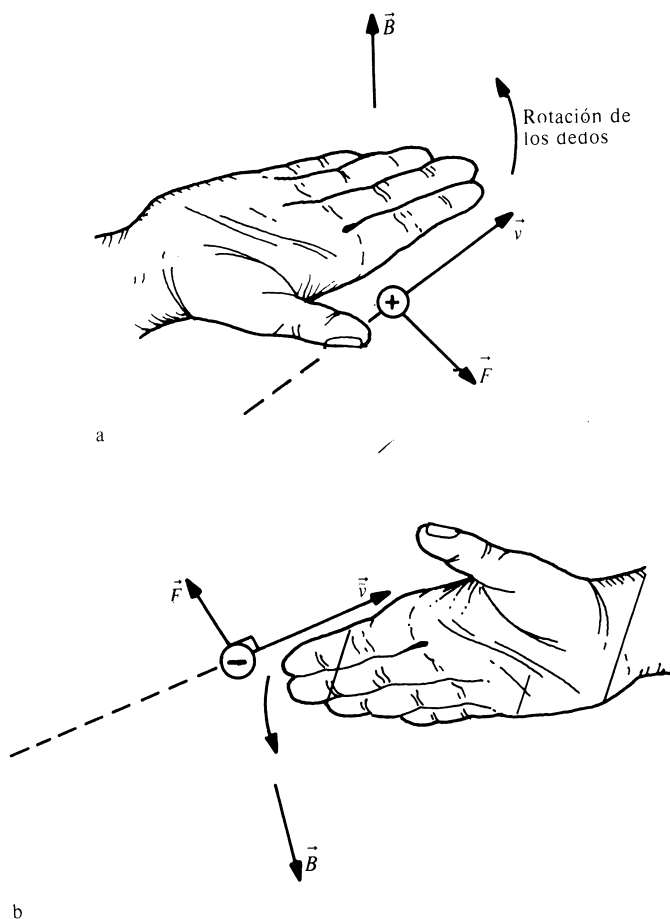


Fig. 7.7

¿Cómo medir el valor de la inducción magnética en forma directa?

El empleo del tubo de rayos catódicos en la detección y determinación de la dirección y sentido de la inducción magnética, así como en la medición indirecta de la fuerza que permite calcular el valor de B a partir de la ecuación 7.1, es posible pero poco práctico. No obstante, existen sondas exploradoras y medidoras de la inducción magnética que se basan en el mismo principio, pero que utilizan efectos de la fuerza magnética que pueden ser medidos directamente.

Las sondas de efecto Hall son las más prácticas, pues en un volumen reducido permiten caracterizar el vector B , tanto cualitativa como cuantitativamente.

En una zona de un campo magnético cuya dirección y sentido son los mostrados en la figura 7.8, se coloca una pastilla semiconductora, por ejemplo de tipo p , por la que se hace circular una corriente constante de valor I , de forma que permanezca constante la velocidad de los portadores. El campo magnético actúa sobre las partículas con una fuerza F transversal, cuyo sentido podemos determinarlo con la regla de la mano derecha. Esta fuerza provoca el desplazamiento lateral de las partículas y, en consecuencia, el surgimiento de una tensión con una polaridad como la señalada en la figura, y un valor que depende del valor de B .

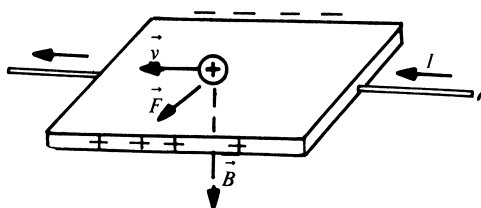


Fig. 7.8

A partir de las mediciones de la tensión con un instrumento apropiado, con una escala graduada previamente en unidades de inducción magnética, se determinan con precisión las características de B en cada uno de los puntos del campo magnético investigado.

Existen otros tipos de sondas con funcionamientos basados en efectos del campo magnético, que permiten realizar el estudio del campo de manera similar a la utilizada con las sondas Hall. En la figura 7.9 se muestra la forma en que se determina la dirección y sentido del vector inducción magnética con una de dichas sondas.

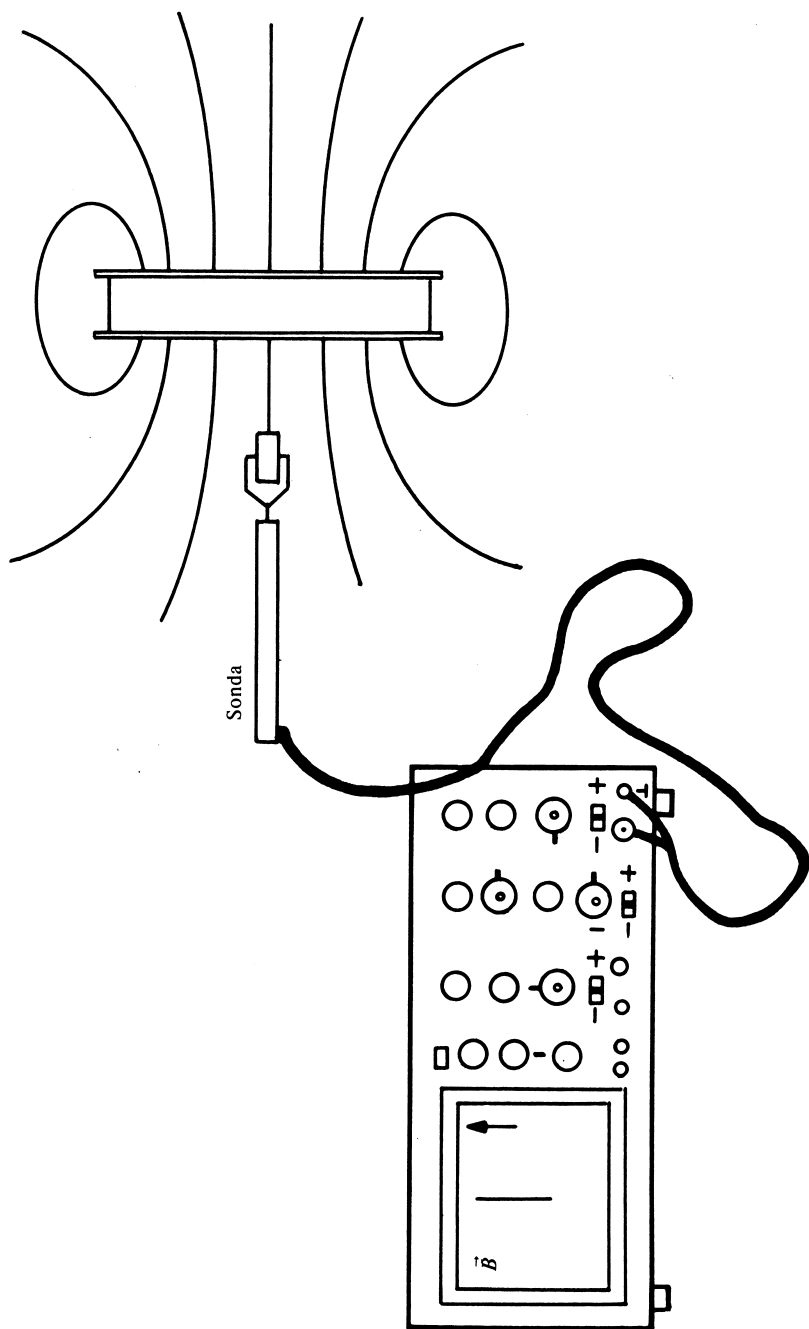


Fig. 7.9

Problema resuelto

1. Al colocar una pastilla semiconductora de tipo p en un campo magnético, la polaridad de la tensión Hall es la que se indica en la figura 7.10. Determina el sentido de la inducción magnética.

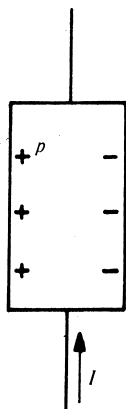


Fig. 7.10

Solución

Del hecho de que la tensión Hall tenga la polaridad que se indica en la figura, y por ser el semiconductor de tipo p , concluimos que el sentido de la fuerza magnética es de derecha a izquierda. Esta fuerza se manifiesta en dirección perpendicular a la de la velocidad de las partículas (huecos) que, por poseer cargas positivas, tienen un sentido que coincide con el de la corriente.

Conociendo la dirección y sentido de la velocidad de las partículas y de la fuerza magnética, entonces, mediante el empleo de la regla de la mano derecha, resulta fácil determinar la dirección y sentido de la inducción magnética. Al aplicar la regla, se determina que las líneas de inducción son perpendiculares al plano del papel, y su sentido es entrando en este (fig. 7.11).

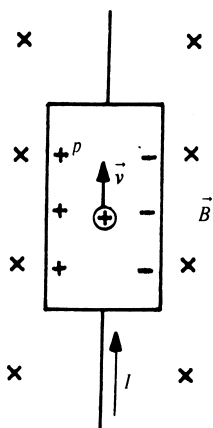


Fig. 7.11

Tareas

6. ¿Cómo detectar la presencia del campo magnético?
7. ¿Qué criterio se ha adoptado para obtener la dirección del campo magnético?
8. Describe con tus palabras la forma en que se utiliza la regla de la mano derecha para obtener el sentido de la inducción magnética.
9. ¿Cuál magnitud física es la que caracteriza al campo magnético?
10. Plantea la ecuación que permite calcular el valor de la inducción magnética, y la relación que existe entre las direcciones de las magnitudes que en ella aparecen.
11. Define la unidad de la inducción magnética en el S.I.
12. ¿Qué dificultades se confrontan al tratar de medir en forma indirecta, mediante la ecuación 7.1, el valor de la inducción magnética?
13. ¿Cómo medir en forma directa la inducción magnética en una zona del espacio? ¿Cuál es la base de funcionamiento del equipo que se emplea para ello?

7.4 Líneas de inducción

Para describir el campo magnético en una región determinada, es necesario conocer las características del vector inducción magnética en cada punto de dicha región. Existe otra forma más sencilla que las estudiadas hasta ahora de lograr una descripción del comportamiento de la inducción magnética. Consiste en emplear un método similar al utilizado durante el estudio del campo eléctrico: el trazado de las líneas de fuerza. El procedimiento que seguiremos por analogía, se basa en trazar por cada punto del espacio una curva cuya tangente coincida con la dirección del vector inducción magnética, y con el mismo sentido de esta magnitud, todo lo cual se puede determinar previamente con la ayuda de una sonda magnética. A estas curvas se les llama líneas de inducción magnética (fig. 7.12a).

Conociendo la forma en que están distribuidas las líneas de inducción representativas de un campo magnético, es fácil establecer, por ejemplo, que en el punto A de esta figura el vector inducción magnética tiene la dirección y sentido indicados. Por otra parte, la densidad de las líneas, es decir, el número de éstas que atraviesan la unidad de superficie, expresa la medida del valor de la inducción magnética. Así, en la zona 1 en la figura 7.12b la inducción magnética posee mayor valor que en la zona 2.

Si se espolvorean limaduras de hierro sobre una lámina de cartón, plástico o acetato, se obtiene la representación de los espectros magnéticos del circuito o conductor analizado. En la figura 7.13 se muestran los espectros de un conductor rectilíneo, una espira y un solenoide.

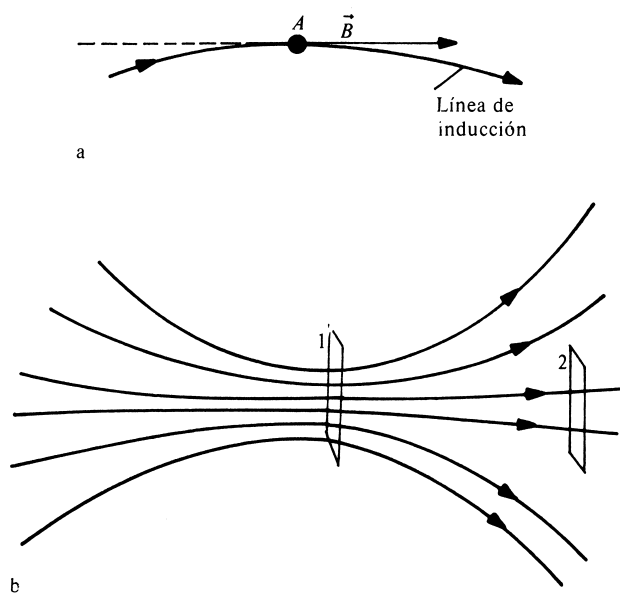


Fig. 7.12

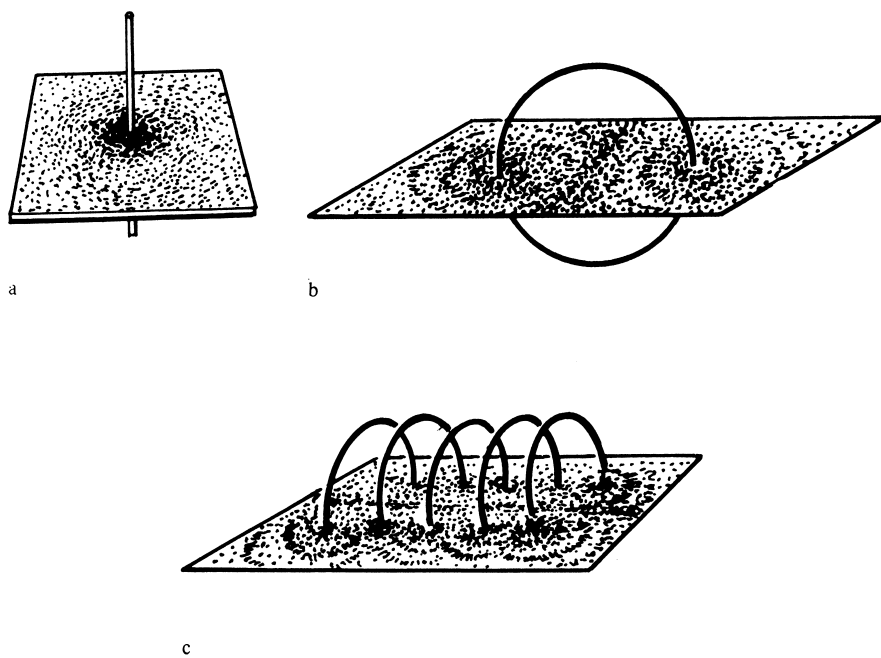


Fig. 7.13

La forma en que se distribuyen las limaduras nos da una “visión” de cómo lo hacen las líneas de inducción. En las figuras 7.14 se muestran las correspondientes distribuciones de las líneas de inducción del conductor, la espira y el solenoide vistos anteriormente.

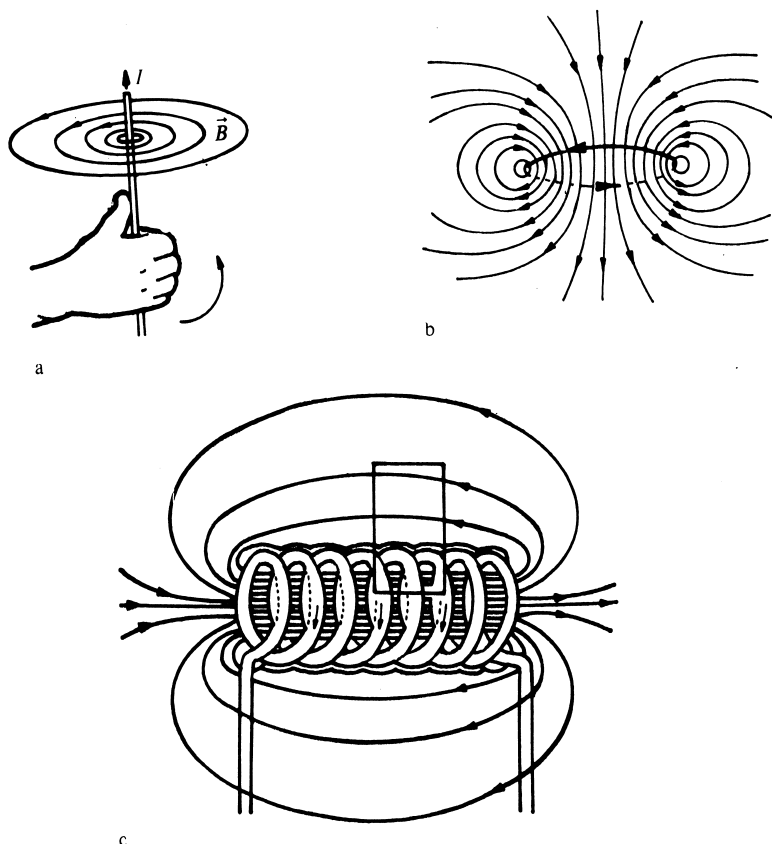


Fig. 7.14

El sentido de las líneas se determina con la ayuda de una sonda magnética, o mediante una regla sencilla que ya conoces de secundaria básica y que es aplicable a cualquier tipo de circuito. Consiste en tomar el conductor de forma que el dedo pulgar quede indicando el sentido convencional de la corriente; los restantes dedos, al girarlos, indicarán el sentido de las líneas de inducción (fig. 7.14a). Comprueba que esto es cierto para cada uno de los casos representados.

Las líneas de inducción magnética tienen propiedades diferentes a las líneas de fuerza del campo eléctrico. Estas últimas, como ya vimos en el capítulo 4, siempre surgen o salen de las cargas positivas, y terminan o llegan a las cargas negativas.

Las líneas de inducción magnética, por el contrario, son curvas continuas que se cierran sobre sí mismas. Este hecho revela una propiedad muy importante del campo magnético: *no existen las cargas magnéticas*.

La ausencia de una carga elemental como fuente del campo magnético, constituye una diferencia esencial con el campo eléctrico, y una confirmación de la estrecha relación que existe entre el campo magnético y las partículas cargadas en movimiento.

Otra propiedad importante del campo magnético que se relaciona con el carácter vectorial de la inducción magnética, es que cuando se investiga una región del espacio ubicada en las proximidades de dos conductores con corriente, por ejemplo dos bobinas, la inducción resultante se obtiene mediante un proceso de aditividad geométrica propio de las magnitudes vectoriales.

Observemos la figura 7.15a. Si se hace circular la corriente primero por la bobina 1 y después por la 2, con la sonda magnética se comprueba que la dirección y el sentido de la inducción magnética de cada bobina ($\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$), en el punto P , es el que se indica en la figura. Cuando la corriente circula simultáneamente por ambas bobinas, el sentido y la dirección de la inducción resultante $\vec{B}_R$ se obtiene mediante la suma geométrica de los vectores $\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$ (método del polígono) (fig. 7.15b), o sea:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

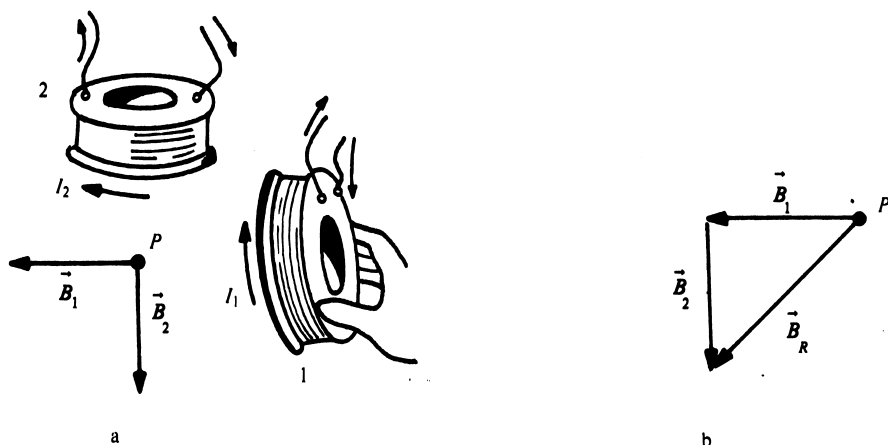


Fig. 7.15

Tareas

- Define con tus palabras el concepto "línea de inducción magnética".
- En la figura 7.16 se representan dos líneas de inducción. Traza la dirección y el sentido del vector inducción magnética en los puntos que se han señalado con números.

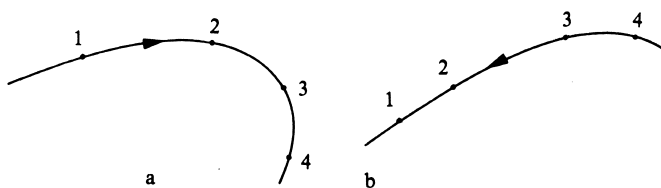


Fig. 7.16

16. En la figura 7.17 se muestra el esquema de un conductor por el que circula corriente de intensidad I , con un sentido que sale del plano del papel. Traza las líneas de inducción que pasan por los puntos A , B , C y D . Representa, en cada uno de ellos, la dirección y sentido del vector inducción magnética.

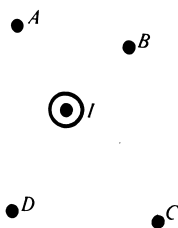


Fig. 7.17

17. ¿Qué diferencias existen entre las líneas de fuerza del campo eléctrico y las líneas de inducción del campo magnético?
18. En la figura 7.18 se muestran dos conductores que llevan corrientes de sentidos opuestos. Representa, en los puntos A , B y C , los vectores inducción magnética de cada uno de los conductores. ¿Cómo se determina la inducción resultante en cada uno de esos puntos?

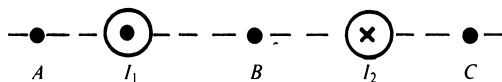


Fig. 7.18

7.5 Campo magnético de un conductor rectilíneo, una espira y un solenoide

Analizaremos sólo aquellos casos cuyos espectros magnéticos ya conocemos. Por ejemplo, el de un conductor rectilíneo de gran longitud, el de una espira y el de un solenoide. En estos ejemplos conocemos cómo

determinar el sentido de las líneas de inducción y la forma en que se distribuyen sus espectros magnéticos.

Campo de un conductor rectilíneo

Si colocamos un conductor rectilíneo con corriente en posición vertical y exploramos con una sonda magnética su entorno, comprobaremos que al desplazarla según una trayectoria circular a una misma distancia r del conductor, la sonda indica que la dirección de la inducción es tangente a una circunferencia de radio r , y que el valor de B es el mismo en cada uno de los puntos de esta circunferencia (fig. 7.19).

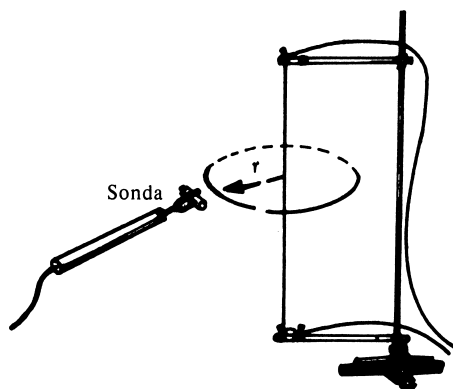


Fig. 7.19

Si movemos la sonda a lo largo de una dirección radial, manteniendo constante el valor de la corriente, comprobaremos que el valor de B disminuye a medida que nos alejamos del conductor.

Si la sonda se mantiene fija al variar la intensidad de la corriente, el valor de la inducción magnética varía en la misma proporción en que lo hace I .

En un conductor rectilíneo el valor de la inducción magnética es proporcional al valor de la intensidad de la corriente, e inversamente proporcional a la distancia r que separa al conductor del punto donde se mide.

Con la sonda se comprueba, además, que el campo magnético solo se manifiesta cuando circula la corriente por el conductor. Esto es una confirmación de que son los portadores de carga en movimiento, a lo largo del conductor, los que determinan la manifestación del campo magnético en su entorno.

El campo magnético de un conductor es el resultado de la superposición del campo de cada una de las cargas en movimiento. El valor de la inducción magnética provocada por una carga eléctrica móvil, en un punto situado a una distancia r según una dirección perpendicular a su trayectoria, depende del valor de la carga de la partícula, de su velocidad y de r . En este caso, las líneas de inducción se distribuyen alrededor de ella de forma similar a las del campo del conductor rectilíneo (fig. 7.20).

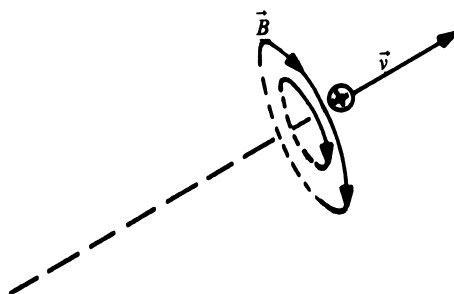


Fig. 7.20

Campo de una espira

Si flexionamos un conductor rectilíneo hasta formar un anillo (o espira) y por él hacemos circular corriente, el campo magnético resultante, aunque en sus proximidades es parecido al del conductor rectilíneo (fig. 7.13b), es sensiblemente diferente en otros puntos.

El valor de la inducción magnética de una espira depende del punto en que se mida, y puede resultar muy complejo calcularlo.

Sin embargo, con la sonda se comprueba que al igual que en el conductor rectilíneo el valor de B depende proporcionalmente de la intensidad de la corriente. En la parte central de la espira, B depende en relación inversa del radio. Si el radio es reducido, el campo puede ser muy intenso y la distribución de sus líneas de inducción es similar a la de un imán recto: la zona por donde salen las líneas de inducción en la espira se comporta como el polo norte de un imán, y por donde entran, como uno sur (fig. 7.21).

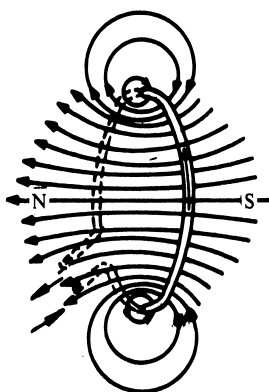


Fig. 7.21

Campo de un solenoide

Un solenoide es una capa de alambre enrollado en forma de hélice cilíndrica (aunque no imprescindiblemente circular), de manera que su longitud sera mucho mayor que el diámetro de su sección transversal.

El solenoide tiene una gran importancia porque en gran parte de su interior el campo es uniforme. Es decir, el valor de B permanece constante al pasar de un punto a otro.

Con la sonda magnética se puede comprobar que las líneas de inducción en un solenoide se distribuyen de la forma que se indica en la figura 7.14c. Observa que el campo es prácticamente uniforme en la parte central y se deforma en los extremos. Mientras más largo sea el solenoide, mayor extensión tendrá la zona donde el campo es uniforme.

La inducción magnética en el interior del solenoide es el resultado de la superposición de los campos de las espiras que lo integran.

Una bobina resulta de enrollar varias capas de alambre, una sobre otra. El campo magnético de ésta, en cuanto a la forma de su espectro magnético, es similar al del solenoide.

TRABAJO DE LABORATORIO 8 Estudio del campo magnético de una bobina

Instrumentos y materiales: sonda magnética, una bobina cuyo número de espiras se pueda modificar, un multímetro, una fuente de CD, un juego de conductores y piezas para soportar la bobina.

Indicaciones para el trabajo

1. Planifica los experimentos que debes realizar para determinar los factores de los que depende el valor de la inducción magnética en la parte central de la bobina.
2. Con ayuda de tu profesor, comprueba experimentalmente las hipótesis formuladas por ti.
3. Elabora en tu libreta un breve resumen de los resultados.

En el caso particular del solenoide, el valor de la inducción magnética en su parte central se calcula mediante la ecuación:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L} \quad (7.2)$$

donde N , es el número de espiras del solenoide, l su longitud y μ_0 una constante cuyo valor es $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$.

Para obtener un campo magnético uniforme que ocupe una región extensa del espacio, se emplea un conjunto formado por dos bobinas de

gran radio (fig. 7.22). La induccion magnética entre las bobinas es prácticamente constante, es decir, independiente de la posición entre ellas. Este conjunto recibe el nombre de bobinas de Helmholtz.

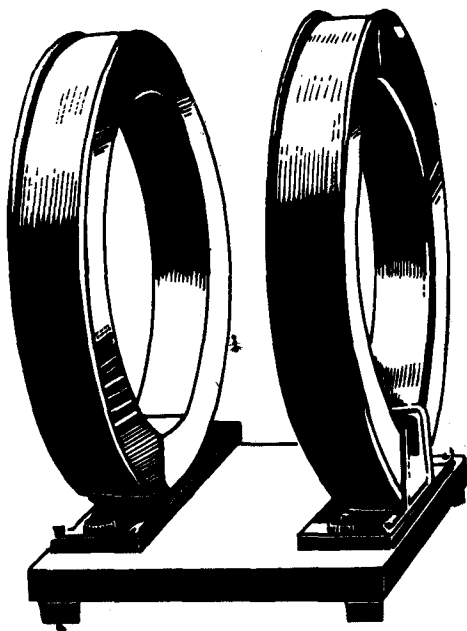


Fig. 7.22

Problema resuelto

1. En la figura 7.23a se muestra un esquema de dos bobinas de Helmholtz conectadas en serie. Representa las líneas de inducción de este conjunto si la corriente en las bobinas tiene el sentido que se indica en la figura.

Solución

Conociendo el sentido de la corriente en cada bobina, es fácil determinar el sentido de las líneas de inducción. Al aplicar la regla de la mano derecha en cada bobina, se determina que en ellas las líneas de inducción tienen el mismo sentido. Por ello el campo resultante del sistema adopta la forma que se indica en la figura 7.23b.

Una característica del campo magnético resultante de esta asociación de dos bobinas es que, en la zona comprendida entre ellas, el campo es homogéneo, es decir, la inducción magnética posee el mismo valor en cada uno de los puntos de dicha zona.

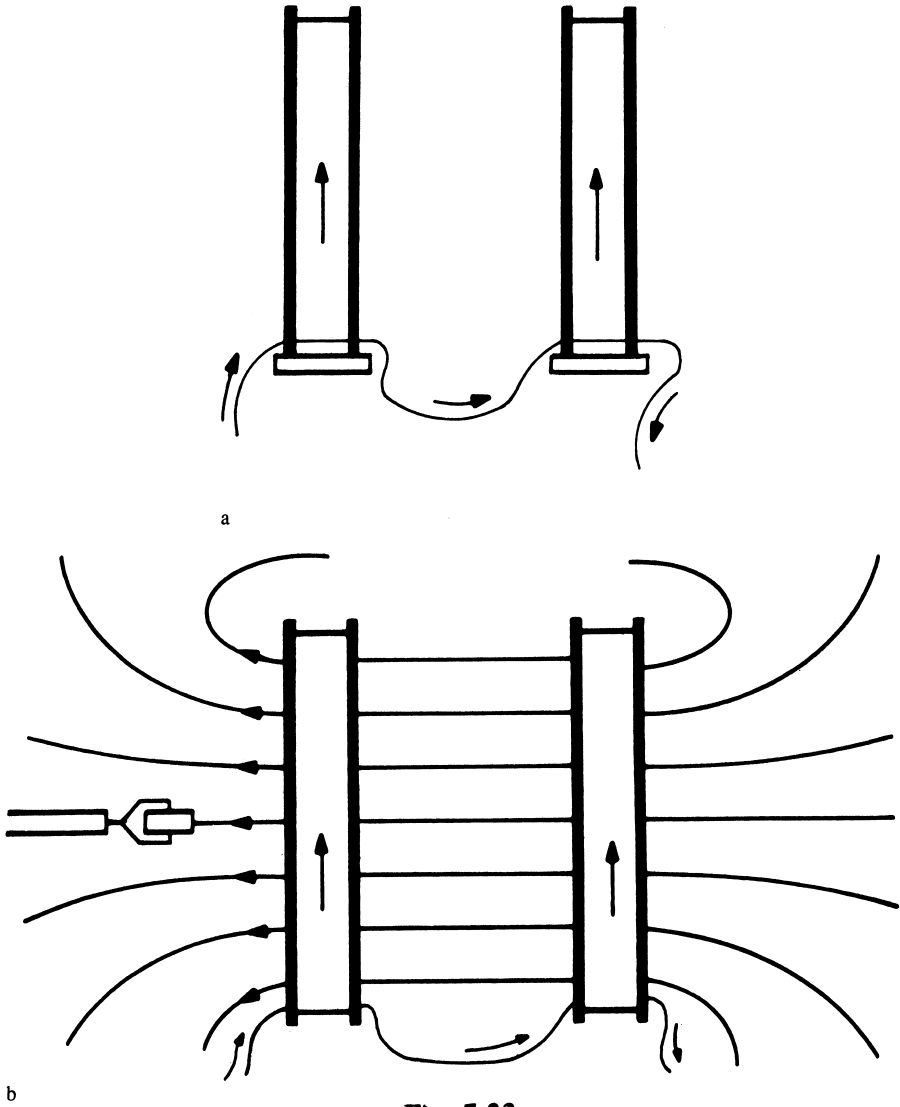


Fig. 7.23

Tareas

19. ¿De qué factores depende el valor de la inducción magnética en un conductor rectilíneo, una espira y un solenoide?
20. Representa las líneas de inducción de una carga positiva que se mueve con una velocidad v , según una dirección sur-norte y hacia el norte.

21. Representa el espectro de las líneas de inducción de un pequeño anillo con corriente. Sobre la base del esquema trazado, justifica por qué se le puede considerar como un pequeño imán (dipolo magnético).
22. Representa el espectro de las líneas de inducción de un solenoide. Sobre la base de ese esquema argumenta en qué zona el campo se puede considerar uniforme.

7.6 Fuerzas que actúan sobre una carga eléctrica móvil. Fuerza de Lorentz

Sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo eléctrico o magnético, pueden actuar fuerzas eléctricas y magnéticas. En el caso en que la partícula atraviese un campo electromagnético, la fuerza resultante que actúa sobre la partícula se determina mediante la ecuación:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_e + \vec{F}_m \quad (7.3)$$

Esta fuerza recibe el nombre de *fuerza de Lorentz*.

Analicemos cada uno de los factores que integran la ecuación 7.3.

El valor de la fuerza $\vec{F}_e$ provocada por el campo eléctrico, se calcula mediante el producto:

$$F_e = E \cdot q$$

donde E es el valor de la intensidad del campo eléctrico y q el valor de la carga de la partícula.

De la ecuación 7.1 se deduce que el valor de la fuerza magnética, F_m , para el caso en que la dirección de la velocidad con que se mueve la partícula es perpendicular a la línea de inducción, se calcula mediante la expresión:

$$F_m = q \ v \ B \quad (7.4)$$

Con un tubo de Braun (fig. 7.24) se comprueba la existencia de ambas fuerzas, cuando un haz de partículas cargadas (electrones) se mueve a través del campo eléctrico del sistema de placas AB y del campo magnético de un imán.

El valor de la fuerza resultante, según la ecuación 7.3, quedará:

$$F_L = E \ q + q \ v \ B \quad (7.5)$$

Estudiaremos con más detalle las características de la fuerza magnética. Sabemos que ella toma el valor señalado en la ecuación 7.4 sólo cuando la dirección de v es perpendicular a las líneas de inducción de B . Sin embargo, en el caso en que la dirección de v es colineal con la de las líneas de inducción, la fuerza magnética es nula. Cuando la partícula se mueve de forma que la dirección de la velocidad forma un ángulo θ

con la dirección de $\vec{B}$, entonces el valor de la fuerza magnética depende del valor de la componente de la velocidad que es perpendicular a $\vec{B}$. En la figura 7.25, esta componente la representamos por el símbolo $v_{\perp}$, y como $v_{\parallel}$ a la componente paralela.

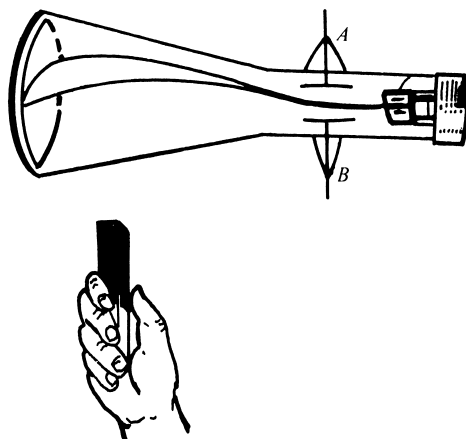


Fig. 7.24

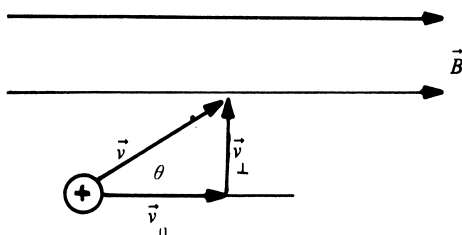


Fig. 7.25

El valor de $v_{\perp}$ no es más que la proyección de $\vec{v}$ sobre un eje perpendicular a las líneas de $\vec{B}$, y se calcula mediante la ecuación:

$$v_{\perp} = v \sin \theta$$

Entonces, la ecuación para calcular el valor de la fuerza magnética que actúa sobre la partícula en movimiento adopta la forma:

$$F_m = q v B \sin \theta \quad (7.6)$$

donde el ángulo θ se mide desde $\vec{v}$ hacia $\vec{B}$, por el menor ángulo.

A la fuerza magnética se le conoce con el nombre de componente magnética de la fuerza de Lorentz. El sentido de la fuerza magnética se determina mediante la utilización de la regla de la mano derecha.

Para las cargas positivas, esta regla se aplica de la manera siguiente: se coloca la mano derecha con los dedos, excepto el pulgar, dirigidos en el sentido de la velocidad de la partícula, de forma que al rotar 90° deben quedar indicando el sentido de $\vec{B}$. En estas condiciones el dedo pulgar indicará el sentido de la fuerza magnética (fig. 7.26).

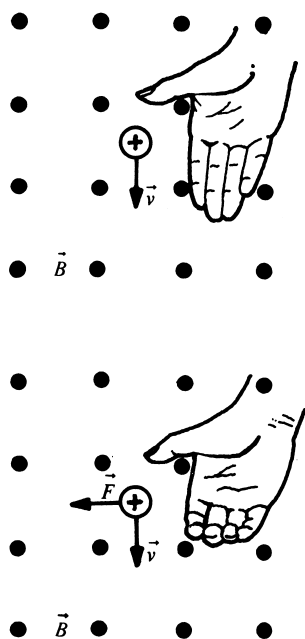


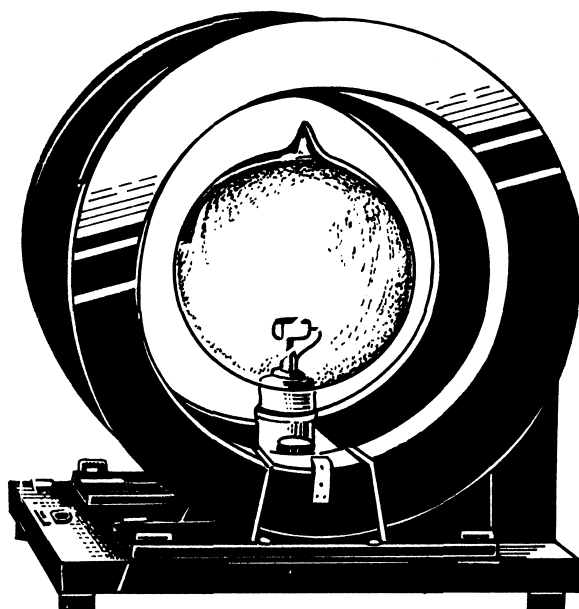
Fig. 7.26

Si la carga de la partícula es negativa, se procediera de manera similar, pero en este caso los dedos se colocarían en sentido contrario al del movimiento de la partícula cargada.

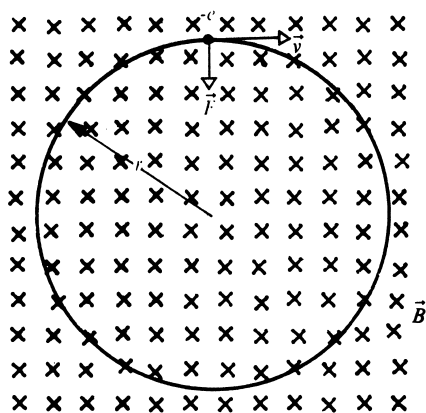
Comprueba que el sentido de las fuerzas que provocan las desviaciones del haz de electrones, en la figura 7.4, es correcto en cada caso.

Como la dirección de la fuerza magnética es perpendicular a la dirección de la velocidad, no modifica su valor sino su dirección.

Analicemos el comportamiento de un haz de electrones que se lanza, mediante el cañón electrónico de un tubo de rayos catódicos, en el interior del campo magnético de una pareja de bobinas de Helmholtz (fig. 7.27a). En la figura 7.27b se muestra un esquema en el que se han indicado, con cruces, las líneas de inducción del campo magnético uniforme de las bobinas. Las líneas de inducción forman un ángulo de 90° con la dirección de la velocidad $\vec{v}$.



a



b

Fig. 7.27

La fuerza que actúa sobre los electrones en movimiento, que es perpendicular a la velocidad, hace la función de fuerza centrípeta $\vec{F}_c$, por lo que el haz electrónico describe una trayectoria circular de radio r .

Determinemos de qué factores depende el radio r . De acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$F_c = ma_c$$

donde m es la masa del electrón y a_c la aceleración centrípeta. Como la fuerza centrípeta es determinada por la fuerza magnética, entonces:

$$qvB \sin \theta = ma_c$$

pero $\theta = 90^\circ$ y $a_c = \frac{v^2}{r}$. Por lo tanto:

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (7.7)$$

De esta ecuación se deduce que el radio de la trayectoria de los electrones depende de sus características específicas (valor de su carga eléctrica y su masa), de la velocidad con que se mueven y del valor de la inducción magnética B .

En la ecuación 7.7 se sustenta el funcionamiento de los denominados espectrógrafos de masa, que permiten determinar la masa de los iones de cualquier sustancia al lanzarlos, con una velocidad v , a través de un campo magnético de inducción B conocida. En la figura 7.28 se muestra un esquema simplificado de un espectrógrafo de masa. Los iones se aceleran en la zona A . Bajo la acción de la fuerza de Lorentz describen una semicircunferencia y se proyectan sobre una placa fotográfica en la que dejan huellas. Midiendo el radio de la semicircunferencia se determina la masa del ion.

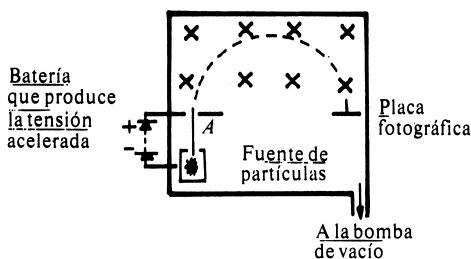


Fig. 7.28

Problemas resueltos

1. Calcula el valor de la fuerza que actúa sobre un electrón que se mueve con una velocidad de 13 600 km/s y penetra por el punto A de un campo magnético uniforme, cuya inducción magnética es de 0,85 T. La dirección y sentido de la velocidad del electrón se indican en la figura 7.29. Representa la trayectoria que describe el electrón. Calcula el valor del radio de curvatura de dicha trayectoria.

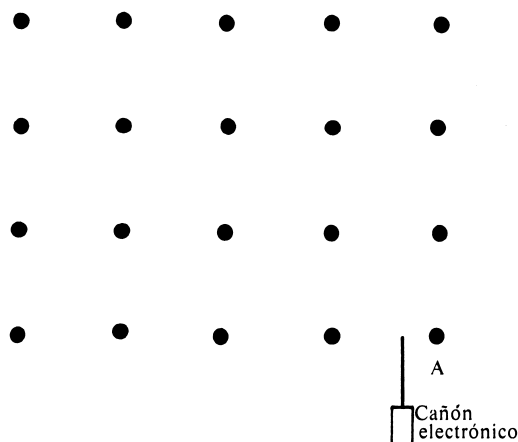


Fig. 7.29

Solución

Datos:

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$B = 0,85 \text{ T}$$

$$v = 13\,600 \text{ km/s}$$

Puesto que la partícula se mueve según una dirección perpendicular a las líneas de inducción, al penetrar en la región donde existe el campo magnético se manifiesta la fuerza magnética en dirección perpendicular a la de la velocidad v . Esta dirección se determina mediante la regla de la mano derecha. En la figura 7.30 se muestra el sentido de esta fuerza.

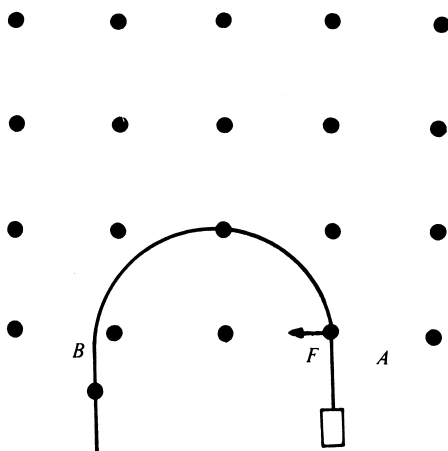


Fig. 7.30

Movido por la acción de esta fuerza magnética, el electrón describe una trayectoria curvilínea que se corresponde con una semicircunferencia. Al llegar al punto B , escapa del campo y se mantiene, por inercia, moviéndose rectilíneamente.

La causa de la variación de la trayectoria del electrón es la fuerza de Lorentz:

$$F = Eq + q \ v \ B \ \text{sen } \theta$$

que, por existir solo el campo magnético y ser $\theta = 90^\circ$, adopta la forma:

$$F = q \ v \ B$$

Sustituyendo los valores de q , v y B , resulta:

$$F = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 13\ 600 \cdot 10^3 \text{ m/s} \cdot 0,85 \frac{\text{N}}{\text{A m}}$$

$$F = 1,6 \text{ C} \cdot 13\ 600 \cdot 10^{-18} \text{ m/s} \cdot 85 \frac{\text{N}}{\text{A m}}$$

$$F = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

Para calcular el radio de la trayectoria, se debe seguir un procedimiento similar al expuesto en este epígrafe, en el que se consideró que la fuerza magnética hace la función de fuerza centripeta, y mediante el cual se llega a la expresión:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Si se sustituyen los valores de m , q , v y B , se obtiene que:

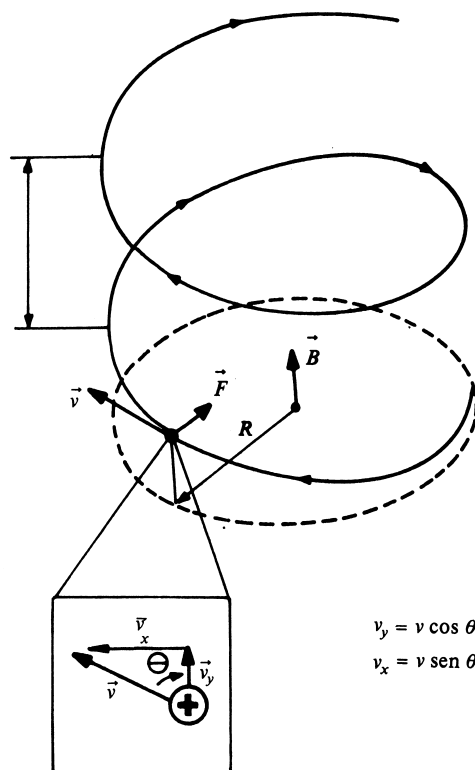
$$r = 9,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

2. Una partícula con carga $+q$ y masa m , es lanzada en el interior de un campo magnético uniforme de valor B , con una velocidad $\vec{v}$. El vector velocidad inicial de la partícula forma un ángulo θ con el vector $\vec{B}$. La trayectoria de la partícula tiene forma de una hélice (fig. 7.31). ¿Cuál es el radio de la hélice? ¿Cuánto avanza la partícula cada vez que completa una vuelta completa?



Solución

La velocidad $\vec{v}$ de la partícula puede considerarse constituida por sus componentes v_x y v_y . La componente v_x es perpendicular a las líneas de inducción, su proyección es $v_x = v \text{ sen } \theta$, y es la que determina que sobre la partícula actúe una fuerza magnética. La otra componente, v_y , cuya proyección es $v_y = v \text{ cos } \theta$ es colineal con las líneas de inducción y es la que determina que la partícula avance según esta dirección. Esta componente no contribuye a la manifestación de la fuerza de Lorentz.



$$v_y = v \cos \theta$$

$$v_x = v \sin \theta$$

Fig. 7.31

Como consecuencia de la fuerza magnética, cuyo valor se calcula mediante la expresión $F = q v B \sin \theta$, la partícula adquiere un movimiento circular uniforme con una velocidad tangencial v_x . El radio de la circunferencia que la partícula describe, teniendo en cuenta las mismas consideraciones que las asumidas en el ejemplo anterior, se calcula mediante la fórmula:

$$r = \frac{m v \sin \theta}{q B} \quad (1)$$

Para determinar el avance (y) de la partícula en la dirección y aplicaremos la ecuación del movimiento rectilíneo uniforme, pues en esta dirección el movimiento es por inercia (a esta distancia se le denomina paso de rosca de la hélice).

$$y = v_y t \quad (2)$$

donde t es el tiempo que requiere la partícula en dar una vuelta completa, es decir, en recorrer el perímetro de la circunferencia con la velocidad v_x .

Este intervalo lo podemos calcular considerando que v , es la velocidad media con que la partícula recorre una distancia igual al perímetro de la circunferencia, o sea:

$$t = \frac{2\pi R}{v} \quad (3)$$

Si sustituimos (1) y (3) en (2), resulta:

$$y = v \cos \theta \cdot 2\pi \frac{m v \sin \theta}{q B} \cdot \frac{1}{v \sin \theta}$$

$$y = 2\pi \frac{m}{q B} v \cos \theta$$

Tareas

23. Plantea la ecuación de la fuerza de Lorentz. Explica el significado físico de cada uno de sus componentes.
24. ¿Cómo se utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido de la fuerza magnética que actúa sobre una partícula, con carga positiva, en movimiento?
25. Representa el sentido de la fuerza en cada uno de los casos que se muestran en la figura 7.32.

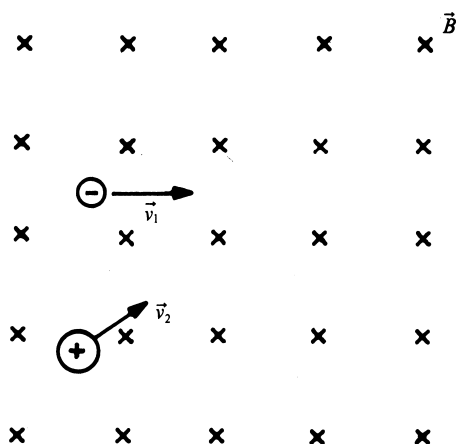


Fig. 7.32

26. En la figura 7.33 se representa, en los puntos A y B , cañones electrónicos (CE) que disparan electrones con una velocidad v . Traza la trayectoria aproximada que sigue el haz de electrones. En cada caso, el campo representado es extenso y de gran intensidad.

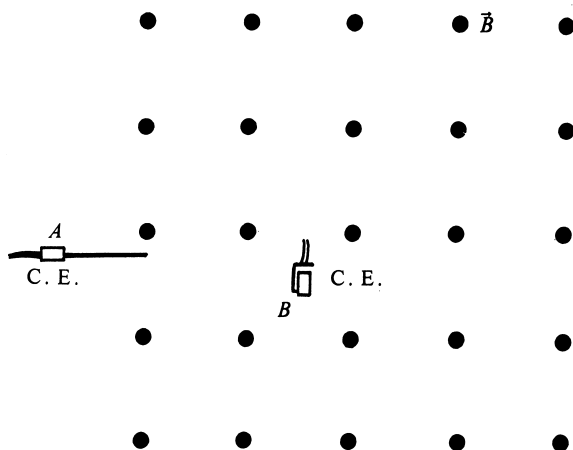


Fig. 7.33

7.7 Fuerza de Ampère

Las fuerzas que se manifiestan durante la interacción de los conductores con corriente, o de estos con los imanes (como en los casos representados en las figuras 7.2b, 7.2c y 7.3), son el resultado, sobre los conductores en su conjunto, de las fuerzas de Lorentz que actúan sobre cada uno de los portadores de carga que circulan por ellos.

Analicemos cómo calcular el valor de la fuerza que aparece sobre un largo conductor de longitud l , por el que circula una corriente de valor I y que se encuentra situado en una región del espacio donde existe un campo cuya inducción magnética tiene un valor B .

La fuerza que se manifiesta en el conductor es la resultante, la suma geométrica, de las fuerzas de Lorentz que actúan sobre cada uno de los portadores, es decir:

$$F = F_{m_1} + F_{m_2} + \dots + F_{m_N}$$

donde N es el número total de portadores de carga en movimiento. Entonces:

$$F = N q v B \sin \theta \quad (7.8)$$

donde v es la velocidad media del movimiento ordenado de los portadores.

El número total de portadores de carga en movimiento es igual a la densidad de portadores, n , por el volumen V del conductor, o sea:

$$N = nV \quad (7.9)$$

pero:

$$V = lS \quad (7.10)$$

donde S es el área de la sección del conductor.

Si se sustituyen 7.9 y 7.10 en 7.8, resulta:

$$F = n l S' q v B \sin \theta$$

Pero:

$$I = n q v S$$

y entonces:

$$F = I l B \sin \theta \quad (7.11)$$

La ecuación 7.11 establece que la fuerza que actúa sobre un conductor es proporcional a la longitud l de la porción del conductor comprendida en el interior del campo, al valor de la inducción magnética B , al valor de la corriente y al seno del ángulo θ formado entre las líneas de inducción y la dirección de la corriente.

A la fuerza expresada en la ecuación 7.11 se le conoce como *fuerza de Ampère*, ya que el físico francés Ampere fue el primero en investigar la interacción de los conductores con corriente.

El sentido de la fuerza de Ampere se determina aplicando la misma regla de la mano derecha que fue usada para la fuerza de Lorentz sobre las partículas positivas en movimiento, considerando el sentido de la corriente como el del movimiento de portadores de cargas positivas.

Con un montaje como el que se muestra en la figura 7.34, se puede comprobar la certeza de la ecuación 7.11.

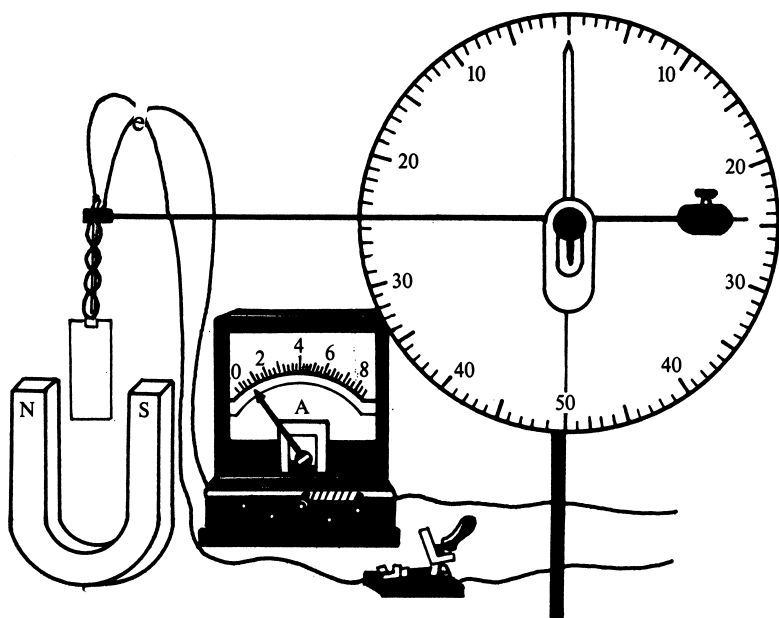


Fig. 7.34

Los motores eléctricos constituyen una de las aplicaciones más conocidas y generalizadas de la fuerza de Ampère. La rotación en ellos se debe a la fuerza que actúa sobre los lados de las espiras del enrollado del motor, cuando por ellas circula la corriente eléctrica (fig. 7.35a). También el funcionamiento del mecanismo de los instrumentos analógicos de medición eléctrica (voltímetros y amperímetros) se basa en la fuerza de Ampère (fig. 7.35b).

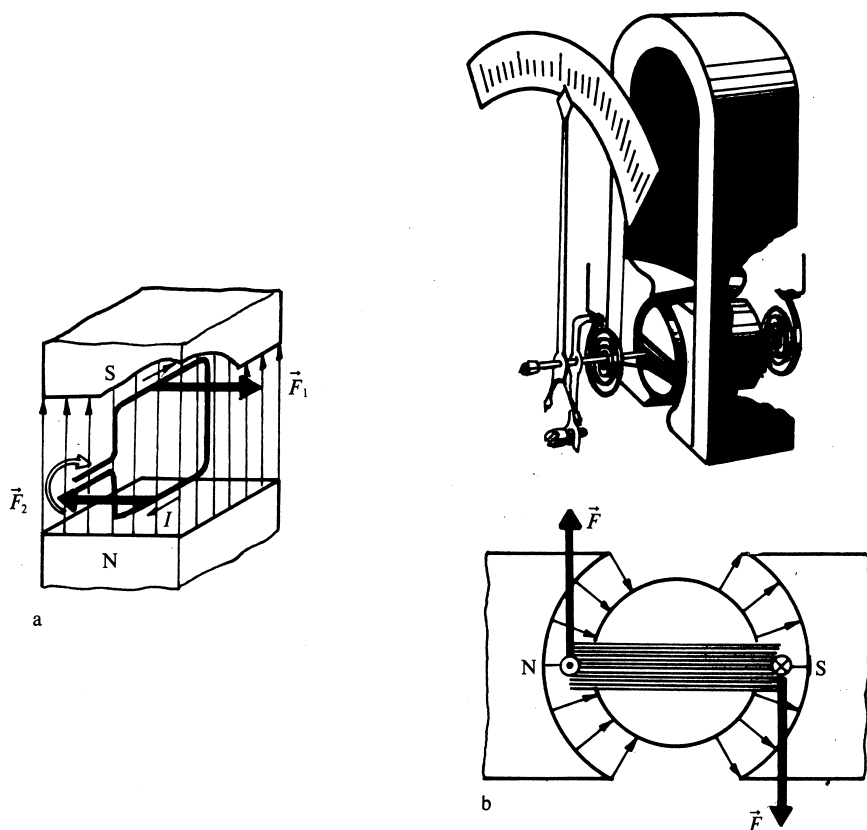


Fig. 7.35

Problema resuelto

1. En la figura 7.36 se muestra un marco rectangular suspendido del brazo de una balanza analítica. Uno de los extremos del marco se encuentra entre los polos de un electroimán que tiene asociado un campo uniforme en la región sombreada. Este campo es prácticamente nulo fuera de ella.

El marco está formado por 15 vueltas de alambre aislado. Una vez que el sistema está equilibrado, se hace pasar una corriente de 0,5 A por el marco. Entonces es necesario colocar en el plato derecho masas, con un valor de 60 g, para equilibrar de nuevo la balanza. ¿Cuál es el sentido y valor de la inducción magnética en la región sombreada?

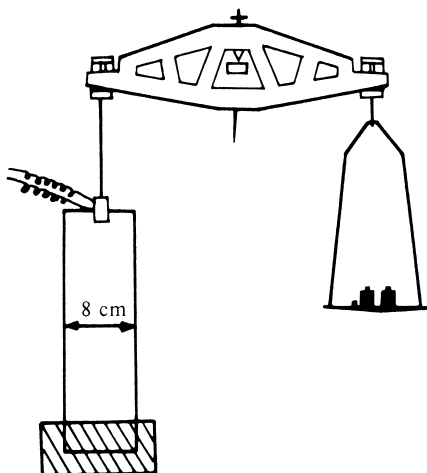


Fig. 7.36

Solución

Datos:

$$N = 15 \text{ espiras}$$

$$I = 0,5 \text{ A}$$

$$m = 60 \text{ g}$$

$$l = 0,08 \text{ m}$$

$$B = ?$$

La fuerza magnética es igual a la fuerza que actúa sobre las masas que equilibran la balanza, o sea:

$$F_m = F_g = mg$$

$$F_m = 0,06 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F_m = 0,6 \text{ N}$$

La fuerza que actúa sobre una de las espiras es:

$$F = IlB$$

Como hay 15 espiras, entonces:

$$F_m = 15 F$$

$$F_m = 15 I l B$$

$$B = \frac{F_m}{15 I l}$$

$$B = \frac{0,6 \text{ N}}{15 \cdot 0,5 \text{ A} \cdot 0,08 \text{ m}}$$

$$B = 1 \text{ T}$$

Tareas

27. Explica, desde el punto de vista microscópico, las causas de la fuerza de Ampère.
28. Plantea la ecuación de la fuerza de Ampère. Explica el significado físico de cada uno de los factores que contempla esta ecuación.
29. ¿Cómo se determina el sentido de la fuerza de Ampère?
30. Determina el sentido de la fuerza de Ampère en cada uno de los casos que se muestran en la figura 7.37.

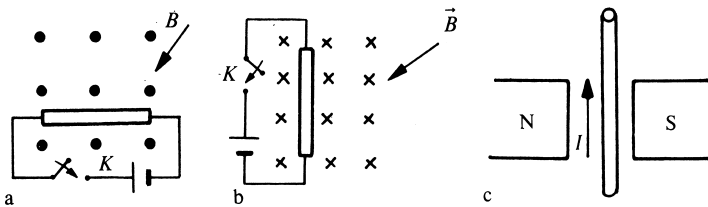


Fig. 7.37

31. Sobre la base de la fuerza de Ampère, demuestra que los movimientos que adquieran los conductores durante las interacciones que se muestran en las figuras 7.2b; 7.3 y 7.4 son correctos.

7.8 Propiedades magnéticas de la sustancia.

Hipótesis de Ampère

Hasta el presente, al estudiar el campo magnético sólo hemos tenido en cuenta las características del circuito al que está vinculado, sin considerar la influencia que puede ejercer el medio circundante, es decir, la

sustancia en la cual se manifiesta el campo (por ejemplo, el aire o cualquier otro cuerpo, como los núcleos de hierro sobre los cuales se montan las bobinas de los motores eléctricos).

Conocemos que en el caso del campo electrostático el medio ejerce una notable influencia sobre el campo resultante en su interior. Analizamos los dieléctricos y la constante dieléctrica que los caracteriza. Recuerda que el campo eléctrico resultante en el interior de un dieléctrico es menos intenso que en el vacío, y que se calcula mediante la ecuación:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

¿Se comportan las distintas sustancias en el caso del campo magnético de la misma forma que los dieléctricos con el campo eléctrico?

Realicemos el siguiente experimento: frente a la abertura de una bobina situemos una sonda magnética, como se muestra en la figura 7.38. Cuando la bobina se conecta con una fuente de CD, con la sonda se detecta la presencia del campo de la bobina. El valor B_0 de la inducción magnética en la zona donde está la sonda se puede valorar cuantitativamente con ella.

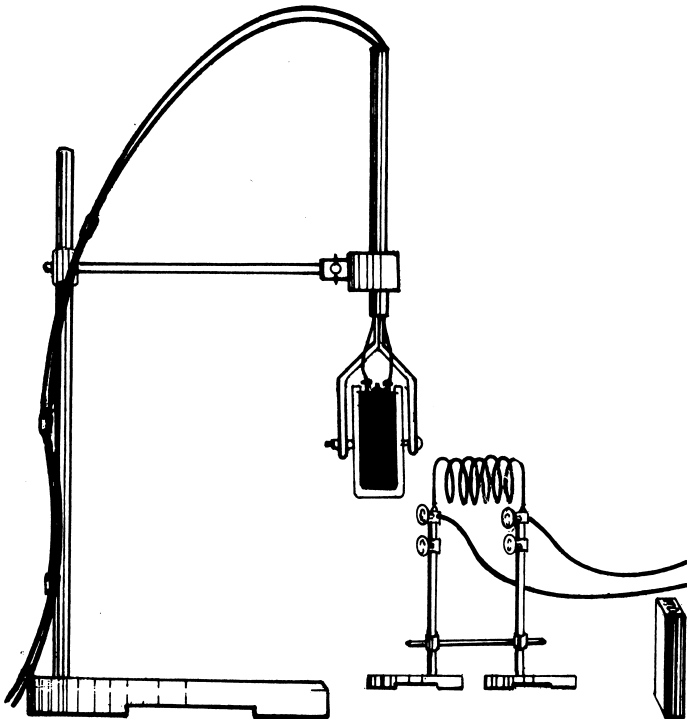


Fig. 7.38

Si introducimos primero en la abertura de la bobina una porción cilíndrica de hierro (núcleo), y después la sustituimos por una de aluminio, comprobaremos que el campo magnético, en el primer caso, se intensifica en forma manifiesta. Sin embargo, en el segundo caso varía muy poco.

¿Cómo interpretar este resultado? La modificación que indica la sonda en el valor de la inducción magnética se debe a que a la inducción de la bobina, B_0 , se le suma geométricamente la inducción debida a la magnetización de la sustancia, B_s . Es decir:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_s \quad (1)$$

El valor de la inducción resultante, B , se puede calcular también mediante la ecuación:

$$B = \mu B_0$$

donde μ es una constante que expresa el grado en que se magnetiza la sustancia analizada y que recibe el nombre de permeabilidad magnética.

La constante μ indica cuántas veces varía la inducción magnética en una región del espacio, al colocar en ella una sustancia determinada.

Introduciendo distintas muestras en la bobina, se comprueba que todas las sustancias se magnetizan en mayor o menor grado.

Las sustancias se clasifican, de acuerdo con el grado y el sentido en que se magnetizan, en tres grupos: diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas.

Las sustancias diamagnéticas se magnetizan débilmente y en sentido contrario a B_0 . En estas, μ resulta ser algo menor que 1. Un ejemplo representativo de paramagnético es el bismuto. Si se introduce una muestra de este material en el interior de una bobina, entonces el campo resultante es algo menor que B_0 .

Los paramagnéticos y los ferromagnéticos se magnetizan en el mismo sentido de B_0 (es decir, B_s es de igual sentido que B_0). Por esta razón, la inducción resultante en estos materiales es mayor que B_0 . En los paramagnéticos es solo algo mayor que B_0 ($\mu \geq 1$); en los ferromagnéticos, es mucho mayor que B_0 ($\mu \gg 1$).

Los materiales ferromagnéticos se utilizan para obtener campos magnéticos intensos. El hierro y los aceros son representativos de este tipo de material, y se utilizan para confeccionar los núcleos de los motores y generadores.

Las causas por las cuales los cuerpos presentan propiedades magnéticas fueron expuestas por Ampère, quien expresó que estas propiedades en cualquier cuerpo están determinadas por pequeñas corrientes microscópicas que circulan en su interior.

Es el movimiento de los electrones en los átomos y moléculas el que determina que ellos se comporten como pequeños dipolos magnéticos.

Ahora, ¿cómo explicar que una porción de hierro, en condiciones normales, no manifieste efecto magnético alguno?, ¿cómo se magnetiza un núcleo de hierro?, ¿por qué existen imanes permanentes?

Centraremos nuestra atención en los materiales ferromagnéticos. Tomemos, por ejemplo, un pedazo de hierro. En él las corrientes electrónicas, mediante la acción de sus propios campos magnéticos, tienden a formar asociaciones o agrupaciones de átomos que se manifiestan como dipolos magnéticos. En condiciones normales, estos dipolos o dominios (que es como se denominan en los ferromagnéticos) se encuentra totalmente desordenados y la inducción magnética resultante es nula (fig. 7.39a). Al colocar la porción de hierro en el interior de un campo magnético débil, algunos de los dipolos tienden a orientarse en el mismo sentido de la inducción $\vec{B}_0$. Si se continúa incrementando el valor de B_0 , entonces se irán orientando cada vez más los dipolos atómicos, hasta que todos queden orientados en la dirección y sentido de B_0 . En estas condiciones se dice que el material se magnetizó a saturación, y la inducción magnética resultante se refuerza con el aporte del campo de los dipolos orientados (fig. 7.39b).

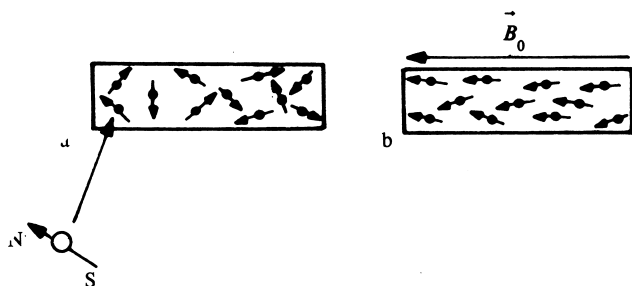


Fig. 7.39

Algunos tipos de materiales ferromagnéticos, al ser extraídos del campo B_0 , se desmagnetizan con rapidez. Sus dipolos se desorientan y no manifiestan efectos magnéticos. Estos ferromagnéticos se denominan blandos, y se utilizan en la confección de los núcleos de los motores y generadores. Un ejemplo representativo es el denominado hierro dulce.

Sin embargo, existen otros materiales ferromagnéticos que, después de ser extraídos del campo inductor o cesar la acción del campo que los magnetiza, conservan cierta magnetización porque sus dipolos atómicos permanecen orientados. Estos ferromagnéticos se denominan duros y se emplean en la confección de imanes permanentes y en la elaboración de cintas magnetofónicas, de video y discos de computadoras con memoria magnética. Un ejemplo de ellos son las denominadas ferritas.

Tareas generales del capítulo

1. Determina la dirección y el sentido de la inducción magnética en los campos magnéticos de cada uno de los conductores y del imán que se muestran en las figuras 7.2b, 7.2c, 7.3 y 7.4 a y b.
2. Conociendo la dirección y el sentido de la inducción magnética en una región, y el sentido de la velocidad de una partícula cargada exploradora, ¿se podría con la regla de la mano derecha determinar el sentido de la fuerza que actúa sobre la carga móvil?
3. Calcula el valor de la inducción magnética en una región del espacio en la que la fuerza que actúa sobre un electrón que se mueve con una velocidad de 10^7 m/s es de 10^{-12} N.
4. En la figura 7.40 se muestra la forma en que se orienta una aguja magnética en el interior de un solenoide. Representa las líneas de inducción del solenoide y el sentido de la corriente en el enrollado.

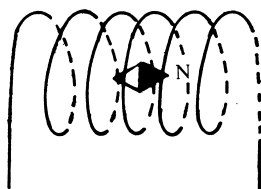


Fig. 7.40

5. Representa los vectores inducción magnética de los solenoides que se muestran en la figura 7.41. Determina gráficamente el vector inducción magnética resultante en el punto A.

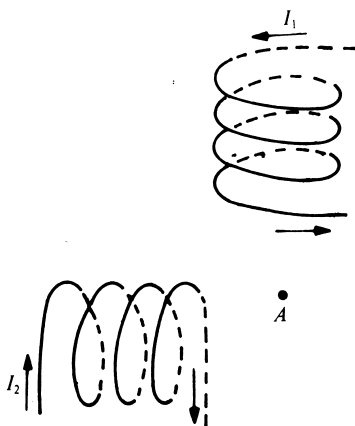


Fig. 7.41

6. Analiza la figura 7.42. Determina el sentido de la corriente que circula por la bobina y el conductor rectilíneo.

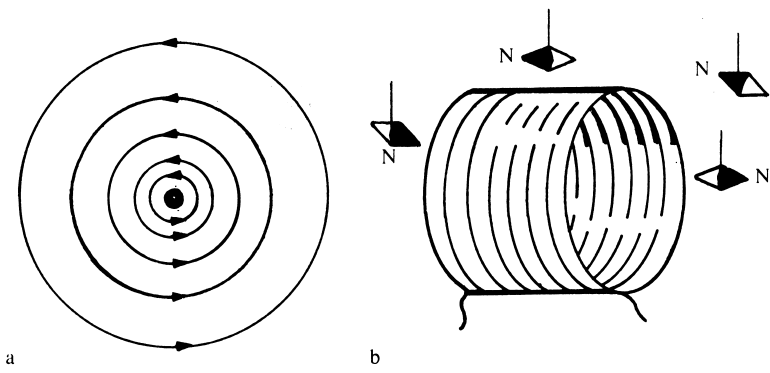


Fig. 7.42

7. Calcula el valor de la inducción magnética en la parte central de un solenoide de 40 cm de longitud, constituido por 200 espiras, por el que circula una corriente de 12 A.
8. Demuestra que el haz de electrones que se muestra en la figura 7.4, se desvía en las direcciones y sentidos que se muestran.
9. En la figura 7.43 se muestra una pastilla de semiconductor tipo n . Si las líneas de inducción magnética tienen el sentido indicado, y los electrones se mueven como se muestra, determina la polaridad de la tensión de Hall.

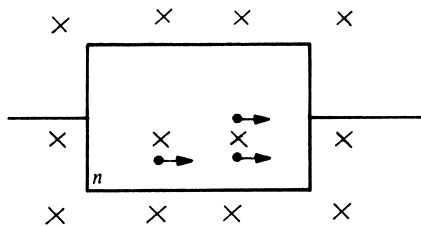


Fig. 7.43

10. ¿Cuál es el signo de la carga de la partícula que se encuentra dentro del espectrógrafo de masa que representamos en la figura 7.44?

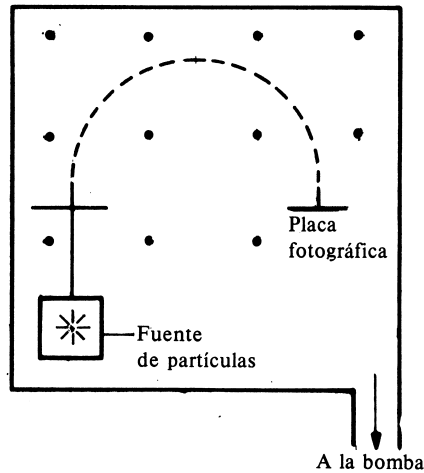


Fig. 7.44

11. En una región del espacio donde existen al mismo tiempo un campo eléctrico y un campo magnético uniforme, se mueve un electrón por una trayectoria rectilínea. Se conoce que la intensidad del campo eléctrico es igual a E . Explica cuál debe ser el valor de la inducción magnética (B) del campo magnético, para que el electrón no se desvíe de su trayectoria rectilínea, si:
 - a) las líneas de fuerza del campo eléctrico coinciden en dirección y sentido con las líneas de inducción del campo magnético, y el electrón se mueve en la misma dirección de ambos;
 - b) la dirección de la velocidad es perpendicular a las direcciones de $\vec{E}$ y de $\vec{B}$, que a su vez son perpendiculares entre sí.
12. Determina la naturaleza de los portadores de carga que circulan por la muestra de material semiconductor que se observa en la figura 7.45, si la polaridad de la tensión de Hall es la indicada.

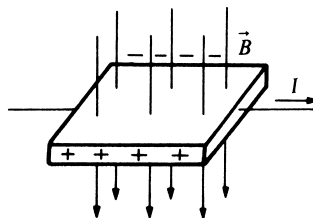


Fig. 7.45

13. Determina el sentido en que se mueve el marco rectangular con corriente que se indica en la figura 7.46. Explica tu respuesta. Representa las fuerzas que actúan sobre cada uno de los lados del marco.

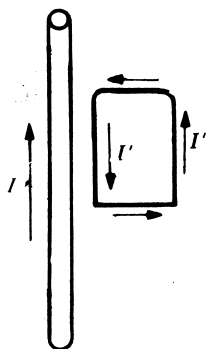


Fig. 7.46

14. Un imán permanente está recubierto por una bobina de diámetro mucho mayor (fig. 7.47). Si la bobina no está colocada exactamente en el centro del imán, las fuerzas que actúan en cada elemento de corriente, de acuerdo con la ley de Ampère, tiran de la bobina y tienden a lanzarla fuera del imán. Determina el sentido de la corriente en la bobina. ¿Qué ocurre si se invierte el sentido de la corriente?

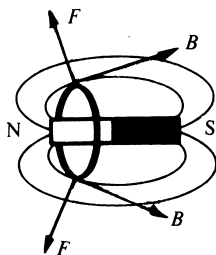


Fig. 7.47

15. Utilizando la regla de la mano derecha, demuestra que las corrientes paralelas de igual sentido se atraen, y que las corrientes de sentido contrario se repelen.
16. Un marco con corriente (fig. 7.48) se encuentra en una posición tal que su normal directriz forma un ángulo θ de 45° con las líneas de inducción magnética. Determina el momento de las fuerzas magnéticas que actúan sobre el marco.

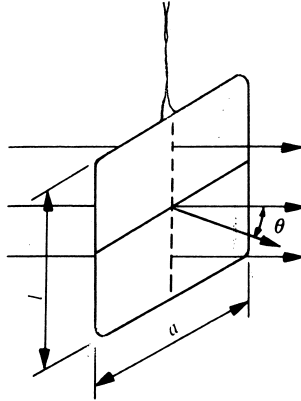


Fig. 7.48

17. Por un conductor de longitud $l = 0,15$ m pasa una corriente $I = 8$ A, perpendicular a las líneas de inducción de un campo magnético uniforme de $B = 0,4$ T. Halla el trabajo necesario para trasladar el conductor una distancia de $0,025$ m en la dirección en que actúa la fuerza de Ampère.
18. Dos partículas con cargas eléctricas contrarias se mueven tal como se muestra en la figura 7.49. Determina el sentido de la fuerza que actúa sobre la carga negativa.

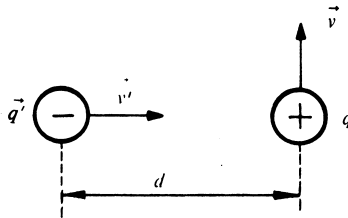


Fig. 7.49

Capítulo 8

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

8.1 *Introducción*

Hasta ahora hemos estudiado los campos eléctricos y magnéticos que no varían con el tiempo. Se ha explicado que el campo eléctrico está asociado a la partícula cargada en reposo, y el campo magnético a la partícula cargada en movimiento, es decir, a la corriente eléctrica. En este capítulo vamos a estudiar los campos eléctricos y magnéticos que varían con el tiempo. Estudiaremos también el estrecho vínculo que existe entre ellos.

El descubrimiento de que había una relación entre electricidad y magnetismo creó un hito en la historia de la física, pues hasta entonces se había considerado que ambas eran completamente independientes. Este hecho transformó la electricidad y el magnetismo, que hasta ese momento solo estudiaban los campos estáticos. Ahora vamos a dedicarnos a una descripción de lo que pasa cuando estamos en presencia de un campo eléctrico y magnético que varía con el tiempo. Surgen así una gran diversidad de fenómenos que transformaron a la electricidad y el magnetismo en electrodinámica.

Sin la existencia de esta relación entre los campos, sería imposible una variedad tan grande de manifestaciones de los fenómenos electromagnéticos como la que existe en la realidad.

La creación de las potentes centrales eléctricas que transforman energía, y del gran número de aparatos que la consumen, fue posible gracias a los conocimientos que se han adquirido de las leyes de la electrodinámica. El descubrimiento de la ley de inducción electromagnética relacionó la teoría con una enorme cantidad de aplicaciones prácticas.

El funcionamiento de todos los generadores de las centrales eléctricas se basa en la ley de la inducción electromagnética. La energía eléctrica que procedente de las centrales se transforma y divide en partes por medio de dispositivos, se debe también a nuestros conocimientos de la inducción electromagnética.

Estos dispositivos son los llamados transformadores, pilares de la técnica contemporánea.

8.2 *Fenómeno de inducción electromagnética*

Después del descubrimiento de Hans C. Oersted, en 1820, de que las corrientes eléctricas pueden provocar efectos magnéticos, comenzaron

múltiples investigaciones para buscar un posible efecto contrario, esto es, utilizar un imán para producir corriente eléctrica. En el circuito representado en la figura 8.1 no hay batería y, por lo tanto, no pasa corriente eléctrica en el conductor. La cuestión que se plantea ahora es si puede originarse corriente en el conductor por medio de un imán.

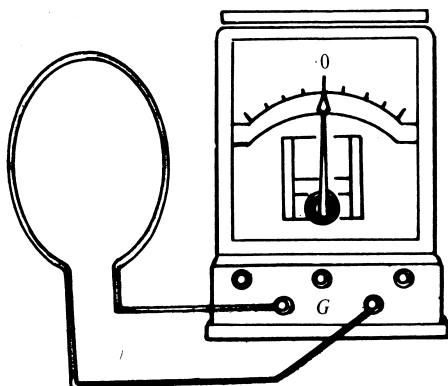


Fig. 8.1

En 1824 Michael Faraday comenzó a realizar experiencias de este tipo. Mas no detectaba ninguna corriente cuando colocaba un imán cerca o en el interior de la espira. Podríamos probar con un imán más grande y potente o con un instrumento de medición más sensible, pero no veremos moverse la aguja de nuestro galvanómetro.

Es decir, el hecho de colocar simplemente una espira en reposo dentro de un campo magnético no es suficiente. Entonces, ¿cómo proceder para determinar si un imán puede o no producir una corriente?

Realicemos el siguiente experimento. En la figura 8.2 se muestra un conductor cuyos terminales están conectados a un galvanómetro. Si este conductor se mueve en el campo de un imán (si se acerca o se aleja del imán), entonces en el conductor surge durante el movimiento una corriente eléctrica. Esto lo podemos observar gracias a la desviación de la aguja del galvanómetro. Esta corriente que recorre el circuito se denomina *corriente inducida* y el fenómeno que la produce, *inducción electromagnética*.

Si ahora introducimos un imán en una bobina de alambre cuyos terminales estén conectados a un galvanómetro, observamos que la aguja del galvanómetro se desvía indicando la aparición en el circuito de la bobina, de una corriente inducida (fig. 8.3a).

Este mismo fenómeno se observa al alejar el imán de la bobina, solo que en este caso la aguja del galvanómetro se desvía en el sentido opuesto. Entonces, al alejar el imán de la bobina se produce una corriente de sentido opuesto a la que aparece al introducirlo (fig. 8.3b).

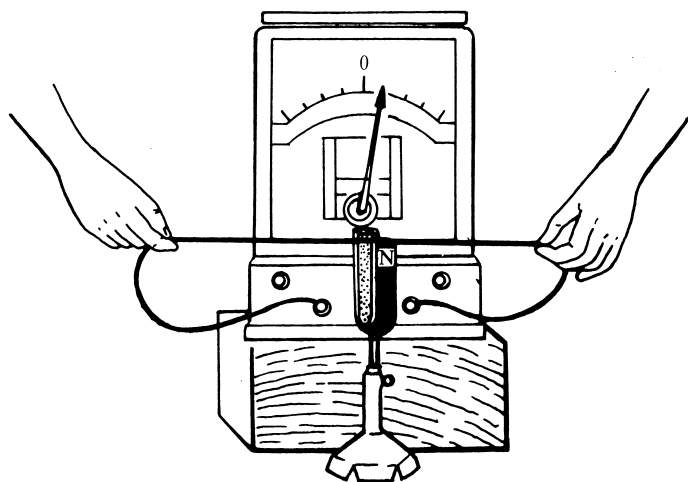


Fig. 8.2

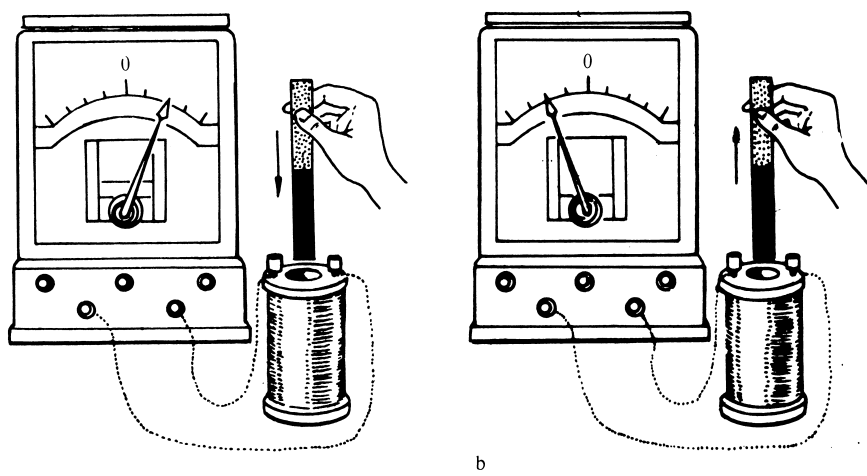


Fig. 8.3

Si en lugar de mover el imán acercamos y alejamos la bobina, se observan resultados idénticos. También se observa que el valor de la corriente inducida crece con la rapidez del desplazamiento relativo imán-bobina (fig. 8.4).

Observemos que tan pronto cesa el movimiento del imán en relación con la bobina, desaparece la corriente inducida (fig. 8.5).

Por supuesto, no para cualquier movimiento del imán o de la bobina surge corriente inducida. Para convencernos de esto, podemos hacer girar el imán o la bobina alrededor de su eje (fig. 8.6).

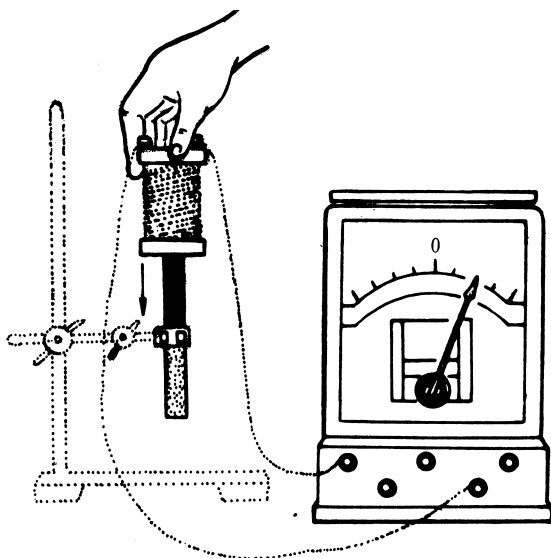


Fig. 8.4

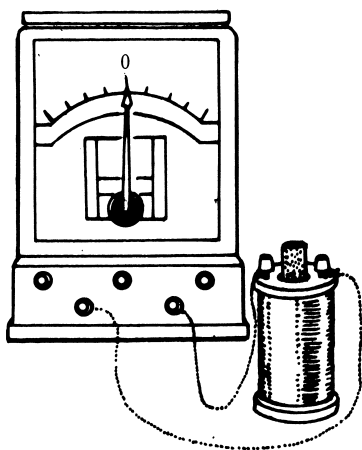


Fig. 8.5

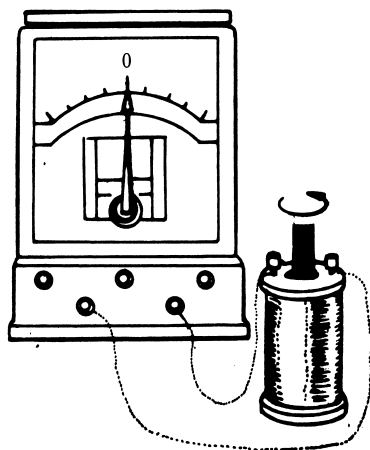


Fig. 8.6

¿Por qué en unos casos aparece la corriente inducida y en otros no?

El hecho de que al desplazar un conductor en un campo magnético (o viceversa) aparezca sobre aquél una corriente inducida, podemos explicarlo utilizando el modelo de las líneas de inducción magnética, con el cual podremos comprender la causa *común* que ocasiona la aparición de la corriente inducida en experimentos que aparentemente son distintos.

En el conductor cerrado se produce corriente cuando varía el número de líneas de inducción magnética que atraviesa el área limitada por el circuito (fig. 8.7a). Cuanto más rápidamente varíe, tanto mayor será la corriente inducida que aparece, cualquiera que sea la causa que motive esta variación.

Entonces podemos concluir que la *corriente eléctrica surge en un conductor en reposo dentro de un campo magnético variable con el tiempo o en un conductor que se mueva dentro de un campo magnético estacionario (que no varíe con el tiempo), de tal modo que siempre varíe el número de líneas de inducción magnética que atraviesa el circuito* (fig. 8.7b). En esto consiste el fenómeno de la *inducción electromagnética* descubierto por Faraday.

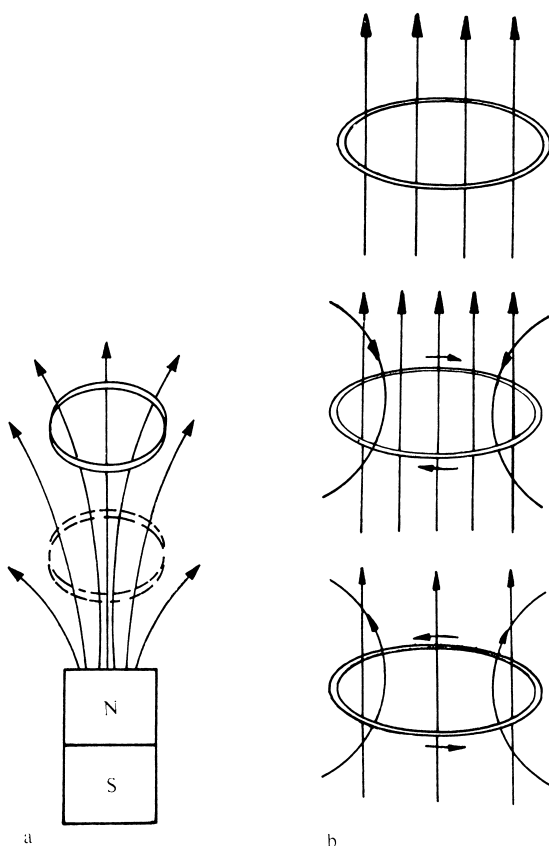
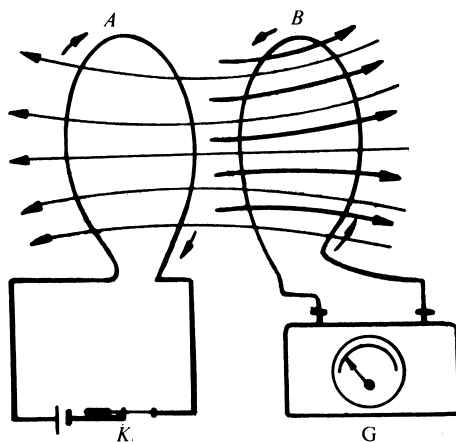


Fig. 8.7

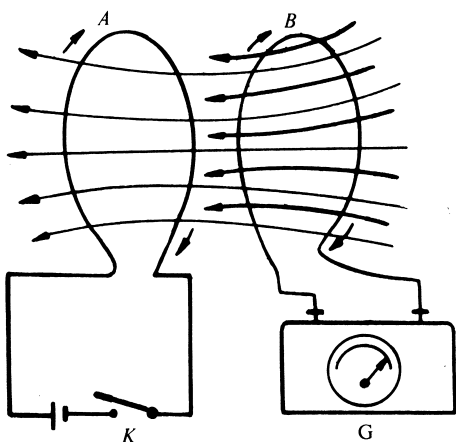
Tareas

1. Describe con tus palabras los experimentos que permiten afirmar: al desplazar un conductor en un campo magnético (o viceversa) aparece sobre aquél una corriente inducida.

2. Dibuja en un esquema los experimentos en los cuales se manifiesta la corriente inducida.
3. ¿En qué se diferencian entre sí los experimentos de Oersted y de Faraday?
4. Discute e ilustra la siguiente afirmación:
La corriente eléctrica surge en un conductor en reposo dentro de un campo magnético variable con el tiempo o en un conductor que se mueva dentro de un campo magnético estacionario, de tal modo que siempre varíe el número de líneas de inducción magnética que atraviese el circuito.
5. Explica por qué en los circuitos representados en la figura 8.8 aparece corriente inducida en una de las bobinas cuando se cierra o se abre el circuito eléctrico de la otra bobina en reposo con respecto a la primera. Compruébalo experimentalmente.



a



b

Fig. 8.8

8.3 Sentido de la corriente inducida. Ley de Lenz

Como hemos observado en los experimentos anteriores, siempre que se hace variar el número de líneas de inducción magnética, aparece una corriente inducida. Pero, ¿por qué en unos casos el indicador del galvanómetro se desplaza en un sentido y, en otros, en sentido contrario?

Aclaremos este importante aspecto del sentido de la corriente de inducción.

Al conectar una bobina a un galvanómetro y mover en su proximidad el polo norte de un imán, se pone de manifiesto que el sentido de la corriente inducida que aparece en la bobina depende del movimiento relativo del imán respecto a ella (si se acerca o se aleja), como se puede apreciar en la figura 8.9.

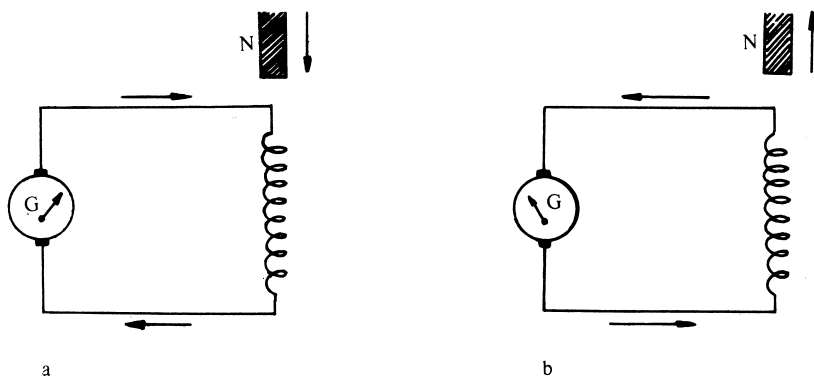


Fig. 8.9

Interpretemos este resultado. La dirección de la corriente inducida que surge en el circuito cerrado depende del aumento o la disminución del número de líneas de inducción que atraviesa la bobina.

Basado en el estudio de resultados de experimentos semejantes a los descritos anteriormente, H. F. Lenz formuló un principio que permitió determinar el sentido de la corriente inducida, conocido como ley de Lenz, que expresa lo siguiente: *la corriente de inducción, en todos los casos, tiene un sentido tal que sus efectos se oponen a la causa que lo origina.*

Al aproximar el polo norte del imán a la bobina (fig. 8.10a), el número de líneas de inducción que atraviesa la bobina aumenta. La corriente inducida tendrá, entonces, un sentido tal que su campo magnético se oponga a que aumente el número de líneas de inducción a través de las espiras de la bobina. Se forma así un polo norte frente al imán (el vector inducción de este campo magnético B' tiene sentido opuesto al del vector inducción, B , de la corriente eléctrica).

Si alejamos el polo norte del imán (fig. 8.10b), el número de líneas de inducción que atraviesa las espiras de la bobina disminuye y, para oponerse a esto, las líneas de inducción del campo magnético de la corriente inducida son ahora del mismo sentido. Se forma así un polo sur frente al imán que se aleja, y la corriente inducida I es de signo contrario a la de la experiencia anterior.

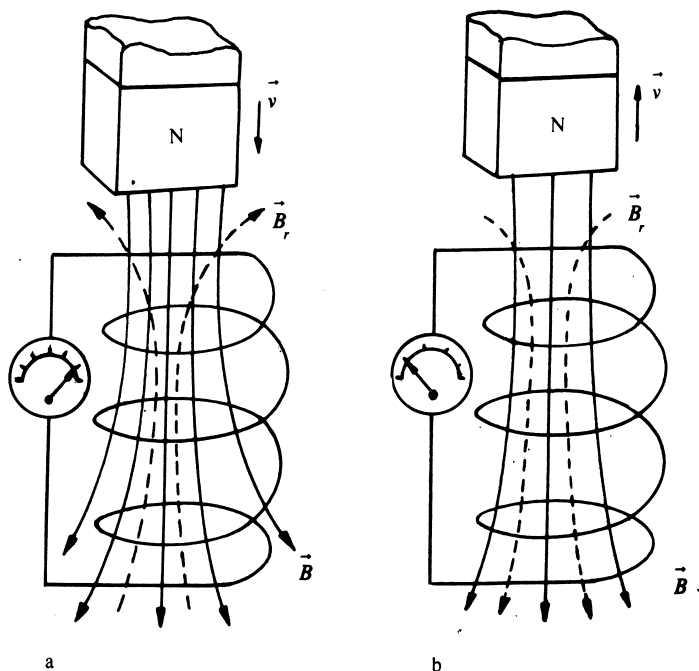


Fig. 8.10

Esta ley se fundamenta en la de conservación de la energía. Lenz razonaba de este modo: toda corriente eléctrica, aunque sea inducida por un campo magnético variable, realiza trabajo y, por tanto, debe realizarse un cierto trabajo para producir corriente.

Para acercar el imán a la bobina (o para alejarlo de esta), es necesario que un agente externo (por ejemplo la mano) realice trabajo, pues este agente debe vencer, en el primer caso, la fuerza de repulsión que se produce entre el imán y la bobina, y, en el segundo, la fuerza de atracción entre ellos. Pero el trabajo es una medida de la variación de la energía. Si al aproximar el imán a la bobina él mismo tendiera a introducirse en ella, se violaría la ley de conservación de la energía, ya que la energía cinética del imán aumentaría y, al mismo tiempo, se produciría corriente (para lo cual se requiere necesariamente un gasto de energía); estas energías, la cinética del imán y la de la corriente, surgirían de la nada.

Tareas

6. Explica con tus palabras la ley de Lenz.
7. Explica la figura 8.11 según la ley de Lenz.

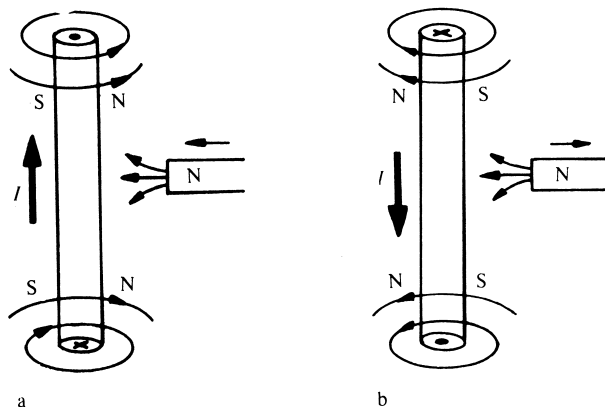


Fig. 8.11

8. Observa la figura 8.12. En los extremos de una varilla que puede girar libremente alrededor de un eje vertical, están sujetos dos anillos conductores de aluminio. Uno de ellos está cortado. Explica qué sucede:
 - a) si se acerca un imán al anillo no cortado;
 - b) si el imán se aleja del anillo no cortado;
 - c) si el imán se aleja del anillo cortado;
 - d) si el imán se acerca al anillo cortado.

Analiza si se cumple el principio de conservación de la energía.

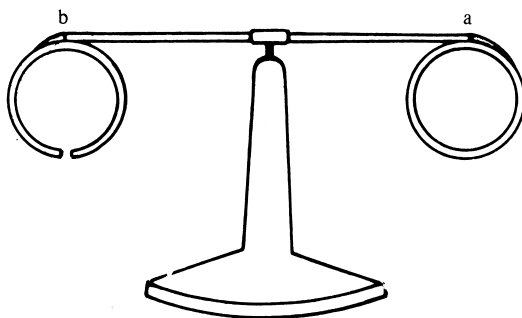


Fig. 8.12

9. En cada uno de los casos de la figura 8.13, la cara de la espira más próxima al imán, ¿actuará como un polo norte o como un polo sur?

Utilizando la regla de la mano derecha, comprueba que en cada uno de los esquemas la corriente tiene la dirección indicada por las flechas. Demuestra que el principio de conservación de la energía se violaría si la corriente circulase en sentido opuesto al que indica la figura.

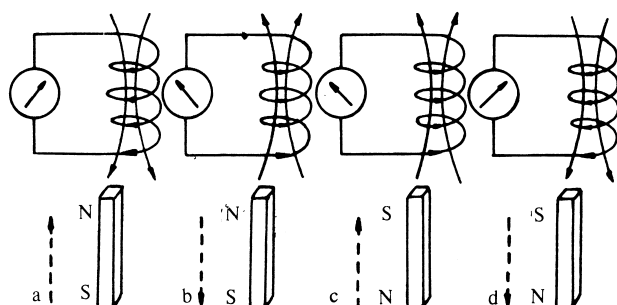


Fig. 8.13

TRABAJO DEL LABORATORIO 9 Estudio del fenómeno de la inducción electromagnética

Instrumentos y materiales: 2 imanes rectos, bobina de 500 espiras, bobina de 1 000 espiras, fuente de corriente directa (equipo básico), interruptor, instrumento de medición, 5 cables de conexión, 5 tableros receptáculos de dispositivos eléctricos intercambiables, núcleo en I, aguja magnética con su soporte.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito como el representado en la figura 8.14. El instrumento de medición debe estar preparado para trabajar según su mínimo rango de medición. Utiliza la bobina de 500 espiras.

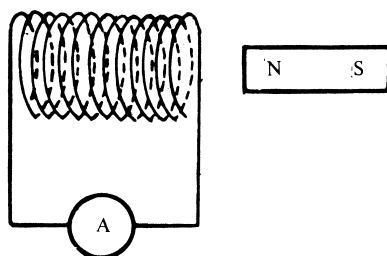


Fig. 8.14

2. Determina previamente la polaridad del instrumento, de forma que se pueda decidir en qué sentido circula la corriente por el aparato cuando su aguja se desplaza hacia la izquierda o hacia la derecha.
3. Toma un imán de barra. Determina e identifica sus polos magnéticos.
4. Acerca el polo norte del imán a una de las caras de la bobina. Observa las indicaciones del instrumento de medición. Haz un esquema representativo del acercamiento del imán a la bobina. Aplica la ley de Lenz y determina el sentido de la corriente en tu esquema. Comprueba si el resultado experimental está de acuerdo con el análisis que se basa en el esquema del fenómeno observado.
5. Monta un segundo circuito como el representado en la figura 8.15. El núcleo en forma de I debe quedar colocado entre las bobinas y el instrumento de medición conectado a la bobina de 1 000 espiras.

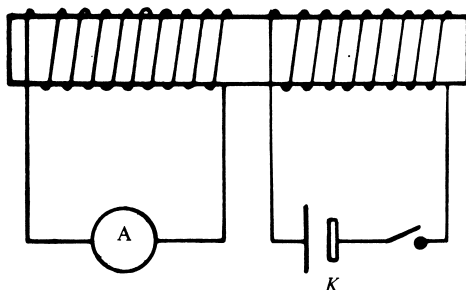


Fig. 8.15

6. Representa en la libreta el circuito montado. Ten cuidado de representar correctamente la forma y el sentido en que están enrolladas las espiras de las bobinas.
7. A partir de la ley de Lenz y del esquema, determina el sentido de la corriente que se induce en la bobina de 1 000 espiras al cerrar el interruptor K .

8.4 Ley de la inducción electromagnética

De los experimentos realizados por Faraday, podemos determinar de qué factores depende el fenómeno de la inducción electromagnética. Vimos que el factor común determinante en este fenómeno es la variación de la cantidad de líneas de inducción magnética que atraviesa el área limitada por el conductor. También hemos comprobado que la intensidad de la corriente inducida, I_p , en un circuito, es más intensa mientras más rápido varíe el número de líneas de inducción magnética que atraviesa su área.

Esta afirmación podemos enunciarla aplicando un concepto nuevo: *el flujo de inducción magnética*.

El flujo magnético se interpreta intuitivamente como el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el área de una superficie (fig. 8.16).

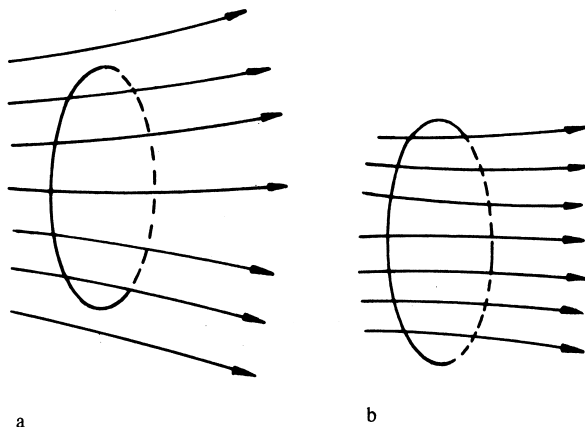


Fig. 8.16

Para campos magnéticos uniformes, el flujo magnético es igual al producto del vector inducción magnética por el área de la superficie, si esta es perpendicular al campo. Designando el flujo como Φ , entonces:

$$\Phi = B S \quad (8.1)$$

Si el área de la superficie está inclinada cierto ángulo α , de modo que el campo magnético no es normal a ella, entonces la atravesarán menos líneas de inducción magnética. En este caso podemos calcular Φ por la expresión:

$$\Phi = B S \cos \alpha \quad (8.2)$$

donde α es el ángulo que forma la normal a la superficie y la dirección del vector inducción magnética $\vec{B}$ (fig. 8.17).

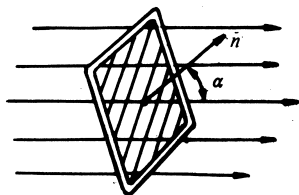


Fig. 8.17

Ahora ¿qué valor tendrá el flujo magnético, Φ , si el área de la superficie es paralela a las líneas de inducción magnética?

Basándonos en el concepto de flujo, podemos establecer cuantitativamente la ley de la inducción electromagnética.

Con este objetivo, analizaremos los resultados que se obtienen en experimentos semejantes a los ya estudiados.

Hagamos entrar en una bobina un imán; después, en la misma bobina, introduzcamos otro imán más potente (fig. 8.18). Observaremos que la corriente inducida en el segundo caso es mayor que el primero. Si consideramos que en el intervalo de tiempo Δt es el mismo en ambos casos, entonces podemos afirmar que el flujo magnético cambió considerablemente más en el segundo caso que en el primero. Cuantitativamente, esto puede ser expresado de la forma:

$$I \propto \Delta\Phi$$

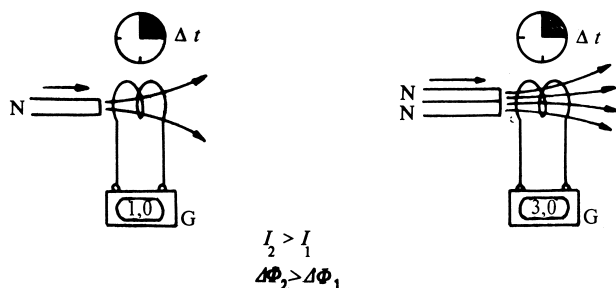


Fig. 8.18

Si ahora desplazamos un mismo imán, pero primero de forma lenta y después rápida, se observa que la corriente de inducción es mayor cuando el movimiento del imán es más rápido (fig. 8.19), o sea que:

$$I \propto \frac{1}{\Delta t}$$

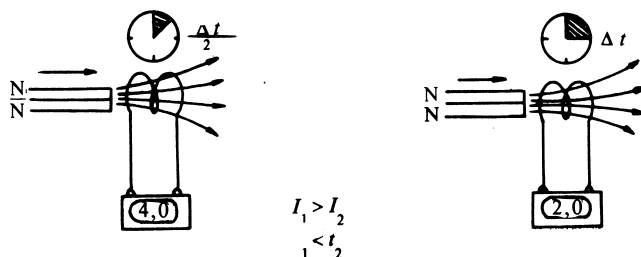


Fig. 8.19

Por lo tanto, la afirmación que se infiere de estos experimentos se puede formular así: *la intensidad de la corriente inducida es proporcional a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del área limitada por el circuito.*

$$I_i \propto \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (8.3)$$

Ahora bien, como recordarás del capítulo 5, la aparición de toda corriente eléctrica en un circuito exige la presencia de una fem, que en el caso de una corriente inducida se denomina *fuerza electromotriz de inducción*.

La ley de la inducción electromagnética se enuncia, precisamente, para la fem y no para la intensidad de la corriente. Así, el enunciado de esta ley expresa la esencia del fenómeno, que no depende de las propiedades de los conductores, y se formula: *la fem inducida en un circuito cerrado es igual en módulo a la rapidez con que varía el flujo magnético.*

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (8.4)$$

Diversos experimentos muestran que la fem inducida no depende de otras magnitudes físicas.

Sin embargo, esta expresión no describe totalmente el fenómeno de la inducción electromagnética, pues no tiene en cuenta el comportamiento de la corriente inducida. Esto se logra si se introduce un signo negativo en la expresión 8.4. Este signo refleja el hecho de que la polaridad de la fem es tal, que la corriente que ella produce determina campos magnéticos con sentido opuesto a la variación del flujo de inducción magnética. La ecuación 8.4 quedará entonces:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (8.5)$$

Cuando se tiene un conjunto de N espiras, todas iguales (fig. 8.20), a través de las cuales la rapidez de cambio del flujo magnético, $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, es la misma, entonces la expresión 8.5 se escribe de la forma:

$$\varepsilon_i = - \frac{N \Delta \Phi}{\Delta t} \quad (8.6)$$

¿Cómo crees que se pueda demostrar experimentalmente esta afirmación?

En el S.I. la ley de la inducción electromagnética se utiliza para establecer la unidad del flujo de inducción magnética, *weber* (Wb).

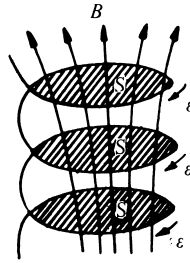


Fig. 8.20

Como la fem de inducción E_i se mide en volt (V) y el tiempo en segundos (s), entonces, de acuerdo con la expresión 8.5, el weber puede ser definido de la siguiente forma: el flujo de inducción magnética a través de la superficie de un contorno cerrado es igual a un weber, si durante el decrecimiento uniforme de este flujo hasta el valor cero, durante el tiempo de un segundo, se induce una fem de inducción de un volt.

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$$

De igual manera, la unidad del vector inducción magnética, el tesla (T), se puede definir a partir de la expresión:

$$\Phi = B s$$

de la cual se deduce que:

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

Problemas resueltos

1. Un circuito rectangular $ABCD$ se traslada en el campo magnético producido por la corriente que circula en un conductor rectilíneo largo. Determina el sentido de la corriente inducida en el circuito, si éste se aleja del conductor (fig. 8.21).

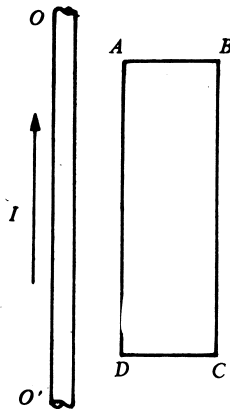


Fig. 8.21

Solución

Cuando el circuito se mueve en el sentido indicado, el flujo magnético a través del área $ABCD$ disminuye. Por consiguiente, en dicho circuito se establece una corriente que, de acuerdo con la ley de Lenz, estará dirigida en el sentido de las manecillas del reloj. Precisamente cuando la corriente tiene este sentido, su flujo magnético se suma al flujo creado por la corriente que pasa por el conductor rectilíneo.

2. ¿Cuál será el valor de la fem de inducción producida en una espira si, al cabo de 0,1 s, el flujo magnético varía en él en 0,05 Wb?

Solución

En el problema hay que determinar la fem inducida en un contorno, conociendo la variación del flujo $\Delta\Phi$ y el intervalo de tiempo Δt en que varía el flujo.

La fem inducida en el contorno es directamente proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Evalutando la expresión anterior para $\Delta t = 0,1$ s y $\Delta\Phi = 0,05$ Wb, se obtiene que el valor de la fem inducida es:

$$\varepsilon_i = \frac{-5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}}{0,1 \text{ s}}$$

$$\varepsilon_i = -0,5 \text{ V}$$

3. Una bobina tiene 1 500 espiras. Por su sección transversal pasa un flujo magnético que disminuye 0,25 Wb cada 5 s. Determina la fem de inducción que se genera en la bobina.

Solución

Hay que determinar la fem inducida que se genera en una bobina de N espiras sometida a un flujo magnético Φ , cuya variación $\Delta\Phi = -0,25$ Wb ocurre en $\Delta t = 5$ s.

La fem inducida en la bobina es proporcional a la variación de flujo en la unidad de tiempo y el número de espiras de la bobina, o sea, como ya vimos en la expresión 8.6:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Sustituyendo en la expresión anterior los datos proporcionados por el problema, podemos calcular el valor de la fem inducida:

$$\varepsilon_i = -1\,500 \left(\frac{-0,25 \text{ Wb}}{5 \text{ s}} \right)$$

$$\varepsilon_i = 75 \text{ V}$$

4. Una bobina de N espiras, de área S cada una, está conectada a un galvanómetro balístico (este instrumento mide la carga eléctrica que pasa por él). La resistencia de todo el circuito es R . Al principio, la bobina se encontraba entre los polos de un imán en la región en que el campo magnético es homogéneo y la inducción del campo B es perpendicular a las esferas de la bobina. Después, se desplazó la bobina hacia la región del espacio donde el campo magnético es nulo. Determina la carga que pasó por el galvanómetro.

Solución

De acuerdo con las leyes de inducción electromagnética y la ley de Ohm, la carga que pasó por el galvanómetro es:

$$\Delta q = I \Delta t = \frac{\varepsilon}{R} \Delta t$$

$$\Delta q = - \frac{I}{R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \Delta t = - \frac{I}{R} \Delta \Phi$$

$$\Delta q = - \frac{\Phi - \Phi_0}{R}$$

Aquí, $\Phi_0 = BSN$ es el flujo inicial y Φ es el flujo magnético final, que es igual a cero. Por lo tanto:

$$\Delta q = \frac{BSN}{R}$$

5. Calcula la variación del flujo magnético $\Delta \Phi$ a través de un contorno que limita un área de $0,5 \text{ m}^2$, si el mismo gira en un campo magnético, de inducción igual a $2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, desde $\alpha_1 = 0^\circ$ hasta $\alpha_2 = 45^\circ$ (α es el ángulo entre la normal al plano del contorno y la dirección del vector inducción magnética).

Solución

Hay que determinar la variación del flujo magnético, $\Phi_2 - \Phi_1$, al girar un contorno de superficie conocida, en un campo magnético uniforme, desde 0° hasta 45° .

La variación de flujo de la diferencia del flujo final (con $\alpha = 45^\circ$) del inicial (con $\alpha = 0^\circ$).

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (1)$$

El flujo a través de una superficie plana limitada por un contorno, en un campo magnético uniforme, se puede calcular mediante la ecuación 8.2:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Evaluando esta ecuación para $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 45^\circ$, se obtiene que:

$$\Phi_0 = BS \cos 0^\circ \text{ y } \Phi_{45} = BS \cos 45^\circ$$

Sustituyendo estas expresiones en (1), obtenemos:

$$\Delta\Phi = BS (\cos 45^\circ - \cos 0^\circ)$$

$$\Delta\Phi = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T} \cdot 0,5 \text{ m}^2 \left(\frac{2}{\sqrt{2}} - 1 \right)$$

$$\Delta\Phi = -0,29 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

El signo menos significa que el flujo magnético disminuye al girar el contorno de 0° hasta 45° .

6. Construye la gráfica del flujo de inducción magnética a través de una superficie plana, colocada en un campo magnético uniforme, en función del ángulo α formado por $\vec{B}$ y la normal a la superficie, $\Phi = f(\alpha)$, en el intervalo de $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$.

Solución

El flujo de inducción magnética se puede determinar a partir de la ecuación:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1)$$

En el problema se pide construir la gráfica $\Phi = f(\alpha)$.

En este caso, B y S son constantes y la función $\cos \alpha$ tiene la forma que se ilustra en la figura 8.22.

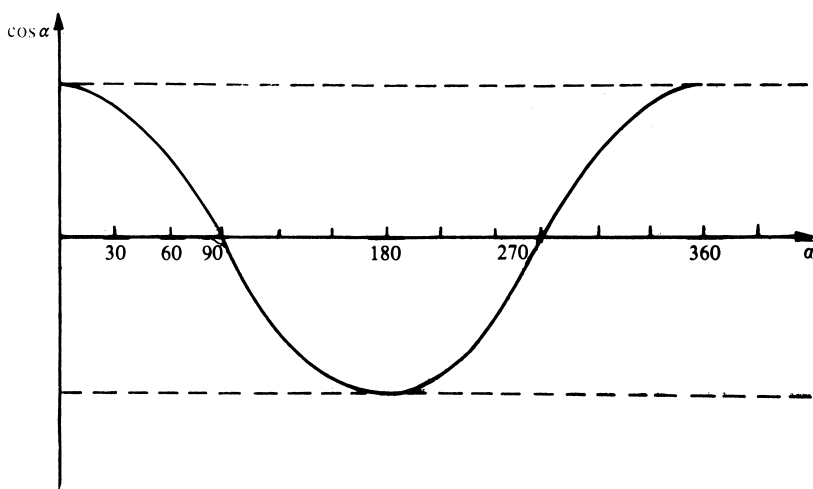


Fig. 8.22

Como $\Phi = f(\alpha)$ tiene la forma descrita por la ecuación 1, basta multiplicar $\cos \alpha$ por BS para obtener el valor del flujo para cualquier ángulo α , de manera que la gráfica requerida queda como ilustra la figura 8.23.

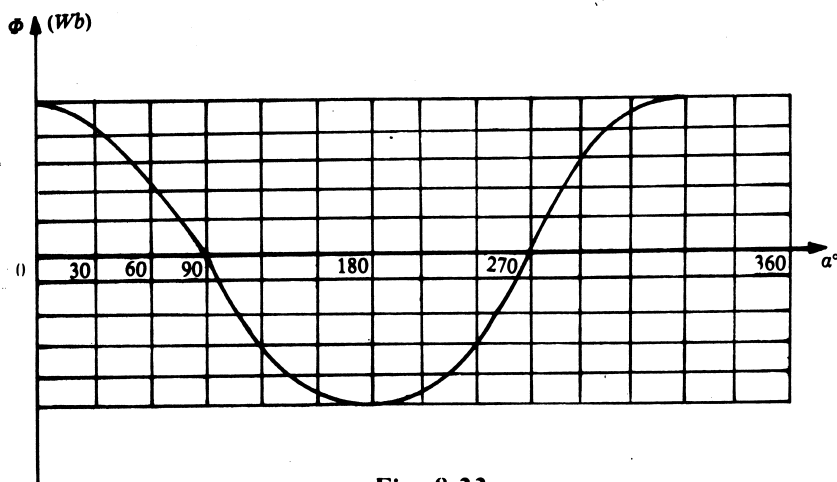


Fig. 8.23

Tareas

10. ¿A qué llamamos flujo magnético? Explica su significado.
11. Explica con tus palabras los experimentos que ilustran la ley de la inducción electromagnética.
12. Explica con tus palabras la ley de la inducción electromagnética.
13. Demuestra que:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

8.5 Aplicaciones técnicas de la ley de inducción electromagnética: el generador y el transformador

El generador

La estructura y el funcionamiento de los generadores de corriente eléctrica se basan en el fenómeno de la inducción electromagnética. En la figura 8.24 se presenta un modelo de este instrumento, que consiste en un cuadro o espira rectangular cuyas terminales están conectadas a un galvanómetro. El cuadro está ubicado en un campo magnético. Está claro que también se hubiera podido proceder al contrario, es decir, haciendo girar el imán y manteniendo en reposo la espira rectangular.

Como el flujo varía al girar la espira alrededor de un eje horizontal, el área efectiva, A , es la proyección de la espira sobre un plano horizontal. Cuando la espira gira separándose del plano horizontal, el flujo a tra-

vés de ella disminuye y se induce una corriente. En el momento en que la espira ha girado un ángulo de 90° (fig. 8.24a) el flujo descende a cero. Al continuar la rotación, el flujo vuelve a aumentar (fig. 8.24b). Cuando la espira haya girado 180° , su plano es nuevamente horizontal, el flujo que la atraviesa es nuevamente máximo y la variación del flujo por unidad de tiempo es cero en ese instante (fig. 8.24c). Continuando la rotación, disminuye el flujo y se origina ahora una corriente inducida en sentido contrario (fig. 8.24d).

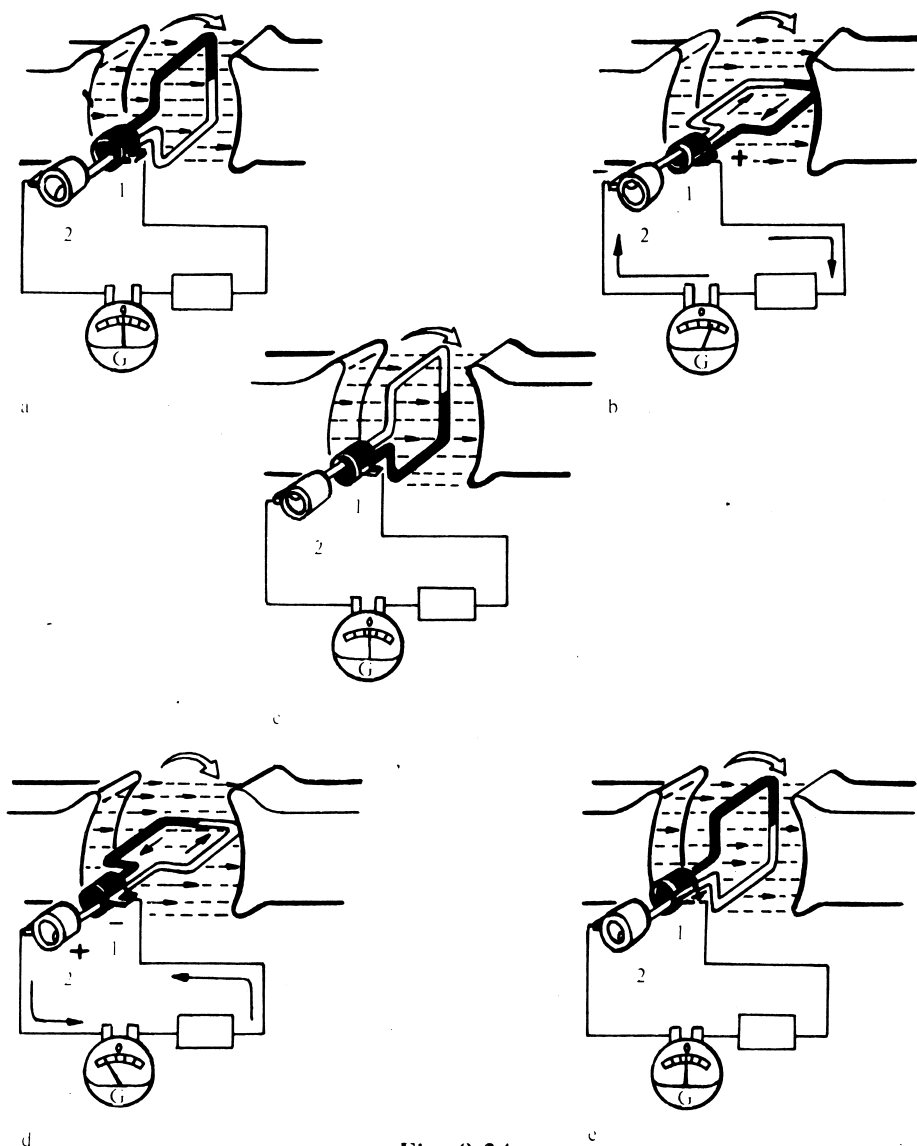


Fig. 8.24

Esta variación de la corriente se repite periódicamente, por lo que la fem también variará periódicamente.

Supongamos, como indica la figura 8.24, que la espira rectangular gira con velocidad angular ω , constante, en el interior de un campo magnético uniforme B . Al hacerlo, el flujo de inducción magnética a través de la superficie limitada por el cuadro, Φ , experimenta una variación periódica con el tiempo según la expresión:

$$\Phi = BS \cos \theta \quad (8.7)$$

donde θ es el ángulo que forma el campo B y la normal a la superficie del cuadro. Este ángulo varía con el tiempo en la forma $\theta = \omega t$ (observa que el ángulo aumenta en proporcionalidad directa con el tiempo), y, por lo tanto, el flujo magnético varía armónicamente:

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (8.8)$$

En esta expresión podemos observar que el valor máximo del flujo a través de la superficie de la espira móvil, corresponde a la posición en que $\theta = 0$, es decir, $\cos \omega t = 1$, por lo que el valor máximo de flujo será:

$$\Phi = BS$$

La fem inducida en la espira, de acuerdo con la ley de inducción electromagnética (ecuación 8.5) varía también periódicamente con el tiempo, pero de forma sinusoidal. Recibe el nombre de *fuerza electromotriz alterna* y se puede demostrar que cumple con la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (8.9)$$

El transformador

Un transformador consiste, en esencia, en dos devanados de alambre mutuamente acoplados, denominados primario (P) y secundario (S), que están enrollados sobre un núcleo de hierro (fig. 8.25a). Este dispositivo, para su estudio, se esquematiza de la forma que aparece en la figura 8.25b.

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética.

Cuando por el devanado primario pasa una corriente que varía con el tiempo, en el núcleo aparece un flujo magnético también variable en el tiempo, que provoca una fem inducida en cada enrollado. La función del núcleo de hierro en los transformadores es concentrar el campo magnético de tal modo, que el flujo de inducción magnética prácticamente solo exista dentro de dicho núcleo y sea igual en todas sus secciones.

Por consiguiente, la variación del flujo de inducción magnética en cualquier espira del enrollado primario, o del secundario, es la misma. De acuerdo con la ley de inducción electromagnética, este valor se determina por:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

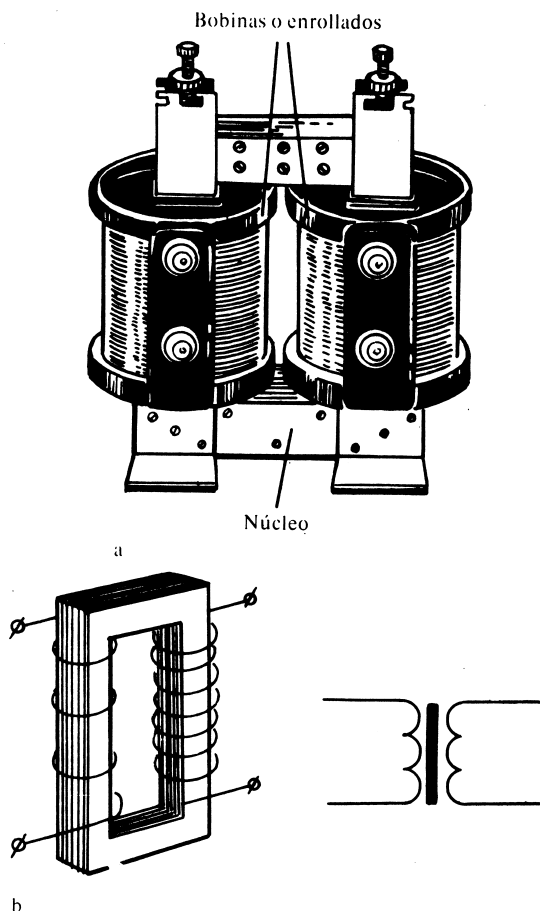


Fig. 8.25

Supongamos que el devanado primario tiene n_1 espiras. Entonces, en él la fem inducida total será:

$$\varepsilon_1 = -n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Si el secundario tiene n_2 espiras, su fem inducida total será:

$$\varepsilon_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, es decir, la variación del flujo en el tiempo, es igual para los dos enrollados, podemos plantear que:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (8.10)$$

Esta expresión nos dice que la relación entre la fem en el primario y en el secundario, es igual a la relación entre los números de vueltas de los devanados respectivos.

El aumento de la intensidad de la corriente en el circuito del devanado primario ocurre en correspondencia con la ley de conservación de la energía. El consumo de energía eléctrica en el devanado secundario del transformador debe estar acompañado, como requisito, de una energía similar en el primario, la cual toma el transformador de la red de alimentación.

En consecuencia, la potencia en el circuito primario es aproximadamente igual a la potencia consumida en el circuito del secundario.

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

De ahí que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Podemos concluir entonces que, al elevar la tensión con un transformador, se disminuye, al mismo tiempo y en la misma proporción, la intensidad de la corriente y viceversa.

TRABAJO DE LABORATORIO 10 Estudio de un transformador

Instrumentos y materiales: bobina de 1 000 espiras, bobina de 500 espiras, núcleo en forma de U, núcleo recto, fuente de corriente, 2 instrumentos de medición, 2 portalámparas, 2 lámparas de incandescencia de 6 V, 0,6 W, 2 tableros receptáculos, 2 interruptores de cuchillas.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito similar al que se muestra en la figura 8.26. Observa que, en este caso, la fuente debe conectarse con la bobina de 1 000 espiras. ¿Cuál es el enrollado primario y cuál el secundario?

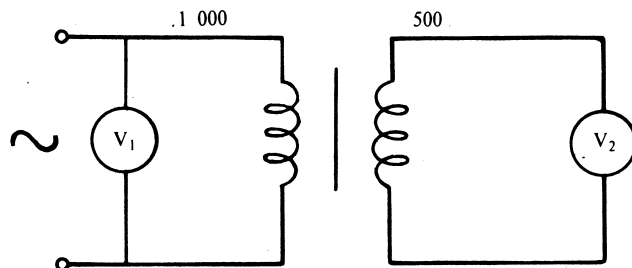


Fig. 8.26

2. Mide y anota los valores de las tensiones del primario y del secundario en la tabla 8.1. ¿Qué tipo de transformación es esta? Conecta el voltímetro entre las tomas de 250 espiras del secundario. ¿Cuánto vale la tensión en este caso? Haz las anotaciones en la tabla.
3. Invierte la conexión del transformador con la fuente, o sea, conecta ahora la bobina de 500 espiras con la fuente. Determina de nuevo los valores de la tensión. Calcula la relación de transformación para este caso.

Tabla 8.1

<i>Tensión en el primario</i>	<i>Número de espiras en el primario</i>	<i>Tensión en el secundario</i>	<i>Número de espiras en el secundario</i>

8.6 *Campo eléctrico inducido*

Hemos visto que una fuerza electromotriz se puede originar en un conductor por dos causas:

1. Un conductor cerrado estacionario es colocado en un campo magnético que varía con el tiempo.
2. Un conductor móvil se desplaza en un campo magnético estacionario.

El valor de la fem se determina en ambos casos por la ley:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Pero el origen de la fem inducida, en cada caso es distinto.

Vamos a empezar estudiando el primer caso.

Supongamos que ante nosotros tenemos un transformador. Conectando el devanado primario a la red, obtenemos corriente en el devanado secundario, si éste está cerrado. Los electrones se ponen en movimiento en el conductor del devanado secundario. Pero, ¿qué fuerzas hacen que se muevan?

La ley de la inducción nos dice que se induce una fem en una espira siempre que exista una variación en el flujo que la atraviesa. Como conoces, en la espira habrá, entonces, una corriente inducida, lo cual significa que las partículas cargadas se mueven a lo largo de ella y, por consiguiente, debe existir una fuerza resultante sobre las partículas cargadas. Esta fuerza por unidad de carga es precisamente el *campo eléctrico*.

Por tanto, debe haber un campo eléctrico dentro del conductor, y las líneas de fuerza de este campo deben cerrarse sobre ellas mismas como se muestra en la figura 8.27.

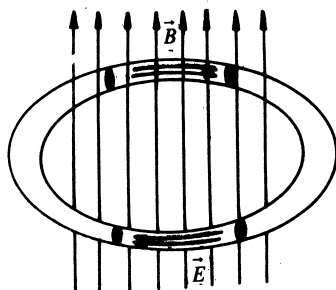


Fig. 8.27

Este campo eléctrico será capaz de hacer que una partícula cargada se desplace continuamente dentro de la espira.¹

Ahora el fenómeno de la inducción electromagnética se nos presenta bajo un nuevo aspecto, *un campo magnético variable en el tiempo va acompañado siempre de un campo eléctrico*.

Entonces, la esencia del fenómeno de la inducción electromagnética en un conductor en reposo consiste no tanto en la aparición de la corriente inducida, como en la existencia del campo eléctrico, que es quien hace moverse a las partículas cargadas.

El campo eléctrico que aparece cuando varía el campo magnético tiene propiedades totalmente distintas a las del electrostático. El que nos ocupa ahora no está relacionado directamente con las partículas cargadas en reposo, y sus líneas de intensidad no pueden empezar y terminar en ellas. Ahora, estas líneas, en general, no empiezan ni terminan en parte alguna, sino que son cerradas, semejantes a las de inducción del campo magnético. Es por eso que este campo es llamado *campo eléctrico rotacional*.

¹ Posteriormente, James C. Maxwell llamó la atención sobre el hecho de que la espira conductora solamente servía para revelar la presencia de un campo eléctrico que *siempre* era inducido alrededor de un campo magnético variable, independientemente de que la espira conductora estuviera o no presente.

Tareas

14. Explica la causa de la existencia del campo eléctrico inducido.
15. ¿Tienen principio y fin las líneas de un campo eléctrico inducido por un cambio en el campo magnético?
16. Compara, por sus propiedades, el campo electrostático, estacionario con el campo eléctrico inducido.

8.7 Fem de inducción en los conductores en movimiento

Analicemos ahora el caso de un conductor móvil que se mueve en un campo magnético uniforme y estacionario (fig. 8.28).

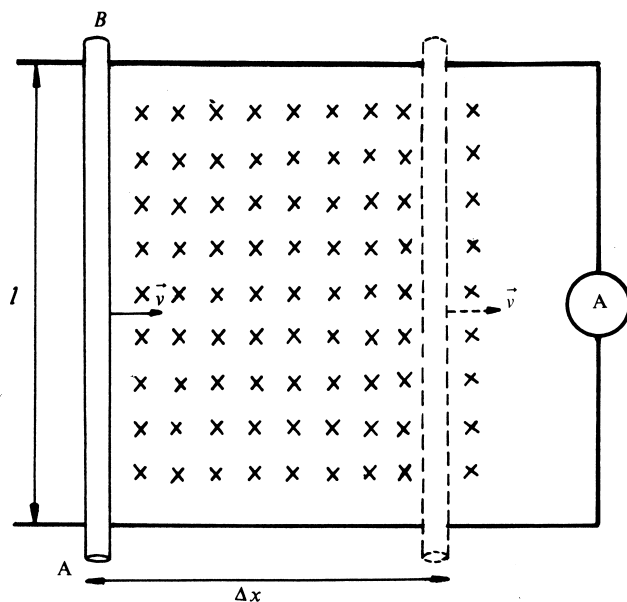


Fig. 8.28

En este caso la fem inducida en el conductor no se debe al campo eléctrico rotacional, sino a otra causa. Al moverse el conductor, sobre sus portadores libres de carga, considerados convencionalmente positivos, actúa la fuerza de Lorentz. Como resultado de la acción de esta fuerza es que los portadores libres de carga se mueven dentro del conductor. Por lo tanto, la fem inducida tiene en este caso un "origen magnético".

Tratemos de esclarecer algo más, de forma simplificada, el origen de la fem de inducción en este caso y calcular su valor:

Supongamos que un conductor recto, la longitud l se mueve con velocidad v cortando perpendicularmente las líneas de inducción de un campo magnético y que la velocidad de los portadores en la dirección del movimiento del conductor también es v (fig. 8.29).

En estas condiciones, los portadores libres de carga se mueven con velocidad u a lo largo del conductor; la velocidad resultante de ellos será $v_R = u + v$ y el valor de la fuerza de Lorentz sobre la misma $F_L = q v_R B$.

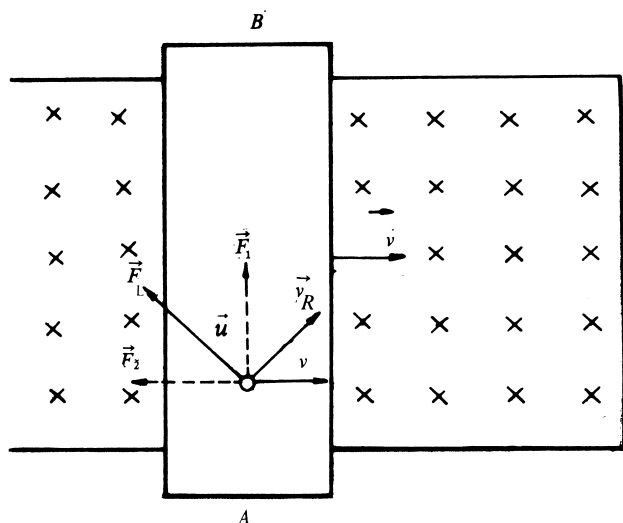


Fig. 8.29

La componente $\vec{F}_1$ de la fuerza de Lorentz es la que hace que los portadores libres se muevan a lo largo del conductor de A a B y la componente $\vec{F}_2$ está dirigida en contra del movimiento del conductor, por lo que para mantener su movimiento con velocidad v es preciso la existencia de una fuerza externa que compense a $\vec{F}_2$. Esta fuerza no se ha representado en la figura 8.29.

Durante el movimiento de los portadores libres de carga, de un extremo al otro del conductor, la componente $\vec{F}_1$ de la fuerza de Lorentz realiza el trabajo

$$W = F_1 l = q v B l$$

y como la fem de inducción es el trabajo realizado por la unidad de carga, entonces

$$\epsilon_i = \frac{W}{q} = v B l. \quad (8.11')$$

A esta ecuación para la fem inducida se puede llegar también aplicando directamente la ley de Faraday.

$$\text{Como } \varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

donde $\Delta \Phi = B \Delta S = B l \Delta x$.

como al cabo del tiempo Δt se tiene que $\Delta x = - v \Delta t$, entonces:

$$\Delta \Phi = - B l v \Delta t.$$

El signo menos indica que el flujo disminuye.

Por lo tanto:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{- B l v \Delta t}{\Delta t} = B l v$$

como se obtuvo anteriormente.

8.8 Autoinducción

Sabemos que cuando se hace variar el flujo magnético que atraviesa un circuito, en este se manifiesta el fenómeno de la inducción electromagnética.

Veamos ahora el caso de una bobina en un circuito por el que pase una corriente variable con el tiempo. En este caso, el flujo magnético que atraviesa la bobina variará, y se producirá una fem de inducción en el mismo conductor por el que pasa la corriente variable en el tiempo. Este fenómeno se llama *autoinducción*.

En la autoinducción, el circuito desempeña dos papeles:

- a) por él pasa la corriente que produce la inducción;
- b) en el mismo aparece la fem inducida.

Ahora, ¿cuál es la causa de la fem inducida?

El campo magnético variable induce una fem en el mismo conductor por el cual pasa la corriente asociada a dicho campo, pues, como, recordaras, un cambio en el campo magnético debe estar acompañado de la aparición de un campo eléctrico inducido.

Por la ley de Lenz, en el instante en que la corriente aumenta, la intensidad del campo eléctrico rotacional inducido está dirigido en sentido contrario al de la corriente (y al del campo eléctrico de la fuente). Por lo tanto, en este instante, el campo eléctrico rotacional se opone al aumento de la corriente (fig. 8.30 a). En el instante que la corriente disminuye, al contrario, el campo eléctrico rotacional la mantiene (fig. 8.30b).

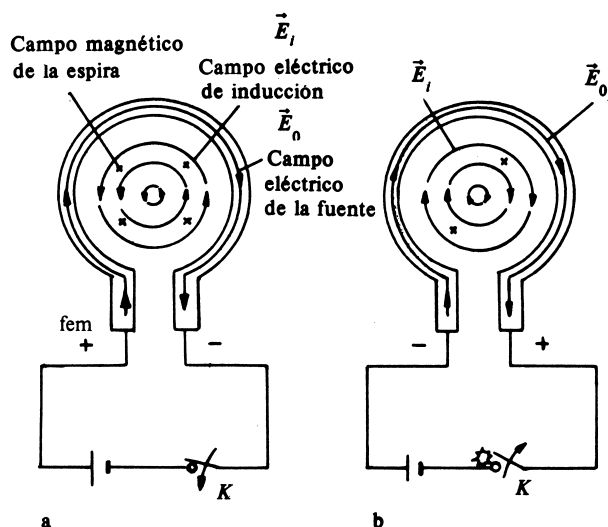
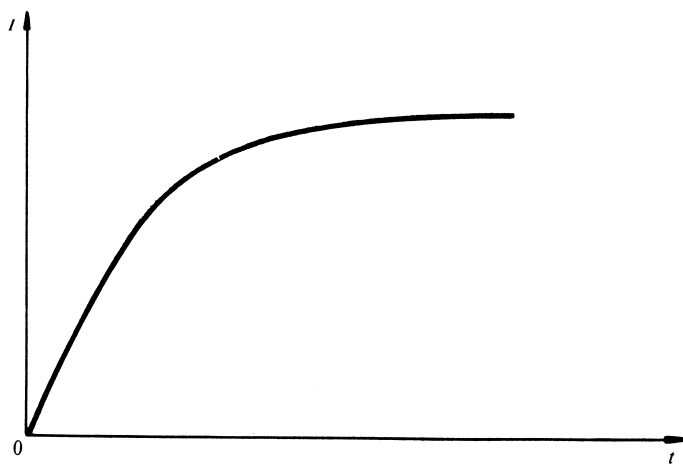


Fig. 8.30

Esto explica el hecho de que, al cerrar un circuito en el cual existe una fem constante, no se establece de inmediato un valor determinado de la intensidad de la corriente, sino que se demora un tiempo en alcanzarlo (fig. 8.31a).

Por otra parte, cuando se desconecta la fuente, la corriente en el circuito cerrado no cesa en el mismo instante (fig. 8.31b).

En este momento, como ya vimos, la fem de autoinducción es mayor que la de la fuente, pues la variación de la corriente y de su campo magnético, al desconectar la fuente, se produce con mucha rapidez.



a

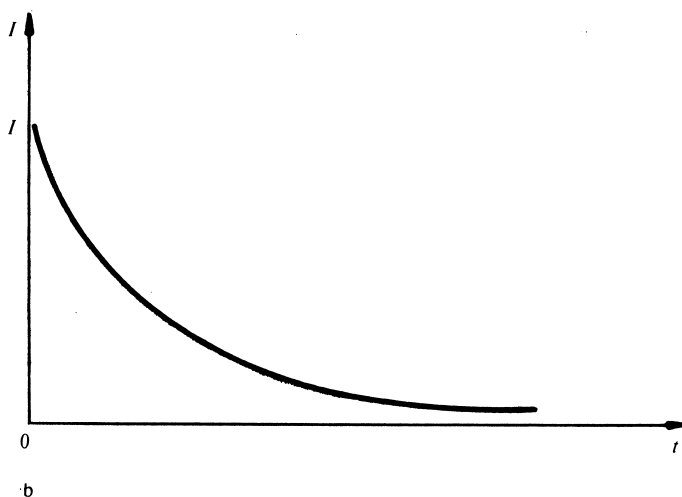


Fig. 8.31

El fenómeno de la autoinducción puede observarse en un experimento muy simple. La figura 8.32 muestra el esquema de la conexión en paralelo de dos lámparas iguales. Una de ellas se conecta a la fuente a través de la resistencia R , y la otra, en serie con la bobina L , que está provista de un núcleo de hierro. Cuando se cierra el interruptor K , la primera lámpara se enciende prácticamente en el acto. En cambio, la segunda lo hace con un retraso apreciable. La fem autoinducida en el circuito de esta lámpara es grande y la intensidad de la corriente no alcanza inmediatamente su valor máximo.

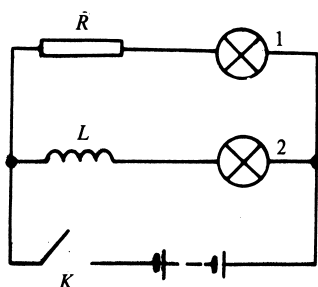


Fig. 8.32

En la figura 8.33 se presenta el esquema de un circuito que permite observar la aparición de la fem autoinducida al desconectarlo. Cuando se abre el interruptor K , en la bobina L se produce una fem autoinducida

que mantiene la corriente inicial. Como resultado, en el instante de la apertura a través del galvanómetro pasa corriente (flecha discontinua) en sentido contrario al de la corriente que había antes (flecha continua). La intensidad de la corriente al abrir el circuito puede ser mayor que la de la corriente que pasaba por el galvanómetro cuando el interruptor estaba cerrado. Esto significa que

$$\varepsilon_{\text{autoinducción}} > \varepsilon_{\text{de la fuente}}$$

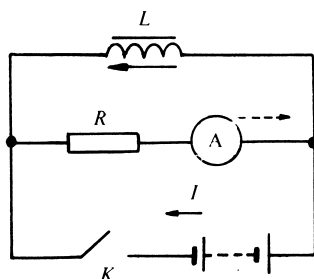


Fig. 8.33

Tareas

17. Explica con tus palabras el fenómeno de la autoinducción.
18. ¿Qué sentido, respecto al de la corriente, tiene el campo eléctrico rotacional en un conductor cuando la intensidad de la corriente aumenta y cuándo disminuye?
19. En Mecánica estudiamos que la velocidad de un cuerpo no cambia de forma instantánea. Ahora hemos visto que, a causa de la autoinducción, al cerrar el circuito la intensidad de la corriente no adquiere en el acto un valor determinado, sino que va aumentando poco a poco y, cuando la fuente se desconecta, la corriente no se interrumpe inmediatamente. ¿Qué analogía existe entre ambos casos?

8.9 Inductancia

La autoinducción es un caso particular del fenómeno de la inducción electromagnética. La fem de autoinducción es una consecuencia de la variación del propio flujo de un circuito. Esta variación es producida, generalmente, por la variación de la corriente del circuito.

Analicemos de qué depende el valor de la fem de autoinducción.

Sabemos que el módulo de la inducción magnética (B) asociada a una corriente, es proporcional a la intensidad de esa corriente. Como el flujo magnético Φ es proporcional a B , entonces:

$$\Phi \sim B \sim I$$

Por consiguiente, se puede afirmar que:

$$\Phi = LI \quad (8.12)$$

donde L es el coeficiente de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente en el circuito conductor y el flujo magnético, creado por ella, que atraviesa dicho circuito. Esta magnitud, L , recibe el nombre de *inductancia* del circuito.

Utilizando la ley de la inducción electromagnética y la expresión 8.12, se obtiene la igualdad:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (8.13)$$

Entonces, podemos afirmar que la inductancia es una magnitud física, numéricamente igual a la fem de autoinducción que se produce en un circuito cuando la intensidad de la corriente varía 1 A en 1 s.

La inductancia, como la capacidad eléctrica, depende de factores geométricos, es decir, de las dimensiones del conductor y de su forma.¹

La unidad de inductancia en el S.I. se denomina henry (H), y se define como la inductancia de un conductor es igual a 1 H si, cuando la intensidad de la corriente varía 1 A en 1 s, se produce en él una fem autoinducida de 1 V. Es decir:

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

Problema resuelto

1. Determina la inductancia de una bobina en la cual, al variar la intensidad de la corriente 0.04 A durante 0.02 s, se induce una fem de 40 V.

Solución

En este problema se debe determinar la inductancia de una bobina en la cual tiene lugar el fenómeno de la autoinducción.

¹ En realidad, todo circuito eléctrico posee cierta inductancia, incluso los conductores rectilíneos; sin embargo, los enrollados, como las bobinas y los solenoides, poseen inductancia de valores elevados. En estos dispositivos L depende del número de espiras, no de la intensidad de la corriente en él. Además de la geometría, la inductancia también depende de las propiedades magnéticas del medio en que se encuentra.

Conocemos que:

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Despejando L , obtenemos:

$$L = \varepsilon_i \frac{\Delta t}{\Delta I}$$

Sustituyendo los valores numéricos, nos queda:

$$L = \frac{40 \text{ V} \cdot 0,02 \text{ s}}{0,04 \text{ A}}$$

$$L = 20 \text{ H}$$

TRABAJO DE LABORATORIO 11 Fenómenos de autoinducción

Instrumentos y materiales: Bobina de 500 espiras, núcleo en forma de U, núcleo en forma de I, reóstato 0-50 Ω , interruptor de cuchillas, fuente de corriente (equipo básico), 10 cables de conexión, 4 tableros receptáculos de dispositivos eléctricos intercambiables, 2 lámparas de incandescencia de 1,8 V y 0,2 A, lámpara de destello.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito como el representado en la figura 8.34. En esta, L representa la bobina de 500 espiras que se encuentra colocada en el núcleo en forma de U, el cual está cerrado magnéticamente por el núcleo en forma de I.

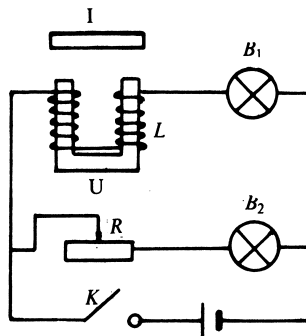


Fig. 8.34

2. Cierra el interruptor K . Desplaza el cursor del reóstato hasta que la iluminación sea idéntica en ambas lámparas.
3. Abre el interruptor. Cierra el interruptor y observa qué sucede en el circuito. Repite varias veces esta operación. Explica las causas de las diferencias momentáneas que se producen en las iluminaciones de las lámparas al cerrar el interruptor.
4. Monta un nuevo circuito como el representado en la figura 8.35.

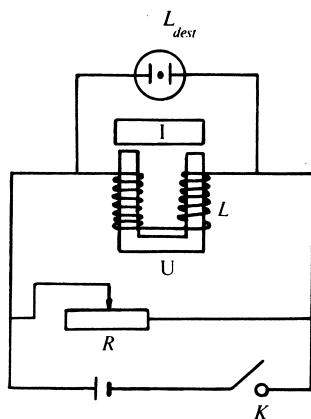


Fig. 8.35

5. Toma la lámpara de destellos y comprueba que esta no se ilumina con las tensiones de salida que posee la fuente con que se está trabajando. Conecta posteriormente la lámpara en paralelo con la bobina. Cierra el interruptor y después ábrelo. Repite el experimento. Explica sus resultados.
6. Al circuito de la figura 8.35 instálale una lámpara en serie, con L . Con el interruptor K abierto, separa el núcleo I del núcleo U . Cierra el interruptor. Desplaza el cursor del reóstato hasta un valor tal que las lámparas brillen muy débilmente. Cierra el circuito magnético al colocar el núcleo I sobre el núcleo U . Luego separa el núcleo I . Repite el experimento. ¿Qué se aprecia en la iluminación de la lámpara al colocar y quitar el núcleo I ?
7. Añade al circuito un portaelementos con una pila seca de 1,5 V. Observa que en dependencia de la forma en que se coloque la pila en el circuito la lámpara se comportará en forma semejante a como cuando se colocaba o quitaba el núcleo I . Determina la polaridad de la fem inducida en el inducido, al poner y quitar el núcleo. Haz las representaciones necesarias en un esquema semejante al de la figura 8.35.

Tareas

20. Explica con tus palabras a qué se llama inductancia de un conductor.
21. ¿En qué unidades se mide la inductancia?
22. ¿A qué es igual la fem de autoinducción?
23. Observa el circuito y el gráfico de I en función de t de las figuras 8.36 respectivamente. Establece la diferencia entre el comportamiento de las gráficas 1 y 2 y sus causas.

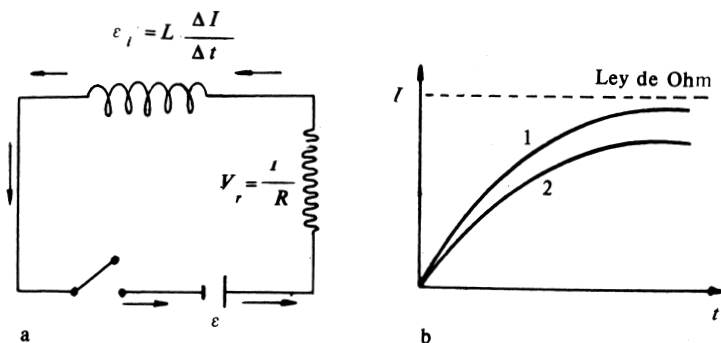


Fig. 8.36

24. Si se desconecta el interruptor del circuito anterior, ¿cómo crees que será la gráfica de I en función de t ? Explica tu respuesta.
25. En mecánica definimos la masa como la medida de la inercialidad, es decir, la medida de la oposición al cambio de la velocidad del cuerpo. Ahora, podemos interpretar L como la medida de la oposición a la variación de la corriente. ¿Existe una analogía entre ambas magnitudes? Discute esta idea.
26. Discute y compara las siguientes analogías mecánicas y electromagnéticas.

Magnitudes mecánicas

velocidad (v)

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Magnitudes electromagnéticas

Intensidad de corriente (I)

$$\varepsilon_i = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

8.10 Energía del campo magnético de una corriente

Durante el estudio de los capítulos 7 y 8, se ha evidenciado que todo campo magnético debe poseer cierta cantidad de energía, pues son capaces de realizar un trabajo (por ejemplo, cuando actúan sobre una aguja

magnética o un imán y los pone en movimiento). ¿Cómo podemos determinar la energía que posee el campo magnético de una corriente de intensidad I ?

Supongamos que tenemos el circuito eléctrico que se representa en la figura 8.37. Cuando se cierra el interruptor K , la corriente comienza a circular por el circuito. Para que esto suceda, la fuente ε tiene que realizar cierto trabajo, parte del cual se disipa en forma de calor en el resistor R ; el resto se utiliza para vencer la oposición que ofrece la fem de autoinducción que aparece en la bobina. Es precisamente esta última la cantidad de energía que posee el campo magnético que rodea el circuito. (Una vez que se establece un valor constante de la intensidad de la corriente, la energía de la fuente solo se consume en el desprendimiento de calor. En estas condiciones, la energía de la corriente ya no varía.¹

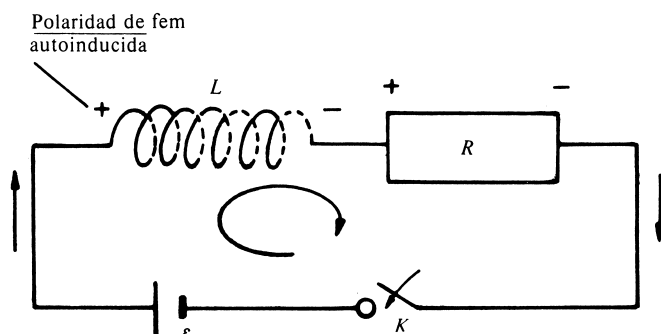


Fig. 8.37

Exactamente lo mismo sucede, como recordarás, para hacer que un automóvil (fig. 8.38), partiendo del reposo, adquiera una velocidad constante v . Para ello hay que realizar un trabajo igual a $1/2 mv^2$. Al principio, parte del trabajo realizado por el motor se gasta en vencer el rozamiento y parte en aumentar la velocidad del vehículo. Cuando v es igual a una constante, todo el trabajo del motor se gasta en vencer el rozamiento, mientras que la energía cinética del automóvil no varía.

Ya hemos discutido en las tareas 25 y 26 que existe cierta analogía entre la masa y la inductancia. La inductancia desempeña el mismo papel en electrodinámica que la masa cuando se quiere variar la velocidad de un cuerpo en mecánica. El análogo de la velocidad del cuerpo es, en electrodinámica, la intensidad de la corriente I , como magnitud física que caracteriza el movimiento de la partícula cargada.

¹ Sólo se transforma la energía eléctrica del circuito en energía del campo magnético, o viceversa, durante el tiempo en que la corriente varía. Cuando la corriente se hace constante ($\Delta I = 0$), la energía del campo magnético es constante.

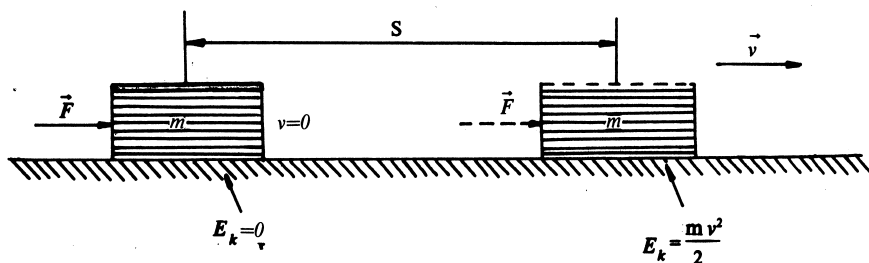


Fig. 8.38

Guiándonos por esta idea, entonces la energía del campo magnético de una corriente se puede escribir como una magnitud física semejante a la energía cinética del cuerpo en mecánica $\frac{1}{2}mv^2$. De forma que:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} LI^2$$

Tareas

27. Demuestra que $\frac{1}{2} LI^2$ se expresa en unidades de energía.
28. Compara la expresión matemática que mide la energía del campo electrostático de un condensador, con la energía magnética de una bobina.
29. Tenemos un condensador de $10 \mu\text{F}$ con una tensión en sus placas de 20 V. Compara la energía del condensador con la energía de una bobina de inductancia $L = 10 \text{ H}$, por la que circula una corriente de 20 A.
30. ¿Dónde se almacena la energía de la corriente eléctrica?

Tareas generales del capítulo

1. ¿En qué consiste el fenómeno de inducción electromagnética?
2. Describe un experimento donde se manifieste el fenómeno de la inducción electromagnética.
3. Escribe y discute la ecuación para calcular el flujo de inducción magnética.
4. En el campo magnético cuyas líneas de inducción magnética vienen representadas en la figura 8.39, se mueve un conductor a la velocidad v . Determine el sentido de la corriente de inducción en el conductor.

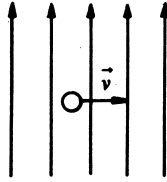


Fig. 8.39

5. El imán de la figura 8.40 se mueve saliendo de la bobina. Determina el sentido de la corriente inducida en la bobina.

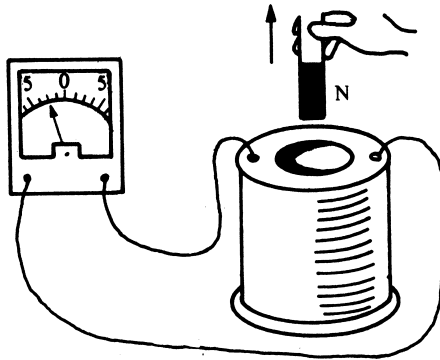


Fig. 8.40

6. Representa, en la figura 8.41 las líneas del campo magnético producido por la corriente inducida cuando el imán se acerca a la bobina. La aguja del galvanómetro G indica el sentido representado.

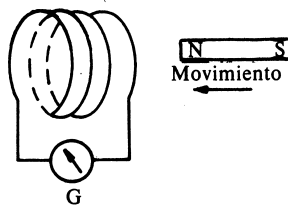


Fig. 8.41

7. El interruptor representado en la figura 8.42 se acaba de cerrar. La corriente en la bobina inferior está dirigida en sentido contrario del movimiento de las manecillas del reloj. Si se observa desde arriba, ¿cuál será el sentido de la corriente en la bobina superior si esta se mueve hacia abajo?

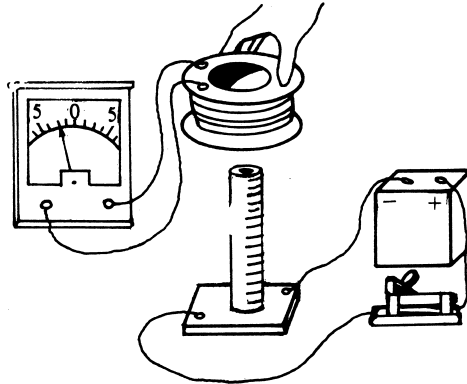


Fig. 8.42

8. Representa el sentido de la corriente inducida en la bobina B al cerrarse el interruptor K , como se muestra en el esquema de la figura 8.43.

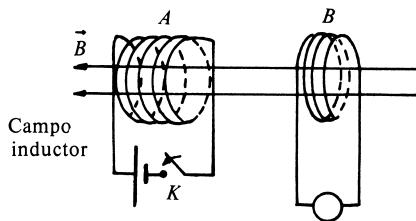


Fig. 8.43

9. Un aro metálico puede moverse libremente en el núcleo de una bobina conectada a un circuito de corriente directa (fig. 8.44). ¿Qué ocurre en los momentos en que se abre y cierra el circuito?

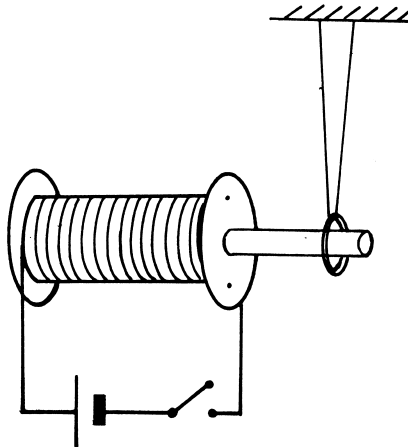


Fig. 8.44

10. ¿Cómo será necesario desplazar el imán permanente, respecto a la bobina, para que la aguja magnética gire como se indica en la figura 8.45.

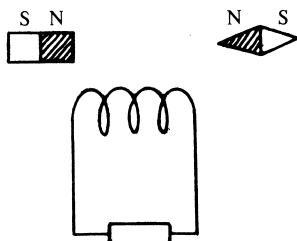


Fig. 8.45

11. Dos imanes iguales comienzan a caer al mismo tiempo desde la misma altura, a través de unos anillos conductores fijos. El primer imán cae a través de un anillo conectado, y el segundo a través de un anillo desconectado. ¿Qué imán caerá antes? ¿Por qué?
12. Una barra imantada cae a través de una espira metálica circular (fig. 8.46).
- a) Describe las variaciones, en magnitud y dirección, de la corriente inducida en la espira cuando el imán cae a través de ella.
- b) Despreciando la resistencia del aire, ¿será constante la aceleración de la barra imantada durante su caída?

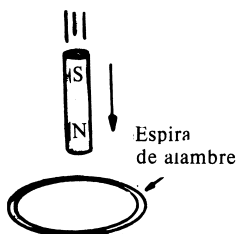


Fig. 8.46

13. Una espira rectangular de alambre de cobre se deja caer entre los polos de un imán (fig. 8.47). Describe cualitativamente el movimiento de la espira. Desprecia el razonamiento del aire.
14. El esquema de la figura 8.48 representa una bobina (A), conectada a un galvanómetro (B) y un imán (C), que se desplaza hacia la bobina como indica la flecha discontinua. Al mover el imán en la dirección indicada, en la bobina se induce una fem cuya polaridad da lugar a que circule una corriente de intensidad I en el sentido que se

indica. A partir de la ley de conservación de la energía, justifica que el sentido de la corriente inducida en la bobina sea el indicado.

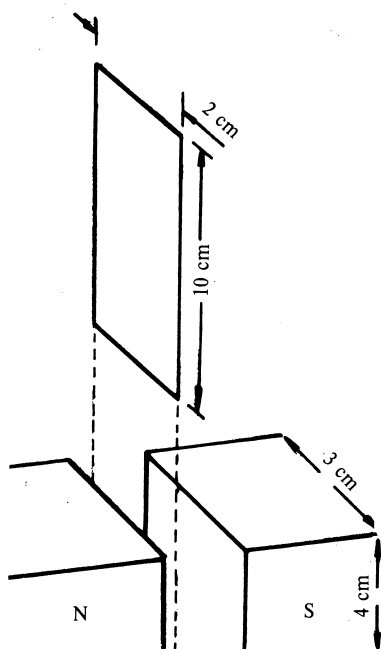


Fig. 8.47

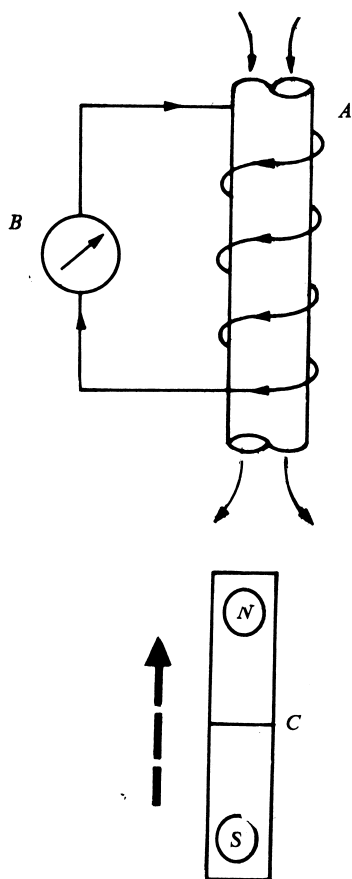


Fig. 8.48

15. Halla la rapidez de variación del flujo magnético en un solenoide de 200 espiras, si en él se produce una fem de inducción de 100 V.
16. Calcula la variación del flujo del vector inducción magnética $\Delta\Phi$, en el interior de un solenoide de 0,25 m, de sección transversal interior de $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ y 4 000 espiras, al variar la corriente que por él pasa desde 2 hasta 30 A.
17. Calcula la fem inducida ($\mathcal{E}_i$) en una bobina de 2 000 vueltas que cabe justamente en el interior de un solenoide de 12 mm de radio, si la va-

riación del flujo en el interior de este último es de $2,8 \cdot 10^{-4}$ Wb, en:

- a) 1 s
- b) 0,1 s
- c) 0,01 s

18. Un flujo magnético, que varía con una rapidez $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ de $-0,24$ Wb/s, atraviesa las espiras de una bobina. Debido a esto, se induce en ella una fem de inducción igual a 12 V. Determina el número de espiras de la bobina.
19. ¿Al cabo de qué tiempo debe variar el flujo magnético en 0,04 Wb para que, en el contorno abarcado por este flujo, se cree una fem de inducción de 16 V?
20. Demuestra que, si un conductor de longitud l se mueve con velocidad v cortando las líneas de inducción de un campo magnético uniforme, sobre sus extremos se crea una diferencia de potencial U cuyo valor puede expresarse por la relación $U = vBl \sin \theta$.
21. Un avión vuela horizontalmente con una velocidad de 900 km/h. Halla la diferencia de potencial aparecida entre los extremos de sus alas si el valor de la componente vertical del vector inducción magnética del campo magnético terrestre es $5 \cdot 10^{-5}$ T, y la longitud de las alas es 12 m.
22. ¿Cuál es la inducción de un campo magnético si un conductor que se mueve en él con una velocidad de 10 m/s, perpendicular a las líneas de inducción y con una longitud es de 50 cm, produce una fem de inducción de 1,5 V?
23. Un conductor se desplaza con una velocidad de 6 m/s perpendicularmente a las líneas de inducción de un campo magnético. Como resultado de esto, se genera en el conductor una fem de inducción $\varepsilon_i = 1,44$ V. La longitud del conductor es de 1,8 m. Calcula la inducción magnética B del campo. Confecciona un esquema del problema e indica la dirección y sentido de B , así como la polaridad de ε_i en el conductor.
24. ¿Con qué velocidad es necesario mover un conductor que tiene una longitud de 1 m y forma un ángulo de 60° con las líneas de inducción de un campo magnético cuya inducción es de 0,2 T para que en el conductor se produzca una fem de inducción de 3 V.
25. Un alambre de 0,5 m de longitud corta las líneas de inducción magnética de un campo magnético a una velocidad de 5 m/s (fig. 8.49). La inducción magnética del campo es de 5 T. Determina la intensidad de la corriente que fluye por el conductor si se sabe que la resistencia R es de 40 Ω .

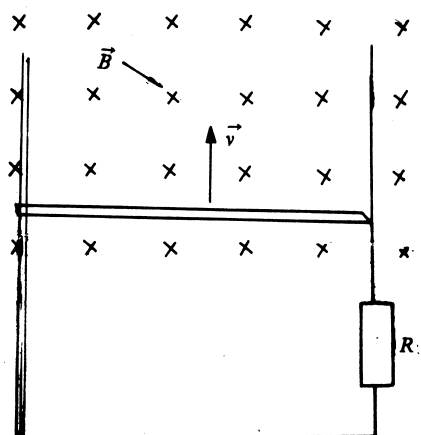


Fig. 8.49

26. En un campo magnético uniforme se mueve, perpendicularmente a las líneas de inducción, un conductor de $0,08\text{ m}$ a una velocidad de 4 m/s (fig. 8.50). La inducción magnética del campo es de 5 T . Determina el valor de la fem de inducción en el conductor y la resistencia del circuito si bajo la acción de la fem generada en el circuito la corriente es de 5 A .

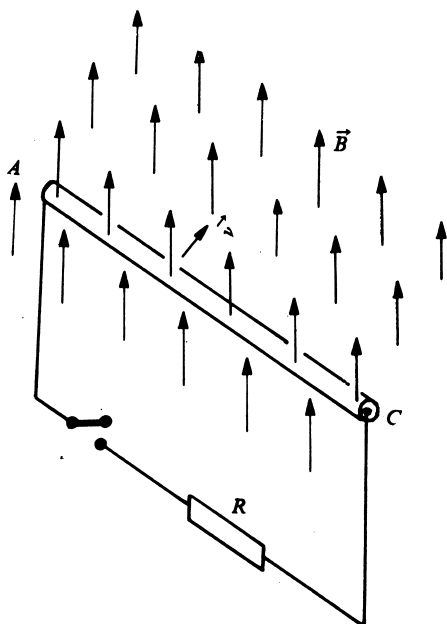


Fig. 8.50

27. Un conductor de longitud l puede deslizarse sin fricción por los conductores AB y CD , unido por un resistor R (fig. 8.51), en un campo magnético uniforme cuyo vector de inducción, $\vec{B}$, es perpendicular al plano del contorno. ¿Qué fuerza es necesaria aplicar al conductor para que se mueva uniformemente con una velocidad $\vec{v}$?

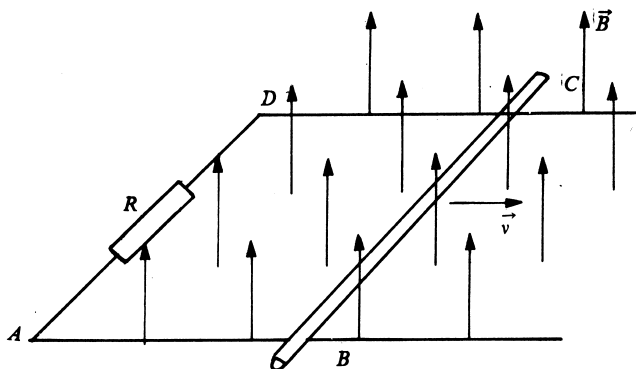


Fig. 8.51

28. La corriente en una bobina crece proporcionalmente con el tiempo (fig. 8.52). ¿Cuál será el carácter de la dependencia de la corriente con el tiempo en otra bobina inductivamente enlazada con la primera?

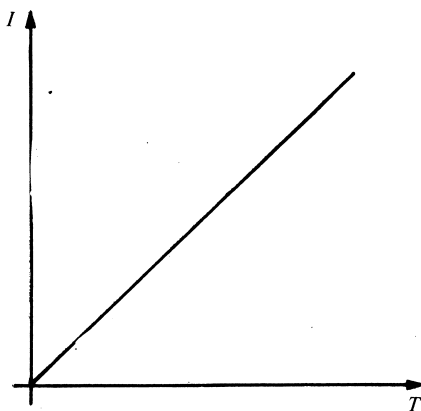


Fig. 8.52

29. ¿Cuál será la inductancia L de una bobina sin núcleo, con 13 espiras, si el área de su sección transversal es de $0,002 \text{ m}^2$ y su longitud de $0,6 \text{ m}$?

30. Calcula la fem inducida (ε_i) y la inductancia L de un solenoide de 0,25 m de longitud, 4 000 espiras y $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ de sección transversal, al que se le ha variado uniformemente la intensidad de la corriente desde 2 hasta 30 A en 0,02 s.
31. Determina la inductancia de un solenoide que tiene un devanado de 150 espiras si, al variar la intensidad de la corriente que pasa por él en 30 mA, su flujo cambia en 0,05 Wb.
32. Calcula la energía del campo magnético que adquiere una bobina de inducción $L = 0,5 \text{ H}$, para una corriente que varió uniformemente desde 0 hasta 2 A en 0,5 s.
33. En una bobina con una inductancia de 0,15 H y una resistencia r pequeña, existe una corriente de 4 A. En paralelo con la bobina se conecta una resistencia $R \gg r$. ¿Qué cantidad de calor se desprende de la bobina y de la resistencia después de una rápida desconexión de la fuente de corriente?

Capítulo 9

OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

9.1 Oscilaciones electromagnéticas libres

Analicemos el circuito representado en la figura 9.1. Si el interruptor S se encuentra en la posición 1 mucho tiempo, el condensador C se cargará con una carga $Q = CU_c$, donde $U_c = \varepsilon$ es la tensión entre las placas del condensador.

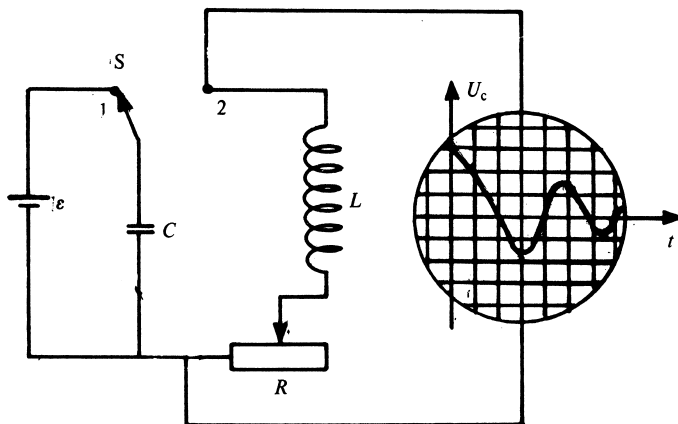


Fig. 9.1

Mediante el osciloscopio conectado a las placas del condensador, podemos observar el comportamiento de la tensión entre sus placas, al conmutar el interruptor S a la posición 2. Para determinados valores de C , R y L , se obtiene un oscilograma como el representado en la figura 9.1, el cual indica que la tensión oscila de forma aproximadamente periódica, y que su amplitud va disminuyendo desde el valor máximo ($U_c = \varepsilon$) hasta que se anula.

Como la carga del condensador es $Q = CU_c$ y C es constante, el valor de la carga del condensador varía de forma igual que la tensión (fig. 9.2).

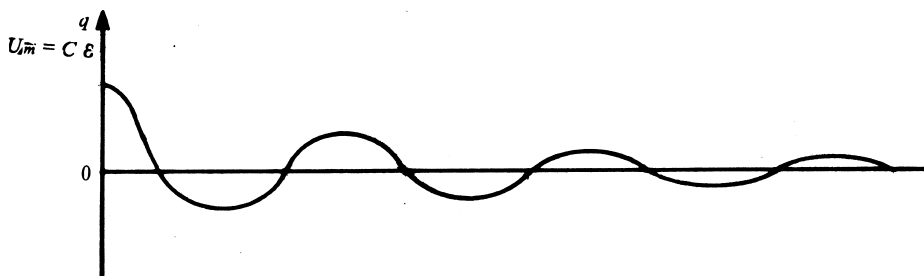


Fig. 9.2

Tenemos, pues, que en la parte del circuito compuesta por el resistor, la bobina y el condensador (circuito que en lo adelante denominaremos *RLC*), se producen *oscilaciones electromagnéticas amortiguadas*. Como en este caso ningún agente externo interviene suministrándole energía al circuito, estas oscilaciones se denominan *oscilaciones electromagnéticas libres*.

A medida que se disminuye la resistencia del resistor R , la amplitud de las oscilaciones de la tensión U_c y de la carga Q (o sea, de el valor máximo que pueden tomar estas magnitudes), disminuye cada vez menos y la periodicidad de las oscilaciones es cada vez más exacta, como se puede apreciar en los oscilogramas de la figura 9.3.

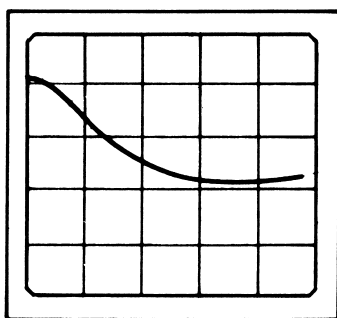
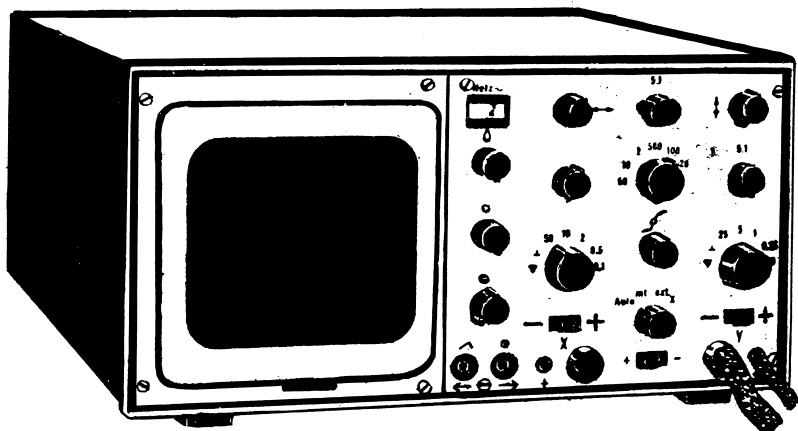
En el caso ideal en que $R = 0$ (no debemos olvidar que tanto los conductores que forman el circuito como los de la bobina tienen resistencia), las oscilaciones no se amortiguarán, y el oscilograma tendrá la forma que se representa en la figura 9.4. En la práctica esto se obtiene con muy buena aproximación para valores muy pequeños de la resistencia del circuito e intervalos cortos de tiempo.

Antes de iniciar el estudio cuantitativo de este fenómeno, analicemos desde el punto de vista físico, cómo se producen las oscilaciones electromagnéticas libres.

Comencemos nuestro estudio por el caso más simple: $R = 0$. Consideraremos que el circuito está formado solamente por una bobina ideal (de resistencia despreciable) y un condensador. Este circuito, en lo adelante, será denominado *circuito LC*.

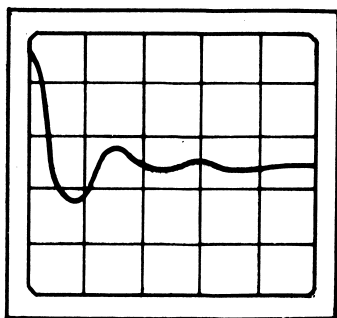
En el instante inicial, cuando el interruptor S del circuito mostrado en la figura 9.1 se lleva a la posición 2, toda la energía del sistema se encuentra en el campo electrostático del condensador; por el circuito no circula corriente, pues en la bobina aparece una fuerza electromotriz autoinducida que se opone a su circulación (fig. 9.5a). La corriente, a partir de este instante, comienza a aumentar paulatinamente y parte de la energía se transfiere al campo magnético de la bobina (fig. 9.5b).

Según se descarga el condensador, disminuye la tensión entre sus placas y el incremento de la corriente es cada vez más lento. Por lo tanto, la fuerza electromotriz autoinducida va disminuyendo.



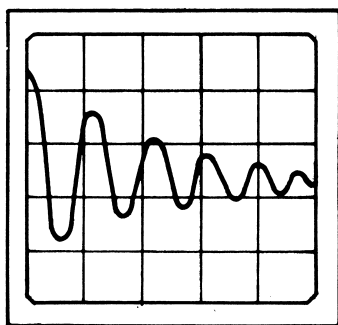
a

R



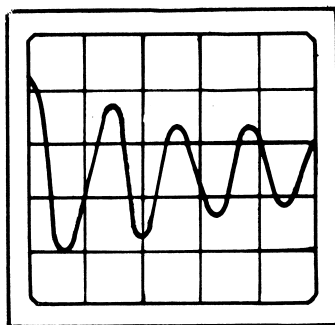
b

$R_1 < R$



c

$R_2 < R_1$



d

$R_3 < R_2$

Fig. 9.3

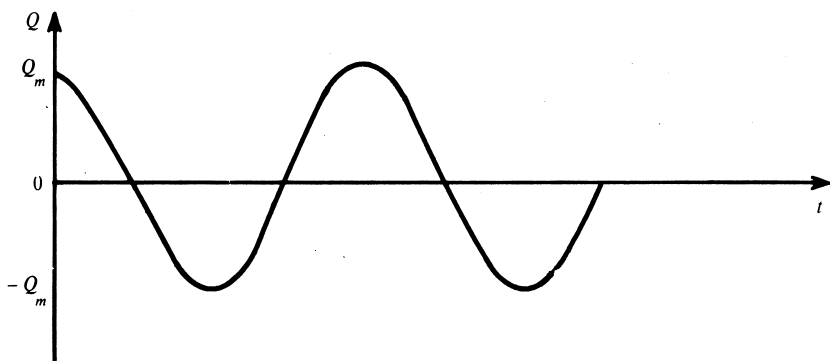


Fig. 9.4

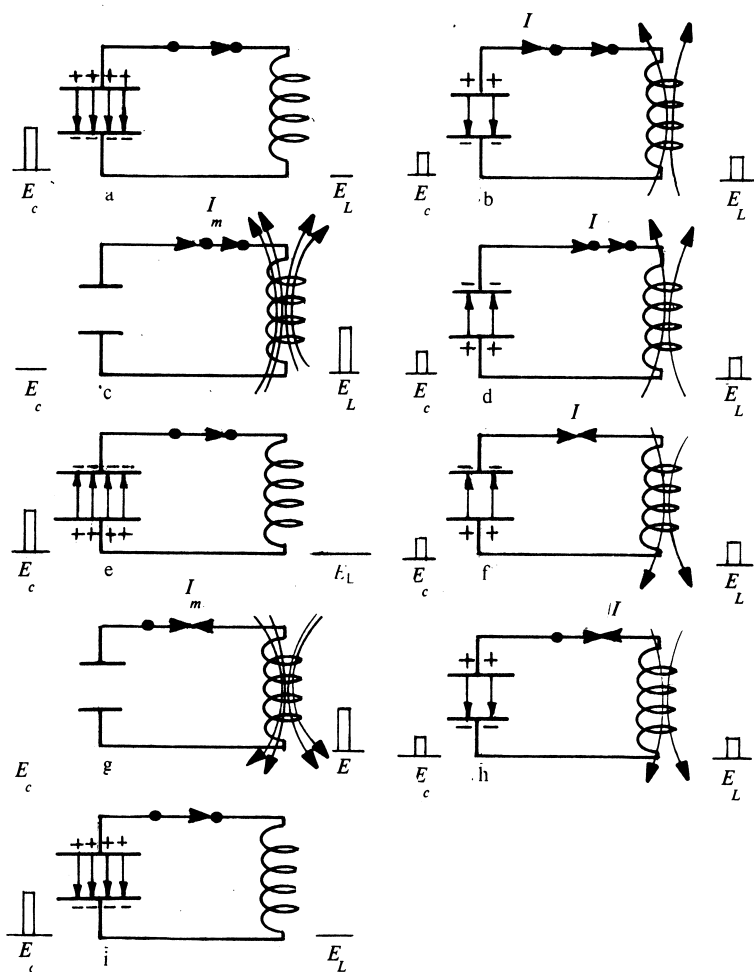


Fig. 9.5

Cuando el condensador se ha descargado totalmente, la energía del sistema se encuentra en el campo magnético de la bobina (fig. 9.5c). La corriente cesa de incrementarse y, de no existir la bobina disminuiría rápidamente hasta anularse. Pero, en estas circunstancias, en la bobina aparece una fuerza electromotriz autoinducida de sentido contrario a la inicial, de forma que se opone al cese de la corriente. Como consecuencia, el condensador comienza a cargarse nuevamente, esta vez con polaridad contraria a la inicial. Según su carga va aumentando, la corriente comienza a disminuir (fig. 9.5d).

Cuando el condensador se ha vuelto a cargar totalmente, es decir, cuando toda la energía del campo magnético de la bobina se ha transferido nuevamente al campo electrostático del condensador, la corriente se anula (fig. 9.5e). A partir de ese instante, el proceso se repite invirtiéndose el sentido de la corriente (fig. 9.5f, g, h, i). Posteriormente, todo el ciclo vuelve a comenzar nuevamente.

En condiciones reales, durante cada ciclo una parte de la energía se disipa en forma de calor en la resistencia del circuito, y la amplitud de las oscilaciones va disminuyendo hasta que estas cesan. Si la resistencia tiene un valor lo suficientemente elevado, ni siquiera se llegan a producir oscilaciones, pues la energía se disipa muy rápidamente (fig. 9.6).

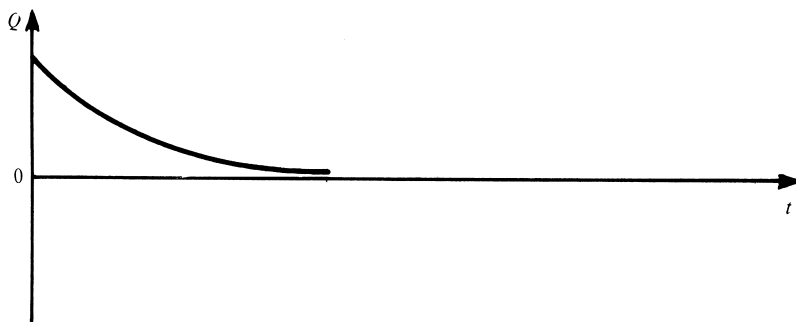


Fig. 9.6

Del oscilograma representado en la figura 9.4, se puede inferir que la carga en las placas del condensador varía en correspondencia con la ecuación:

$$q = Q_m \cos \omega t \quad (9.1)$$

donde $Q_m = C\varepsilon$ y $\omega = \frac{2\pi}{T}$

La ecuación para la intensidad de la corriente se puede obtener fácilmente, mediante un razonamiento basado en la analogía matemática que

existe entre las ecuaciones de las oscilaciones armónicas de cualquier naturaleza. La definición de intensidad de corriente se expresa matemáticamente por la ecuación:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Esta ecuación es análoga a la que define el valor de la velocidad de un cuerpo:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Por lo tanto, si cuando $x = A \cos \omega t$ se tiene que $v = -v_m \sin \omega t$, donde $v_m = \omega A$, entonces, cuando:

$$q = Q_m \cos \omega t$$

debe cumplirse que:

$$i = -I_m \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (9.2)$$

donde $I_m = \omega Q_m$.

La gráfica de la variación de la corriente en el circuito tendrá entonces la forma mostrada en la figura 9.7.

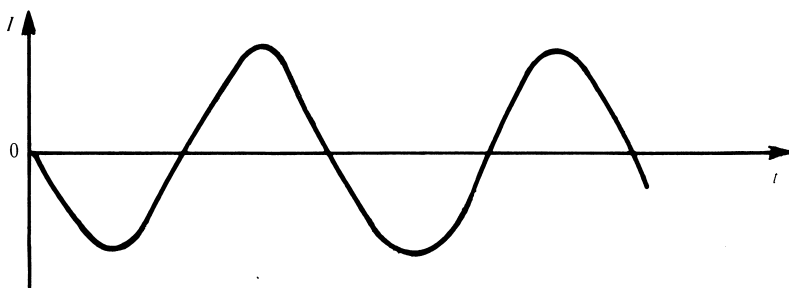


Fig. 9.7

Comparando la ecuación 9.1 con la 9.2, podemos apreciar que las oscilaciones de la intensidad de la corriente están adelantadas en $\pi/2$ a las oscilaciones de la carga.

Analicemos ahora de qué depende el periodo de las oscilaciones electromagnéticas.

El hecho de que el comportamiento energético de un oscilador electromagnético armónico es análogo al de un sistema mecánico oscilatorio

armónico, se deduce fácilmente a partir de las ecuaciones correspondientes para cada caso.

Para los sistemas mecánicos-oscilatorios se tiene, en general, que:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

y para un oscilador electromagnético (circuito LC):

$$E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2$$

donde $\frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ es la energía del campo electrostático del condensador, y $\frac{1}{2} LI^2$ es la energía del campo magnético de la bobina.

Como la magnitud q es análoga a la magnitud x , y la magnitud i a la v , entonces el término $\frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$, en las oscilaciones electromagnéticas, es análogo al término $\frac{1}{2} kx^2$ en las oscilaciones mecánicas. De igual forma, el término $\frac{1}{2} LI^2$ es análogo al $\frac{1}{2} mv^2$.

Las analogías anteriores nos permiten plantear que, en las oscilaciones electromagnéticas, el papel de la magnitud k lo desempeña la magnitud $1/C$, y el de m lo hace L .

Por lo tanto, como para las oscilaciones mecánicas $\omega = \sqrt{k/m}$, para las oscilaciones electromagnéticas se tiene que:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

y como $\omega = \frac{2\pi}{T}$, entonces:

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

y:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

En la tabla 9.1 se resume la analogía entre las magnitudes y las ecuaciones que caracterizan a los sistemas oscilatorios (armónicos) mecánicos y electromagnéticos.

Tabla 9.1

Sistema oscilatorio armónico simple	
mecánico	electromagnético
$x = A \cos \omega t$	$q = q_m \cos \omega t$
$v = -v_m \operatorname{sen} \omega t (v_m = \omega A)$	$i = -I_m \operatorname{sen} \omega t (I_m = \omega q_m)$
$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = -a_m \cos \omega t (a_m = \omega^2 A)$	$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -\omega^2 q_m \cos \omega t$
x	q
v	i
$E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$	$E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2$
$T = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$	$T = 2\pi \sqrt{LC}$
$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{k}}$	$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$

Tareas

1. ¿Por qué en condiciones reales las oscilaciones de un circuito LC se amortiguan?
2. Representa mediante un esquema las variaciones de la intensidad del campo electrostático entre las placas de un condensador, y de la inducción del campo magnético de una bobina. Supón que estos elementos conforman un circuito oscilante LC . Parte del caso en que el condensador está inicialmente cargado y haz las representaciones para un período completo a intervalos de $T/4$.
3. Para el caso de un circuito LC , escribe la ecuación de las oscilaciones de la carga en las placas del condensador, y de la intensidad de la corriente por el circuito. Di cual es el significado físico de los términos que aparecen en dichas ecuaciones. Considera que para $t = 0$ la carga en las placas del condensador tiene el valor máximo.

4. ¿Qué diferencia de fase existe entre las oscilaciones de la carga y de la intensidad de la corriente en un circuito LC ?
5. Construye una tabla con las magnitudes y ecuaciones que permiten caracterizar al movimiento mecánico armónico simple, y las que análogamente permiten caracterizar a las oscilaciones armónicas de carácter electromagnético.
6. Di cómo varía la frecuencia de un circuito LC , si:
 - a) su capacidad se triplica;
 - b) su inductancia se reduce a la mitad.

9.2 Oscilaciones electromagnéticas forzadas.

Corriente alterna

Si se desean mantener las oscilaciones en un circuito oscilante real, es preciso que se restituya la energía disipada a causa de la resistencia de los conductores que forman parte del circuito mediante un agente externo. En este caso estamos en presencia de *oscilaciones electromagnéticas forzadas*.

El caso más sencillo de oscilaciones forzadas en un circuito se tiene cuando se le suministra energía a un circuito RLC , mediante una fuente cuya fuerza electromotriz varía armónicamente. En estas condiciones, tanto la intensidad de la corriente como las diferencias de potencial en todos los componentes del circuito (y por consiguiente, la carga en el condensador), variarán según una ley seno o coseno, por lo que sus valores cambiarán periódicamente de valor y signo. El cambio de signo significa que se invierte el sentido de la corriente y de la polaridad en cada elemento. Por las características antes expuestas, a la corriente que circula por un circuito bajo este tipo de régimen forzado se le denomina *corriente alterna sinusoidal*.

Aunque existen y tienen múltiples aplicaciones las corrientes alternas no sinusoidales, nosotros limitaremos nuestro estudio a un análisis elemental del comportamiento de los circuitos por los cuales la corriente sea alterna sinusoidal. En lo adelante, los denominaremos simplemente *circuitos de corriente alterna*. A otros tipos de corriente alterna solamente nos referiremos de forma muy simple cuando sea necesario.

La práctica confirma que en los circuitos de corriente alterna tanto la intensidad de la corriente como las diferencias de potencial en los elementos que los componen varían armónicamente, y que sus oscilaciones no se encuentran en fase, con la excepción del caso del resistor (fig. 9.8).

Para comprender el comportamiento de los circuitos de corriente alterna, es fundamental conocer por qué se producen estas diferencias de fase entre las oscilaciones de la corriente y de las diferencias de potencial.

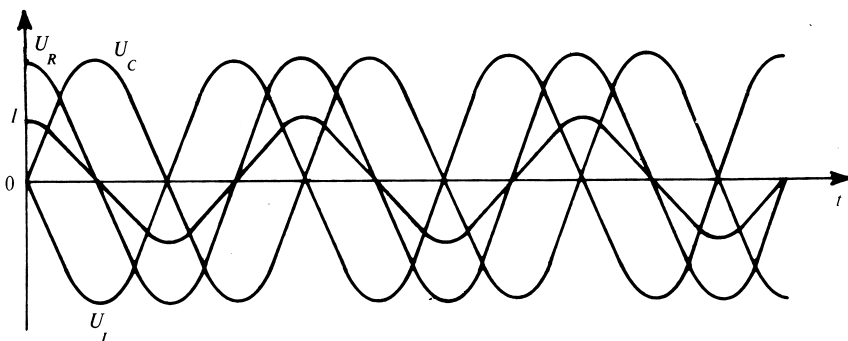


Fig. 9.8

Este estudio se puede realizar de manera sencilla si se analizan por separado los comportamientos de los resistores (circuito R), los condensadores (circuito C) y las bobinas, (circuito L) cuando son alimentados por fuentes de fuerza electromotriz alterna. Posteriormente se estudiará el comportamiento del circuito integrado por los tres elementos.

Circuito R

En el caso de un circuito R alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u(t) = U_m \cos \omega t$ (fig. 9.9a), la corriente que circula por el resistor será:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t$$

Por lo tanto, en este circuito las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión se encuentran en fase (fig. 9.9b).

Otra característica importante del circuito R es que en él tiene lugar una transformación irreversible de la energía de la corriente eléctrica en energía interna del resistor. En el resistor se disipa como calor una cantidad de energía por unidad de tiempo P , que se puede calcular, para cada instante utilizando la ecuación:

$$P = iu$$

por lo tanto:

$$P = I_m^2 R \cos^2 \omega t$$

En la figura 9.10 se representa la gráfica de la potencia en función de tiempo. A partir de esta, se puede apreciar que la energía disipada durante un período de la corriente alterna es igual al área del rectángulo cuya base es igual al período T y su altura la mitad de la potencia máxima P_m . Por lo tanto, la energía disipada en cada período es:

$$W = \frac{1}{2} P_m T = \frac{1}{2} I_m^2 R T$$

y la potencia disipada será:

$$\bar{P} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} P_m = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

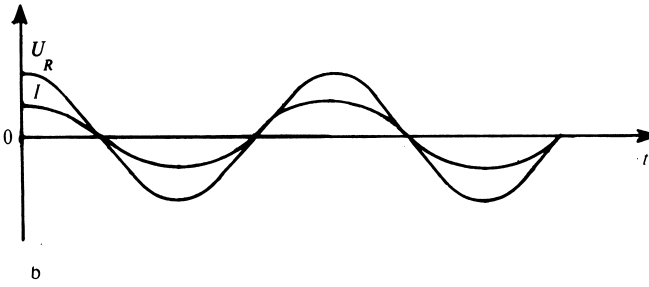
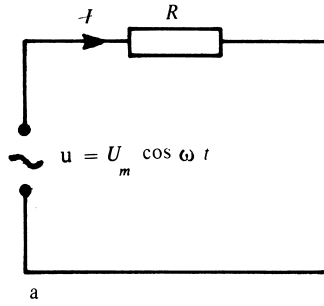


Fig. 9.9

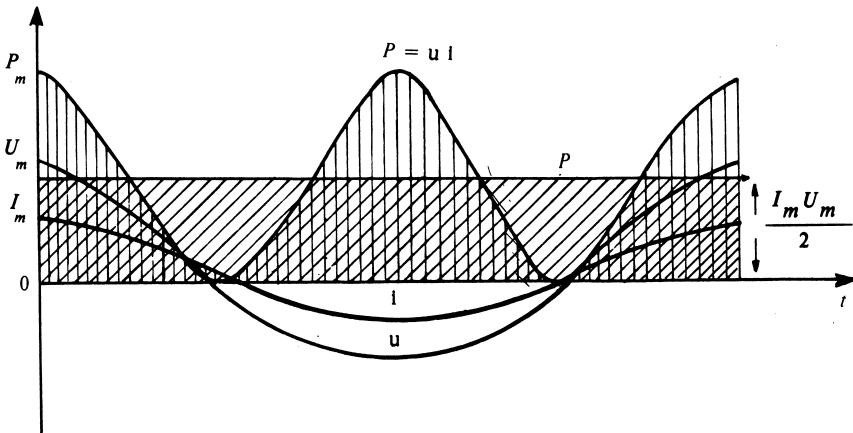


Fig. 9.10

Comparando la ecuación que permite calcular la potencia disipada en el resistor cuando por él circula corriente alterna, con la que se utiliza para la corriente directa, $P = I^2 R$, se obtiene que:

$$I^2 R = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

de donde:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Por consiguiente, una corriente alterna, de amplitud I_m , disipa la misma cantidad de energía que una corriente directa de intensidad $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. A esta magnitud se le denomina *intensidad eficaz*.

Como, en general, $U = IR$, para la tensión eficaz se tendrá que:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Círculo C

Analicemos primeramente el comportamiento de un circuito C de forma cualitativa y experimental.

Conocemos que si el circuito representado en la figura 9.11a fuera alimentado por una fuente de corriente directa, por él solo circularía corriente durante un pequeño intervalo de tiempo, hasta que se cargue el condensador, pues para la corriente directa el condensador se comporta como un circuito abierto, ya que entre sus placas se encuentra un material dieléctrico.

Sin embargo, la corriente alterna tiene la posibilidad de circular por un circuito en el cual se encuentra un condensador. Esto se verifica experimentalmente de manera sencilla: en el circuito de la figura 9.11a, el miliamperímetro registra el paso de la corriente.

La explicación física de cómo puede circular la corriente alterna por el circuito, a pesar de que entre las placas del condensador lo que hay es un dieléctrico, es muy sencilla. Lo que sucede es que el condensador se carga y se descarga periódicamente bajo la acción de la tensión alterna.

También se puede comprobar que mientras mayor sea la frecuencia del generador o la capacidad del condensador, mayor será el valor de la intensidad de la corriente indicada por el miliamperímetro.

Analicemos ahora como varía en el tiempo la intensidad de la corriente en este tipo de circuito. Si el circuito está alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u = U_m \cos \omega t$ se tendrá que, para cualquier instante:

$$U_m \cos \omega t = \frac{q}{C}$$

de donde:

$$q = U_m C \cos \omega t$$

y por lo tanto:

$$i = -\omega U_m C \sin \omega t$$

Haciendo $\omega U_m C = I_m$, nos queda:

$$i = -I_m \sin \omega t$$

o:

$$i = I_m \cos (\omega t + \pi/2)$$

Podemos concluir, entonces, que en un circuito C las oscilaciones de la intensidad de la corriente están adelantadas a las de la tensión en $\pi/2$ (fig. 9.11 b).

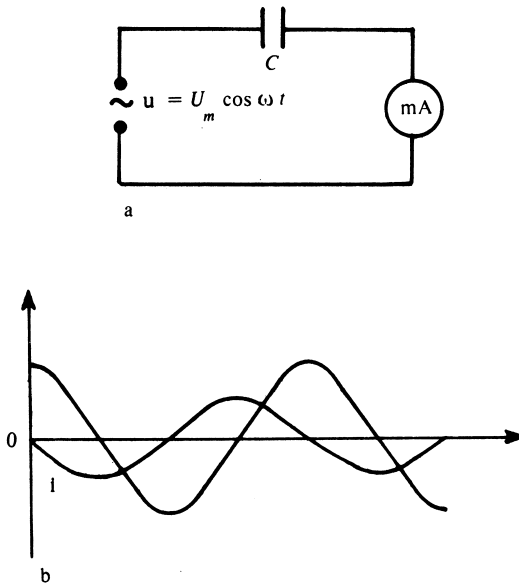


Fig. 9.11

Esta diferencia de fase entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión en un circuito C , puede ser observada experimentalmente introduciendo un resistor en el circuito C y registrando con un osciloscopio las variaciones de la tensión en el condensador y el resistor, pues las variaciones de la tensión en el resistor están en fase con las de la intensidad de la corriente.

El significado físico de esta diferencia de fases se comprende fácilmente: en el instante en que el condensador está completamente cargado y, por lo tanto, la tensión entre sus placas alcanza el valor máximo posible, el valor de la intensidad de la corriente tiene que ser cero. Por otra parte, cuando el capacitor está completamente descargado y, como consecuencia la tensión entre sus placas es cero, no ofrece ninguna oposición al estalecimiento de la corriente y la intensidad de la misma debe alcanzar su máximo valor posible.

Como para un circuito C se cumple que:

$$I_m = \omega C U_m$$

entonces la oposición que presenta al paso de la corriente alterna será $1/\omega C$. A esta magnitud se le denomina *reactancia capacitiva*, y su símbolo es X_c .

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Esta dependencia entre la reactancia capacitiva, la frecuencia y la capacidad, se puede comprobar experimentalmente variando la frecuencia del generador para condensadores de diferente capacidad.

Debemos señalar que en el caso de un circuito C , la oposición al paso de la corriente alterna no tiene el mismo carácter que en el caso de los resistores, en los cuales esta oposición, que en lo adelante llamaremos *resistencia activa*, está asociada a la disipación de energía en forma de calor. Como se puede apreciar en la figura 9.12, la potencia media entregada por el generador (o disipada por el circuito) es cero. Este comportamiento energético del circuito C se debe a que, en cada período, el condensador consume energía durante el proceso de carga y la restituye durante el de descarga.

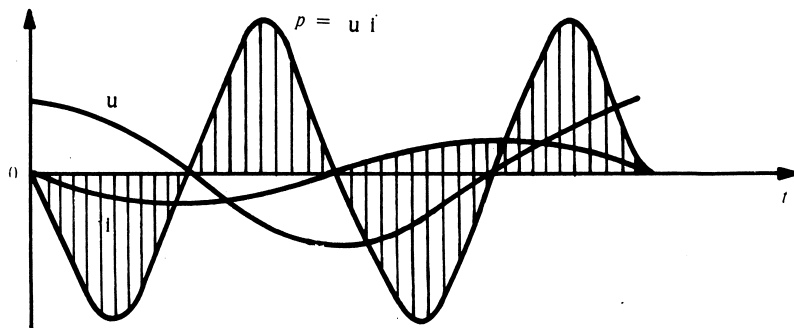


Fig. 9.12

Circuito L

Al igual que en el caso anterior, comencemos analizando de forma cualitativa y experimental el comportamiento de un circuito L (fig. 9.13a).

Si este circuito fuera alimentado mediante una fuente de corriente directa, el valor de la intensidad de la corriente solo dependería del valor de la tensión aplicada y de la resistencia activa de los conductores que conforman la bobina. Pero si la fuente de alimentación es alterna, y genera una tensión de igual valor eficaz, la lectura del miliamperímetro (es decir, el valor de la corriente eficaz) es menor. También se puede comprobar experimentalmente que, a medida que se aumenta la frecuencia o la inductancia de la bobina, el valor de la intensidad de la corriente decrece proporcionalmente.

Este comportamiento del circuito L cuando es alimentado por una fuente de tensión alterna, se puede interpretar físicamente con facilidad si recordamos que como en este caso la corriente es variable, el fenómeno de la autoinducción que se produce en la bobina se opone a tales variaciones.

Analicemos ahora como varia la intensidad de la corriente en este tipo de circuito. Si es alimentado por una fuente que genera una tensión de la forma $u = U_m \cos \omega t$, se tendrá, para cualquier instante, que:

$$U_m \cos \omega t = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

por lo tanto:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -\frac{U_m}{L} \cos \omega t$$

Multiplicando y dividiendo esta ecuación por ω^2 , queda que:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -\frac{\omega^2 U_m \cos \omega t}{\omega^2 L}$$

Como ya conocemos, si $\Delta i / \Delta t$ viene dado por una ecuación de la forma anterior, entonces la ecuación para i tendrá la forma:

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \operatorname{sen} \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$i = I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

donde:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}$$

Podemos concluir entonces que, en un circuito L , las oscilaciones de la intensidad de la corriente están atrasadas respecto a las de la tensión en $\frac{\pi}{2}$ (fig. 9.13b).

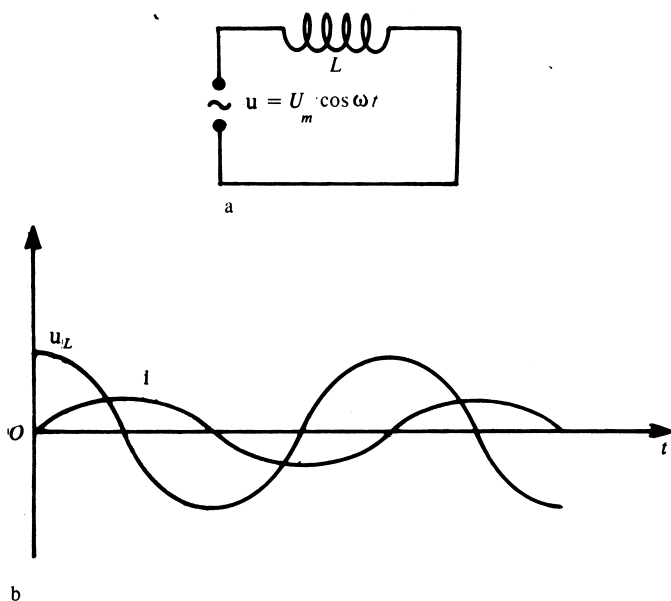


Fig. 9.13

Esta diferencia de fase se debe a que, en el instante en que la tensión autoinducida en los extremos de la bobina es máxima, la intensidad de la corriente en el circuito será igual a cero. Por otra parte, en el instante en que la tensión autoinducida se anula, la intensidad de la corriente puede alcanzar su máximo valor.

Esta diferencia de fases entre la tensión y la corriente en el circuito L , puede ser comprobada experimentalmente de forma análoga a como se hizo en el caso del circuito C . Basta para ello introducir un resistor en el circuito y obtener los oscilogramas de la tensión en el resistor y en la bobina, pues como conocemos, para el caso del resistor las oscilaciones de la tensión y de la intensidad de la corriente se encuentran en fase.

Como ya vimos que $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$, la oposición que presenta el circuito L al paso de la corriente alterna estará dada por la magnitud ωL , a la cual se le denomina *reactancia inductiva*. Su símbolo es X_L .

$$X_L = \omega L$$

La dependencia que muestra esta ecuación entre la reactancia inductiva, la frecuencia del generador y la inductancia de la bobina, se puede comprobar mediante un experimento sencillo, variando el valor de la frecuencia para bobinas de inductancia diferentes.

En el caso de un circuito L , la naturaleza de la oposición al paso de la corriente alterna tampoco tiene el mismo carácter que en un resistor. Como se puede apreciar en la figura 9.14, la potencia media entregada por el generador (o disipada en el circuito) en cada periodo es cero. Este comportamiento de un circuito L se puede explicar si recordamos que la bobina consume periódicamente energía durante el tiempo en que se establece el campo magnético, y la restituye durante el tiempo en que se anula.

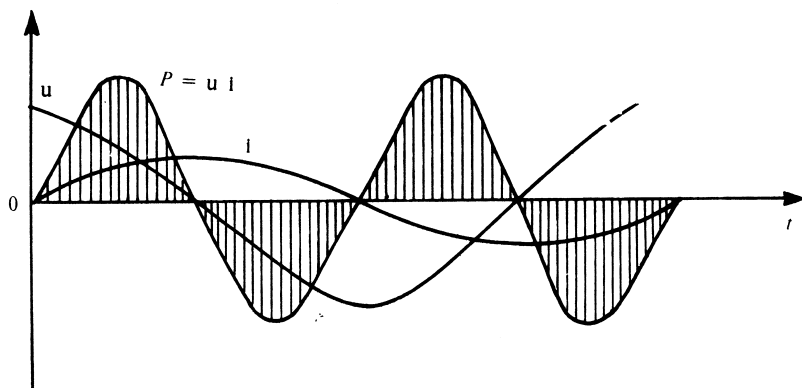


Fig. 9.14

Circuito RLC

Consideremos nuevamente el circuito completo de corriente alterna (fig. 9.15). En él la intensidad de la corriente es la misma en los tres elementos conectados en serie y su ecuación puede ser de la forma:

$$i = I_m \cos \omega t$$

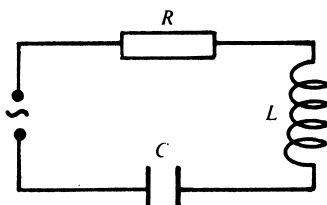


Fig. 9.15

Las tensiones en cada uno de los elementos son:

$$u_R = I_m R \cos \omega t$$

$$u_C = I_m X_C \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_L = I_m X_L \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Como es conocido, la fuerza electromotriz de la fuente $\varepsilon = \varepsilon_m \cos(\omega t + \alpha)$ es la suma de las tensiones u_R , u_L y u_C difieren en fase. La relación que existe entre las amplitudes de la fuerza electromotriz y de las tensiones, que daremos sin demostración, es:

$$\varepsilon_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2}$$

$$\varepsilon_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Si definimos:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

entonces nos queda:

$$\varepsilon_m = I_m Z$$

por lo tanto:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} \quad (9.3)$$

Esta ecuación recibe el nombre de *ley de Ohm para los circuitos de corriente alterna*. La magnitud Z , que expresa la oposición que presentan al paso de la corriente los elementos componentes de este sistema, se llama *impedancia del circuito*.

También se puede demostrar que la diferencia de fase entre las oscilaciones de la fuerza electromotriz y de la intensidad de la corriente, se puede calcular mediante la ecuación:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (9.4)$$

En el caso del circuito RLC , las transformaciones irreversibles de la energía solamente se producen en el resistor R . La potencia disipada en el circuito se puede calcular, entonces, a partir de la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

Utilizando la ecuación 9.3, se llega a que:

$$P = \frac{1}{2} I_m \frac{\varepsilon_m}{Z} R = \frac{I_m \varepsilon_m R}{\sqrt{2}\sqrt{2}Z}$$

y como:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}} \text{ y } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

entonces:

$$P = I \varepsilon \cos \varphi \quad (9.5)$$

El factor $\cos \varphi$ se denomina *factor de potencia* y desempeña un papel muy importante en la electrotecnia. Si el desfase es grande, con φ será muy pequeño y solo una pequeña parte de la energía producida por el generador ($P_i = I\varepsilon$) será consumida por el circuito. Esta es una gran desventaja económica, ya que, en esos casos, se pierde una gran cantidad de energía en las líneas de transmisión.

En la utilización de la energía eléctrica se producen condiciones no deseables al conectar a la red motores eléctricos, pues sus enrollados tienen una gran inductancia. Para aumentar el $\cos \varphi$ en las redes de circuitos consumidores en las industrias con una gran cantidad de motores eléctricos, se conectan bancos de condensadores denominados compensadores. También es necesario velar porque los motores eléctricos no trabajen sin carga, pues esto disminuye el factor de potencia en todo el circuito.

El aumento del $\cos \varphi$ es una importante tarea para la economía nacional, ya que permite que los generadores de las centrales eléctricas entreguen el máximo posible de energía, reduciendo considerablemente las pérdidas. Esto se logra con el adecuado diseño de las instalaciones eléctricas. Se prohíbe la utilización de instalaciones con un $\cos \varphi < 0,85$.

Tareas

7. Para el caso de un circuito R :
 - a) plantea las ecuaciones correspondientes a las oscilaciones de la tensión en los extremos del resistor, $u_R(t)$, y la intensidad de la corriente, $i(t)$;
 - b) representa las gráficas correspondientes a las ecuaciones anteriores;
 - c) ¿existe diferencia de fase entre las oscilaciones de $u_R(t)$ y de $i(t)$?;
 - d) escribe la ecuación para la potencia disipada en el resistor.
8. ¿A qué se denomina valor efectivo o eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión?
9. En las redes eléctricas domésticas se utilizan tensiones de 110 y 220 V. ¿Cuál es la amplitud de las oscilaciones de la tensión en cada uno de estos casos?
10. Para el caso de un circuito C .
 - a) plantea las ecuaciones correspondientes a las oscilaciones de la tensión entre las placas del condensador, $u_C(t)$ y la intensidad de la corriente, $i(t)$;

- b) representa las gráficas correspondientes a las ecuaciones anteriores;
 - c) ¿existe diferencia de fase entre las oscilaciones de $u_c(t)$ y de $i(t)$?
 - d) plantea la ecuación para el cálculo de la reactancia capacitiva y explica de qué factores depende; ¿cuál es su significado físico?
 - e) comprueba que la unidad para la reactancia capacitiva es el ohm;
 - f) ¿cómo se interpreta físicamente que, para este circuito, la potencia disipada sea nula?
11. Responde a los incisos de la pregunta anterior para el caso de un circuito L .
 12. Si la intensidad de la corriente en un circuito RLC oscila en correspondencia con la ecuación $i = I_m \cos \omega t$, escribe la ecuación correspondiente a las oscilaciones de la tensión en el resistor, el condensador y la bobina.
Repite el análisis anterior si $i = I_m \sin \omega t$.
 13. Suponiendo que en un circuito RLC , $i = I_m \cos \omega t$, representa en un mismo gráfico las curvas correspondientes a $i(t)$, $u_R(t)$, $u_C(t)$ y $u_L(t)$.
 14. Escribe la ecuación correspondiente a la impedancia de un circuito de CA. Explica cuál es el significado físico de esta magnitud.
 15. Plantea la ecuación para la impedancia en los casos de un circuito:
 - a) RLC ;
 - b) R ;
 - c) C ;
 - d) L .
 16. Plantea la expresión analítica de la Ley de Ohm para un circuito de CA. Interpreta.
 17. Plantea la ecuación para el cálculo de la potencia en un circuito RLC . ¿Cuál es el significado físico del factor $\cos \varphi$?

9.3 Resonancia

Ya conocemos que para un circuito de corriente alterna:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z}$$

Analizando esta expresión, se puede deducir que la amplitud de la intensidad de la corriente depende de la frecuencia de las oscilaciones del generador ω . La amplitud será máxima cuando Z sea mínima, y esto ocurre bajo la condición:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

Por lo tanto, en estas condiciones:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Como se ve, ω es igual a la frecuencia de las oscilaciones libres no amortiguadas del circuito.

Podemos, por tanto, concluir que si la frecuencia de las oscilaciones del generador coincide con la frecuencia de las oscilaciones libres no amortiguadas del circuito, la amplitud de la corriente alcanza el máximo valor posible. Este fenómeno recibe el nombre de *resonancia de corriente*.

Bajo las condiciones de la resonancia de corriente, el valor máximo de la amplitud de las oscilaciones de la corriente solo está determinado por la resistencia activa del circuito. Mientras menor sea el valor de esta resistencia, mayor será el valor de la amplitud de las oscilaciones.

Con el montaje del circuito representado en la figura 9.15, se pueden analizar experimentalmente las características de este importante e interesante fenómeno. Para los valores dados de R , C y L , la intensidad eficaz de la corriente y, por lo tanto, su amplitud, alcanza su máximo valor cuando la frecuencia del generador es de 10 kHz. En estas condiciones, las tensiones eficaces (y sus amplitudes) en el condensador y en la bobina son iguales y de signos contrarios para cualquier instante; las reactancias capacitivas e inductivas son iguales, y la intensidad eficaz de la corriente, por tanto, también su amplitud está determinada solamente por el valor de la resistencia del resistor. En la figura 9.16 se muestra la dependencia de la amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente en función de la frecuencia, para varios valores de R

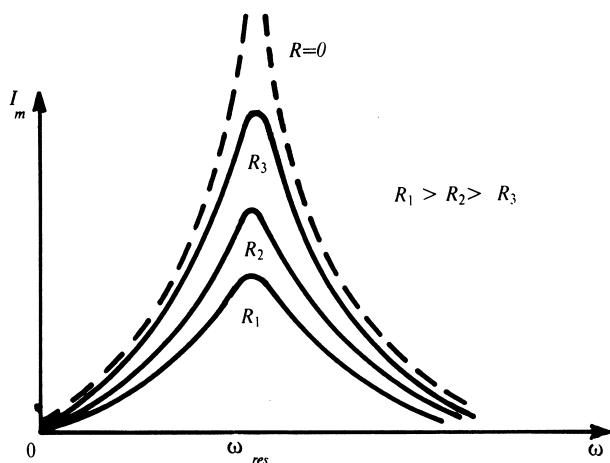


Fig. 9.16

La resonancia de corriente es un fenómeno análogo a la resonancia de velocidad en el caso de las oscilaciones mecánicas. El fenómeno oscilatorio electromagnético análogo al de la resonancia de amplitudes, es el de la resonancia de carga o de tensión. En este último caso, la dependencia de la amplitud de la carga o de la diferencia de potencial en las placas del capacitor, de la frecuencia, es diferente (fig. 9.17), y se destaca el hecho de que en este caso la frecuencia de resonancia depende de la resistencia del resistor.

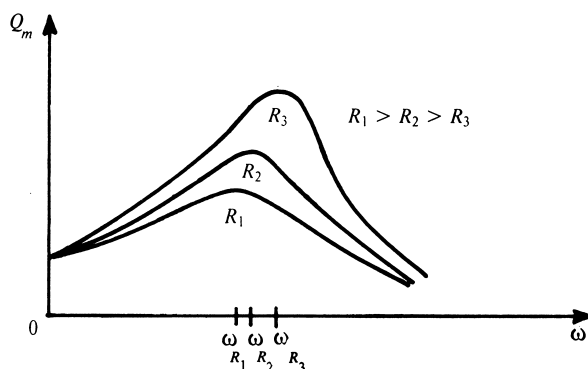


Fig. 9.17

Tareas

18. ¿En qué consiste el fenómeno de resonancia de corriente?
19. ¿Cuál es el valor de la impedancia de un circuito en resonancia?
20. Un circuito LC alimentado por un generador de frecuencia variable se encuentra en resonancia. Analice si el circuito tiene un comportamiento predominante inductivo o capacitivo al variar la frecuencia de la forma:
 - a) $\omega > \omega_0$;
 - b) $\omega < \omega_0$.

9.4 Rectificación de la corriente alterna

La corriente alterna es la más utilizada en la técnica y la vida cotidiana. No obstante, en muchos casos es necesario utilizar la corriente continua, por ejemplo, en los procesos electrolíticos para la obtención de metales puros y otras aplicaciones de la electrólisis. Los motores de corriente directa son capaces de regular, en forma suave y continua su frecuencia de rotación y desarrollar un gran torque en el momento de ponerse en marcha. La corriente directa también es imprescindible para la alimentación de la mayoría de las instalaciones o dispositivos electrónicos, de los inductores de los generadores de corriente alterna, etcétera.

La corriente directa se puede obtener a partir de la corriente alterna con ayuda de circuitos electrónicos denominados rectificadores.

El funcionamiento de cualquier rectificador está basado en la confección de un circuito que sólo permite el paso de la corriente en un sentido. El dispositivo más utilizado en la actualidad para lograr circuitos con esa característica es el diodo semiconductor. Al conectar un diodo en un circuito alimentado con un generador de corriente alterna (fig. 9.18a), la corriente puede circular por el circuito sólo durante el semiperiodo en que el diodo está polarizado en directa (fig. 9.18b.). Este tipo de circuito rectificador se denomina de media onda, y a la corriente que circula por él, corriente continua pulsante de media onda.

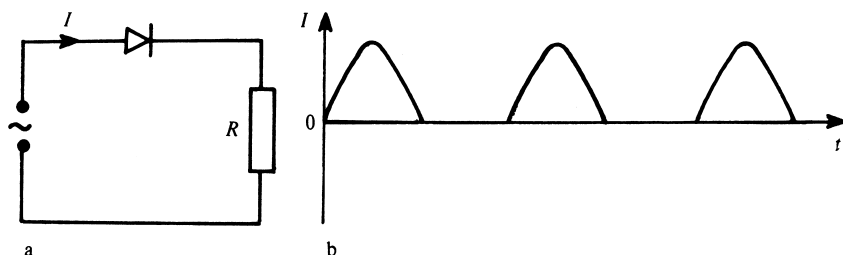


Fig. 9.18

Mediante un circuito más complejo, compuesto por cuatro diodos (fig. 9.19a), se puede lograr que la corriente circule en un solo sentido todo el tiempo (fig. 9.19b). Analicemos cómo opera este circuito, denominado rectificador de onda completa.

Durante el tiempo en que el borne A del generador es positivo (fig. 9.19a), el borne B es negativo y la corriente solo puede circular por los diodos 1 y 2, que son los que se encuentran polarizados en directa. Durante el tiempo en que el borne A es negativo y el B positivo, la corriente solo puede circular por los diodos 3 y 4, que son los que, en este caso, se encuentran polarizados en directa. De esta manera, durante todo el tiempo por el resistor de carga R está circulando la corriente en un solo sentido. A esta corriente se acostumbra a llamarle corriente continua pulsante.

Tanto en el caso de los rectificadores de media onda como en los de onda completa, es posible lograr, además, que la corriente se mantenga constante con tanta aproximación como sea necesario. Esto se consigue combinando con el diodo, adecuadamente, condensadores, bobinas o ambos componentes. En la figura 9.20a se muestra el esquema de un circuito rectificador de media onda al cual se le ha conectado un condensador de alta capacidad. La corriente rectificada por el circuito tiene las características representadas en la gráfica de la figura 9.20b con un trazo continuo. En este caso, durante el primer cuarto de período en que el diodo se encuentra polarizado en directa, el condensador C se carga. A partir de este instante, cuando la corriente comienza a disminuir, el condensa-

dor se descarga a través del resistor. Si la capacidad es lo suficientemente grande como para que su tiempo de descarga sea mayor que los tres cuartos de período restantes, entonces, durante el semiperíodo que el diodo no conduce, se mantendrá circulando corriente por el resistor.

Como este proceso se repite periódicamente, durante todo el tiempo se mantendrá la circulación de corriente.

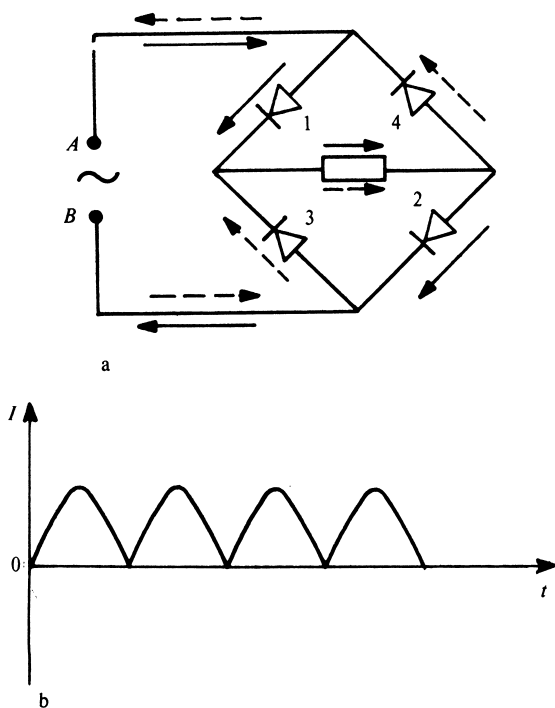
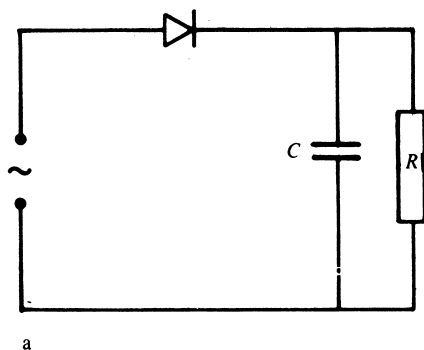


Fig. 9.19



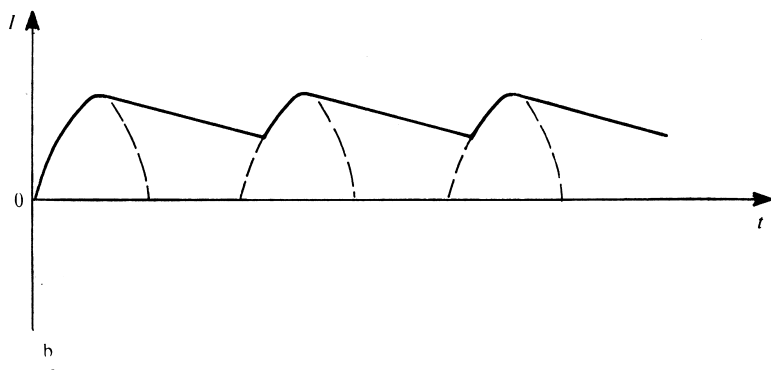


Fig. 9.20

En la figura 9.21a se representa el caso de un circuito rectificador de onda completa al cual se le ha conectado un condensador. La gráfica correspondiente a la intensidad de la corriente que se obtiene en este caso está representada en la figura 9.21b.

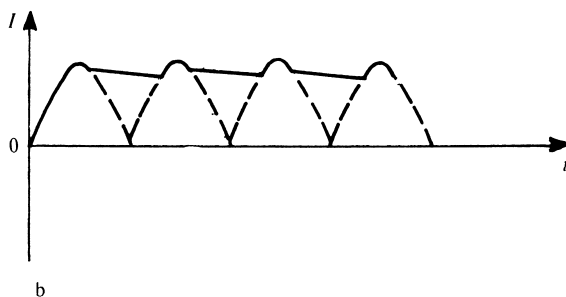
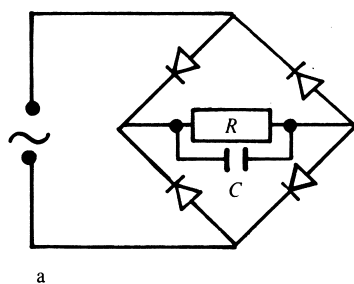


Fig. 9.21

Tareas

21. Represente y describa el funcionamiento de un circuito rectificador:
- a) de media onda;
 - b) de onda completa;
 - c) de media onda con condensador.

9.5 Éxitos y perspectivas de la electrificación en Cuba

Cuando triunfa la Revolución, el primero de enero de 1959, Cuba era un país en que, a excepción de los centrales azucareros, la mayoría de las pocas industrias existentes se concentraban en la capital y las ciudades más importantes del país. Esto mismo sucedía con la producción de energía eléctrica, la cual solo se suministraba a las ciudades y poblados principales, pues en estos lugares era donde mayor ganancia podían obtener las compañías transnacionales y privadas que controlaban esta actividad.

Después de nacionalizada esta industria es que se puede hablar de desarrollo de la electroenergética en Cuba. El Gobierno Revolucionario se propuso llevar la energía eléctrica a todas las regiones del país, así como impulsar el proceso de industrialización general y realizar profundas transformaciones socioeconómicas que garanticen la elevación del nivel de vida de nuestro pueblo.

Para lograr esos objetivos la Revolución ha contado, desde sus inicios, con la ayuda eficaz y desinteresada de la URSS. Ello ha permitido construir un sistema electroenergético nacional con el que se pudo alcanzar un crecimiento de 7,15 veces en la generación de electricidad. La potencia instalada se incrementó 7,72 veces en relación a la existente antes de 1958.

En la tabla 9.2 se refleja el crecimiento de la industria eléctrica cubana en los últimos años.

Tabla 9.2

	1958	1988	Crecimiento (veces)
Potencia instalada	402.1 MW	3 106 MW	7.72
Generación	1 795 GWh	12 834.36 Wh	7.15
Percápita de energía	400.3 KWh	1 295 KWh	3.23
Población electrificada	56 %	89 %	1.58

Estos logros nos han situado en uno de los primeros lugares de América Latina.

No obstante los éxitos señalados, el país continúa avanzando con vistas a incrementar la obtención de energía eléctrica en los próximos años. En la actualidad, se ejecuta un amplio programa de inversiones.

Con la colaboración de la URSS se construye la nueva central termoeléctrica del norte de la Habana, proyectada para una potencia de 1 300 MW, que será la más potente termoeléctrica con que contaremos. Su primer bloque, de 100 MW, comenzó a generar a partir de 1987.

En colaboración con Checoslovaquia se ejecuta la ampliación de la central termoeléctrica "Diez de Octubre", que cuenta con 3 unidades de 125 MW cada una, la primera de las cuales comenzó a generar en agosto de 1984. También se construirá una central termoeléctrica en Felton, provincia de Holguín, que contará con dos bloques de 250 MW cada uno.

En 1987 entró en explotación un bloque de 330 MW, de procedencia francesa en Matanzas.

En la zona del Escambray se comenzaron las investigaciones para la construcción de la primera hidroacumuladora del país, que tendrá una potencia de 500 MW. Esta obra se prevé concluir en 1995, y se construirá con la colaboración de Checoslovaquia y otros países del CAME.

En lo concerniente a las redes eléctricas, se extenderá el sistema de transmisión de 220 kV y se contempla la construcción de la primera línea de 500 kV, que vinculará la central electronuclear de Cienfuegos con la provincia de Camagüey.

Es evidente que los esfuerzos que realiza nuestro país en el desarrollo de la rama electroenergética es extraordinario, y que contribuirá a un desarrollo más acelerado de nuestra economía. No obstante, es necesario tener en cuenta que, si importante es producir energía eléctrica, también lo es ahorrarla al máximo posible.

Este es un propósito vital, que quedó bien definido en los acuerdos expresados en la Resolución del VIII Pleno del Comité Central del Partido Comunista de Cuba. Es deber de todos meditar detenidamente sobre las formas y vías que garantizan el ahorro de energía, en como podemos contribuir todos a esta tarea. Al respecto, es necesario tener muy en cuenta lo expuesto por el Comandante en Jefe Fidel Castro en su discurso de clausura del Primer Fórum Nacional de Energía, pronunciado el 4 de diciembre de 1984, acerca de que todo nuestro pueblo, todos los trabajadores, todos nuestros jóvenes, nuestros estudiantes, incluso nuestros pioneros tienen que tomar conciencia de la energía, de sus perspectivas futuras.

Problema resuelto

1. Un circuito está formado por un resistor de 2,5 k Ω , un condensador de 2,7 μ F y una bobina de 0,15 H, conectados en serie. Si el circuito está

alimentado por una fuente de CA de 110 V y 50 Hz, que genera una tensión de la forma $u = U_m \sin \omega t$; determina:

- la intensidad eficaz de la corriente;
- el factor de potencia;
- el desfase entre la intensidad de la corriente y la tensión en los extremos del circuito;
- la potencia media;
- la frecuencia de resonancia;
- la ecuación para la intensidad de la corriente en función del tiempo.

Solución

a) La intensidad eficaz se puede determinar a partir de la ley de Ohm para un circuito de CA:

$$I = \frac{U}{Z}$$

U se conoce por los datos y Z se puede determinar a partir de la ecuación:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

Conociendo que $\omega = 2\pi\nu$, queda entonces que:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C} \right)^2}}$$

$$I = \frac{110 \text{ V}}{2\,784,48 \, \Omega}$$

$$I = 39,5 \text{ mA}$$

b) El factor de potencia se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\cos \varphi = R/Z$$

donde $R = 2\,500 \, \Omega$ y la impedancia, según el resultado anterior, es de $2\,784,48 \, \Omega$. Por lo tanto:

$$\cos \varphi = \frac{2\,500 \, \Omega}{2\,784,48 \, \Omega} = 0,90$$

c) El desfase se puede calcular a partir de la ecuación anterior, pues ya se conoce el valor de $\cos \varphi$.

$$\cos \varphi = 0,90 \Rightarrow \varphi = 25,8^\circ$$

d) $P = UI \cos \varphi$

$$P = 110 \text{ V} \cdot 0,0395 \text{ A} \cdot 0,9 = 3,6 \text{ W}$$

e) Cuando el circuito está en resonancia, $X_L = X_C$. Por lo que:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Como $\omega = 2\pi\nu$, entonces:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$\nu = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{1}{0,15 \text{ H} \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}}} = 260 \text{ Hz}$$

f) Como la ecuación para las oscilaciones de la tensión tiene la forma general $u = U_m \sin \omega t$, la expresión de las oscilaciones de la corriente debe tener la forma $i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$. Y como, para este caso:

$$I_m = I \sqrt{2} = 0,039 \cdot 1,42 = 0,05 \text{ A}$$

$$\omega = 2\pi\nu = 2 \cdot 6,28 \cdot 260 \text{ Hz} = 314 \text{ rad/s}$$

$$\varphi = 25,8^\circ = 0,45 \text{ rad}$$

entonces:

$$I = 0,05 \sin (314t + 0,45) \text{ (I en A; t en s)}$$

TRABAJO DE LABORATORIO 12 Reactancia capacitiva y reactancia inductiva en un circuito de CA

En este trabajo de laboratorio podrás observar cómo dependen la reactancia capacitiva e inductiva de la capacidad y de la inductancia, respectivamente, así como comparar los resultados del cálculo experimental de la reactancia capacitiva e inductiva con los obtenidos teóricamente.

Instrumentos y materiales: fuente de CA, dos condensadores, una bobina con núcleo de hierro, un multímetro, un reóstato, tres tableros-receptáculos, un interruptor y cables de conexión.

Indicaciones para el trabajo

a) *Reactancia capacitiva*

1. Realiza un montaje similar al de la figura 9.22, y cuidando de mantener constante la tensión entre los bornes del condensador, confec-

ciona una tabla con las lecturas de la intensidad de la corriente para los siguientes casos:

- un solo condensador conectado a la fuente;
 - los dos condensadores conectados en serie;
 - los dos condensadores conectados en paralelo.
- De acuerdo con los datos obtenidos del experimento, ¿cómo depende la reactancia capacitiva de la capacidad?
 - Utilizando los datos obtenidos, calcula la reactancia inductiva en cada uno de los casos y compárala con el valor teórico, obtenido mediante la ecuación:

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

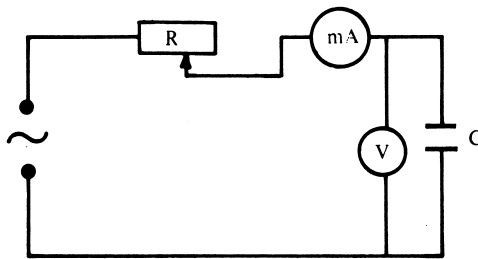


Fig. 9.22

b) *Reactancia inductiva*

- Realiza un montaje similar al de la figura 9.23a. Calcula el valor de la resistencia óhmica de la bobina.
- Realiza un montaje similar al de la figura 9.23b y, cuidando de mantener constante la tensión entre los bornes de la bobina, confecciona una tabla con los valores de la intensidad de la corriente en los siguientes casos:
 - la bobina sin núcleo de hierro;
 - la bobina con núcleo de hierro recto;
 - la bobina con el núcleo de hierro cerrado.
- De acuerdo con los datos obtenidos en el experimento, ¿cómo depende la reactancia inductiva de la inductancia de la bobina?
- Utilizando los datos del experimento, calcula la reactancia inductiva en cada uno de los casos anteriores, mediante la ecuación

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

- Calcula la inductancia de la bobina en cada uno de los casos anteriores; utiliza la ecuación:

$$X_L = 2\pi\nu L$$

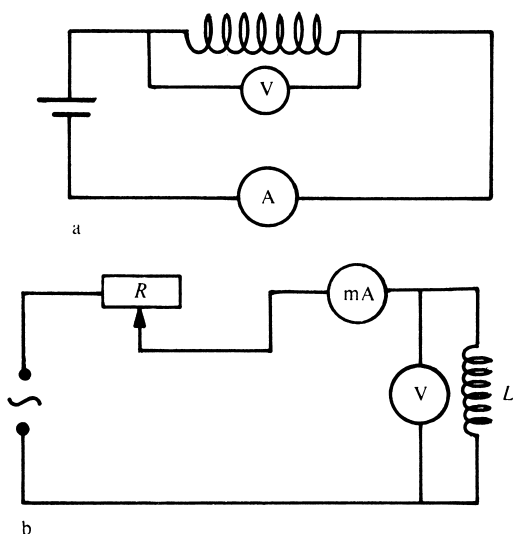


Fig. 9.23

TRABAJO DE LABORATORIO 13 Resonancia de corriente

Mediante este trabajo de laboratorio podrás comprobar experimentalmente el fenómeno de la resonancia de corriente.

Instrumentos y materiales: bobina de 3 000 o 1 000 espiras, condensador de 4 o 40 μF , miliamperímetro, fuente de corriente, resistores de 8 y 100 Ω , y de 1 k Ω , cables de conexión, núcleo en forma de U, núcleo recto, tablero universal de montajes, interruptor de cuchilla.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito como el que se presenta en la figura 9.24. La bobina (sin núcleo) debe ser conectada por los bornes correspondientes a 3 000 o 750 espiras. El rango de medición del amperímetro debe ser de 10 a 100 mA en CA. El circuito debe estar alimentado con 2 V (CA). Utiliza inicialmente el resistor de 8 Ω .

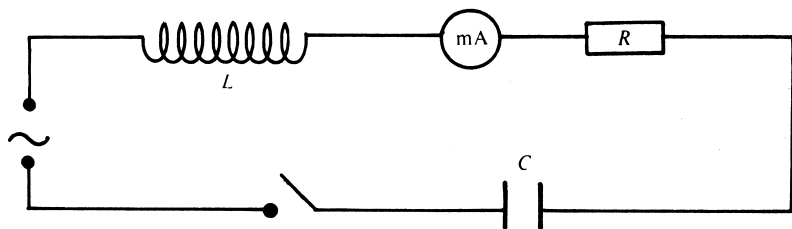


Fig. 9.24

2. Cierra el interruptor y anota el valor de la intensidad de la corriente en una tabla.
3. Coloca el núcleo que tiene forma de U en posición vertical con sus ramas abiertas hacia arriba. Introduce lentamente, en una de sus ramas, la bobina. Observa qué le sucede al valor de la intensidad de la corriente y anota su valor en la tabla, cuando la bobina esté completamente introducida.
4. Coloca uno de los extremos del núcleo recto sobre la rama del núcleo en forma de U en la cual está insertada la bobina. Marca con un lápiz la posición que ocupa el extremo del núcleo recto cuando la corriente alcance el valor máximo. Anota este valor en la tabla. Desplaza el núcleo recto hasta cerrar completamente el núcleo en forma de U y anota el valor de la intensidad de la corriente en la tabla.
5. Repite el experimento utilizando los resistores de $100\ \Omega$ y $1\ \text{k}\Omega$.
6. Interpreta teóricamente los resultados obtenidos.

Tareas generales del capítulo

1. Calcula el valor de la frecuencia, la frecuencia angular y el período de un circuito LC , que tiene $L = 20\ \text{mH}$ y $C = 4\ \mu\text{F}$.
2. ¿Cuál será el valor de la inductancia de una bobina conectada a un circuito LC , si la capacidad del capacitor es de $16\ \mu\text{F}$ y la frecuencia de las oscilaciones de $10^3\ \text{Hz}$?
3. Se dispone de una bobina de $10\ \text{mH}$ y de dos capacitores de 5 y $2\ \mu\text{F}$. Con estos elementos se pueden diseñar varios circuitos oscilatorios. Determina la frecuencia de oscilación de estos.
4. ¿Entre que límites debe variar la inductancia de una bobina en un circuito oscilatorio, para que la frecuencia de las oscilaciones varíe de 400 a $500\ \text{Hz}$? La capacidad del condensador es de $10\ \mu\text{F}$.
5. Un condensador de $10\ \text{pF}$ se encuentra cargado a una tensión de $100\ \text{V}$. Si se conecta a una bobina de resistencia despreciable, ¿cuál es el valor máximo de la energía en el campo magnético de la bobina?
6. La intensidad de la corriente que circula por un conductor de $8\ \Omega$, viene dada por la ecuación $i = 14,1 \sin 60\pi t$ (i está dada en A, t en s).

Determina:

- a) la intensidad de la corriente efectiva;
- b) la máxima tensión en el resistor;
- c) la tensión efectiva en el resistor;
- d) la ecuación para la tensión en los terminales del resistor;

7. La tensión existente en los circuitos domésticos de nuestro país es normalmente de 110 V, con una frecuencia de 60 Hz.
 - a) ¿Cuál es el valor máximo de la tensión en este caso?
 - b) ¿Cuál es la frecuencia cíclica?
 - c) Plantea la ecuación para la tensión en función del tiempo.
 - d) Si se aplica esta tensión a una plancha con una resistencia es de $20\ \Omega$, ¿qué intensidad de corriente máxima pasa por ella?, ¿y qué intensidad efectiva?
8. Una bobina con inductancia $L = 0.08\ \Omega$ está unida a una fuente de corriente alterna de 1 000 Hz. El valor efectivo de la tensión en los bornes de la bobina es de 100 V. Determina la amplitud de la corriente en este circuito.
9. Una bobina de $2 \cdot 10^{-2}$ mH se conecta a una fuente alterna que genera una tensión de la forma $u = 20 \sin 100\pi t$ (u está dada en V, t en s).
 - a) ¿Cuál es el valor de la reactancia inductiva?
 - b) ¿Cuál será el valor de la corriente máxima en el circuito?
 - c) Escribe la ecuación $i = f(t)$.
10. Un solenoide con un núcleo de hierro posee una inductancia de 2 H y una resistencia óhmica en el devanado de $100\ \Omega$. Se conecta a una fuente de corriente alterna que genera una tensión eficaz de 20 V a una frecuencia de 400 Hz. Determina la intensidad de la corriente que circula por el solenoide. ¿Qué le ocurre a la intensidad de la corriente si se extrae el núcleo de hierro de la bobina.
11. Determina la resistencia total de un circuito en serie, compuesto de un condensador de $1\ \mu\text{F}$ y una bobina de 0,05 H, cuando la frecuencia de la corriente es de 1 000 Hz. Desprecia el valor de la resistencia óhmica.
12. Un circuito está formado por una bobina de 40 mH en serie con un condensador de $2\ \mu\text{F}$, alimentados por un generador de CA de 120 V y 60 Hz. Determina:
 - a) la frecuencia cíclica;
 - b) la reactancia inductiva;
 - c) la reactancia capacitiva;
 - d) la impedancia del circuito.
13. La bobina de un circuito LC tiene una inductancia de 0,003 H. El condensador está compuesto de dos placas en forma de discos, de 1,2 cm de radio, separadas una distancia de 0,3 mm en el vacío.
 - a) Determina el periodo de las oscilaciones del circuito.
 - b) ¿Cuál será el periodo si el espacio entre las placas está ocupado por una sustancia cuya permeabilidad dieléctrica relativa es 4?
14. Una bobina de 0,54 H y un condensador de 1,1 F están conectados en serie con un resistor de $3\ \text{k}\Omega$. Determina la reactancia inductiva,

la reactancia capacitiva y la inductancia de este circuito. Por él circula una corriente de:

- a) 50 Hz;
- b) 10 kHz.

15. Los puntos *A* y *B* de la figura 9.25 son los terminales de una línea de CA que tiene una frecuencia de 60 Hz y 130 V de tensión eficaz. Si $R_1 = 6 \Omega$ y $R_2 = R_3 = 3 \Omega$, $X_C = 3 \Omega$ y $X_L = 8 \Omega$, calcula:
- a) La intensidad de la corriente en el circuito;
 - b) la tensión entre los extremos *AC* y *CD*.

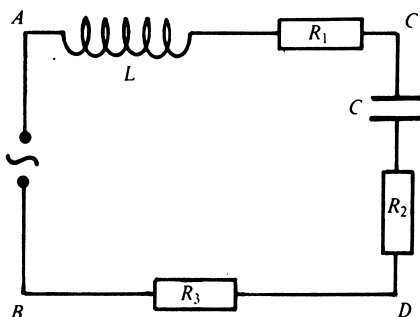


Fig. 9.25

16. A una toma de 125 V de CA se conecta un circuito de impedancia igual a 100Ω . Se conoce que el desfase entre los valores de I y U es de $\pi/6$ rad. ¿Cuál es la potencia suministrada y consumida en el circuito? ¿Qué energía consume en una hora?
17. La figura 9.26 representa la porción de un circuito de CA, en la cual $R = 10 \Omega$ e $I = 4$ A. Las reactancias conectadas tienen valores de $X_L = 8 \Omega$ y $X_C = 15 \Omega$. Determina:
- a) el valor de la tensión eficaz en los extremos de cada elemento;
 - b) la tensión entre los extremos *A* y *B*;
 - c) la potencia que se consume en el circuito.

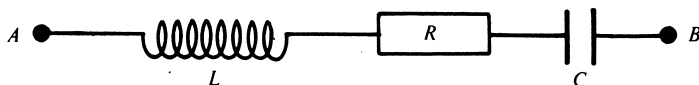


Fig. 9.26

18. Un bombillo incandescente disipa 200 W al conectarlo a la línea de nuestro alumbrado doméstico, que tiene 110 V y 60 Hz.
- a) ¿Qué intensidad de corriente circula por él?

- b) ¿Qué intensidad de corriente máxima soporta?
- c) Plantea la ecuación de la intensidad de corriente en el circuito si la ecuación de la tensión es de la forma $u = U_m \sin \omega t$.
19. Determina el desfase entre la corriente y la tensión en un circuito de corriente alterna al cual el generador entrega una potencia de 8 kW. La amplitud de la corriente en el circuito es de 100 A y la amplitud de la tensión en los terminales del generador es de 200 V.
20. Un circuito RLC conectado a un generador de corriente alterna de tensión eficaz de 125 V, está formado por un condensador de reactancia capacitiva de 25Ω , un resistor de 100Ω y un solenoide de reactancia inductiva de 200Ω que tiene una resistencia activa de 20Ω .

Determina:

- a) la intensidad de la corriente en el circuito;
- b) la caída de tensión en cada elemento;
- c) el factor de potencia del circuito;
- d) la potencia absorbida en el circuito;
21. Un resistor de 40Ω , una bobina de reactancia inductiva de 130Ω y un condensador de reactancia capacitiva de 100Ω , se conectan en serie y son energizados por una fuente de CA cuya tensión efectiva es de 220 V. Calcula:
- a) el factor de potencia;
- b) la potencia que disipa el circuito;
- c) la potencia máxima que pudiera disipar el circuito.
22. En un circuito de CA de 120 V y 60 Hz, se intercala una bobina cuya resistencia activa es de 10Ω y que consume una potencia de 360 W para un desfase entre tensión y corriente de 60° . Calcula la inductancia de la bobina.
23. Un condensador y una bobina están conectados en serie a una línea de 520 V y 60 Hz. El condensador posee una reactancia capacitiva de 240Ω ; la bobina, una resistencia activa de 60Ω y una reactancia inductiva de 320Ω . Calcula:
- a) la corriente eficaz del circuito;
- b) la potencia consumida;
- c) la capacidad del condensador.
24. Los circuitos A y B , mostrados en la figura 9.27, solo se diferencian por el elemento resistivo colocado en A . Si se les suministra igual energía y se les deja oscilar libremente:
- a) ¿Cuál de los circuitos oscilará por más tiempo? ¿Por qué?
- b) ¿La frecuencia de resonancia de A con respecto a B es: mayor, igual o menor? Explica.
- c) Durante la resonancia, ¿cuál de los dos circuitos alcanza una mayor amplitud de la corriente?

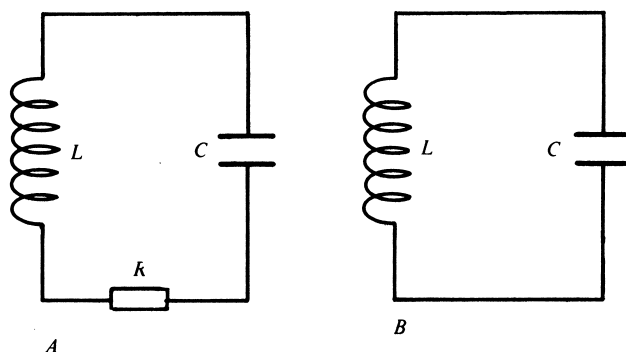


Fig. 9.27

25. La gráfica de resonancia mostrada en la figura 9.28 corresponde al circuito cuyo diagrama se muestra en la figura 9.15. Construye la gráfica correspondiente para otro circuito de igual L y C , pero con:

- $R_1 > R$;
- $R_2 < R$;

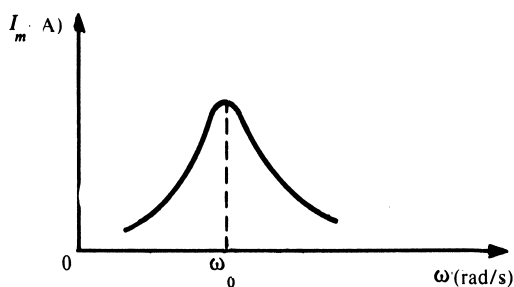


Fig. 9.28

26. La figura 9.29 representa las curvas de resonancia correspondientes a dos circuitos, A y B .

- ¿Cuál de los dos circuitos posee mayor resistencia?
- Si ambos poseen una inductancia de $2 \cdot 10^3$ H, ¿Cuál de los dos posee mayor capacidad?
- Determina la capacidad del circuito B .

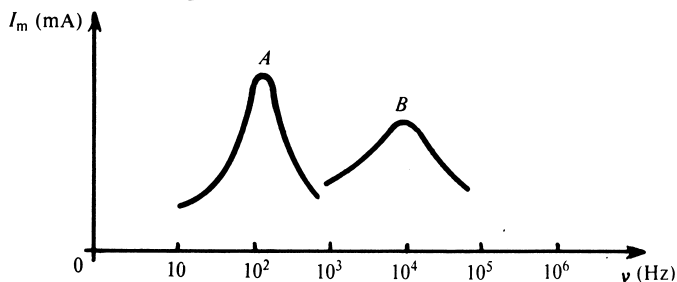


Fig. 9.29

27. En la figura 9.30 se representa un circuito RLC (con una resistencia de $8\ \Omega$ y una reactancia capacitiva $10\ \Omega$, que se encuentra en resonancia con un generador cuya fem es de $240 \cos 300\pi t$ volts (si t se da en s).
- ¿Cuál será el valor de la capacidad instalada?
 - ¿Cuál será el valor de la inductancia?
 - Determina el valor de la lectura del amperímetro.
 - Determina los valores de las lecturas de los voltímetros.
 - Si la resistencia aumenta su valor a $12\ \Omega$, ¿cuál será el valor de la corriente?
 - Dibuja, en un sistema de coordenadas, las curvas de resonancia correspondientes a cada caso.

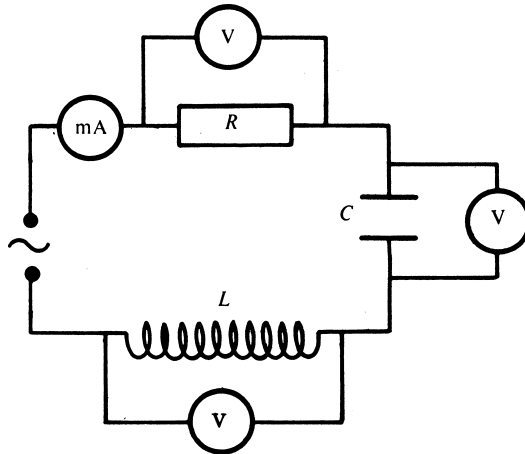


Fig. 9.30

28. La figura 9.31 representa un circuito RLC alimentado por un generador cuya fem es $250 \sin 800t$. Determina:
- la reactancia del circuito;
 - la impedancia;
 - la lectura del amperímetro;
 - si el circuito está en resonancia.

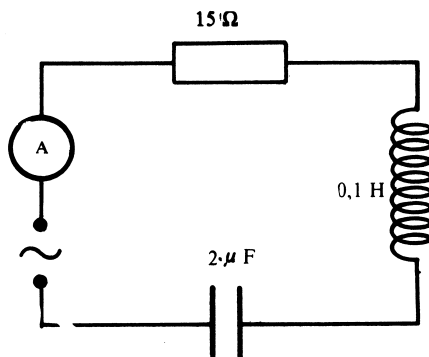


Fig. 9.31

29. En un circuito oscilante, con un capacitor de 10^{-6}F , comienza la resonancia cuando la frecuencia de las oscilaciones es de 400 Hz. Si se conecta otro capacitor de capacidad C_2 , en paralelo, la resonancia se establece para una frecuencia de 1 000 Hz. Determina la capacidad C_2 . (No consideres la resistencia óhmica del circuito).
30. En la figura 9.32 se representa un circuito acoplado al secundario de un transformador que tiene un coeficiente de transformación $k = 2$, y que es alimentado por una corriente alterna cuya tensión varía según la ecuación: $312 \cos 377t$. Calcula el valor de la corriente eficaz que circula por el circuito.

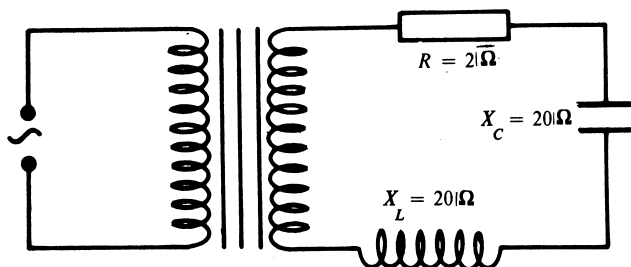
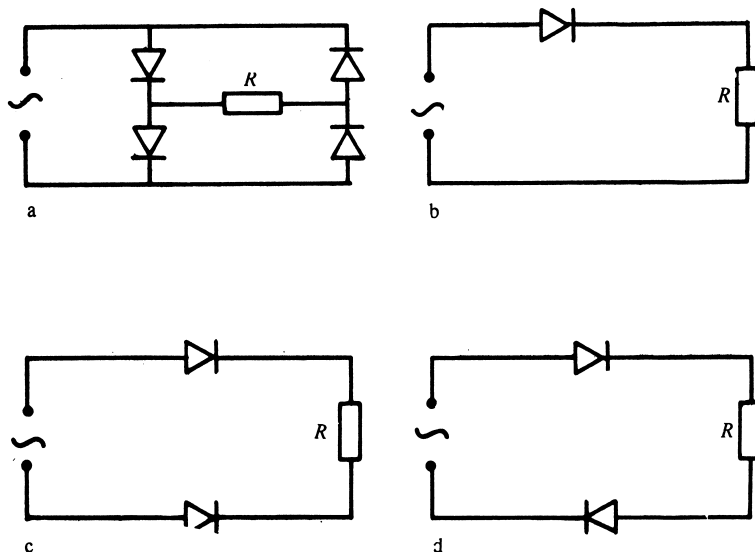


Fig. 9.32

31. Identifica cuáles de los circuitos de la figura 9.33 rectifican la corriente en R . Construye la gráfica de la intensidad de la corriente en función del tiempo para cada uno de los resistores R .



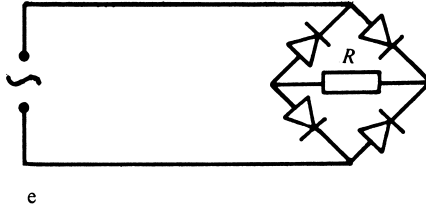


Fig. 9.33

32. En el circuito representado en la figura 9.34 determina el sentido de la corriente en cada resistor y construye la gráfica de $I = f(t)$ para cada caso.

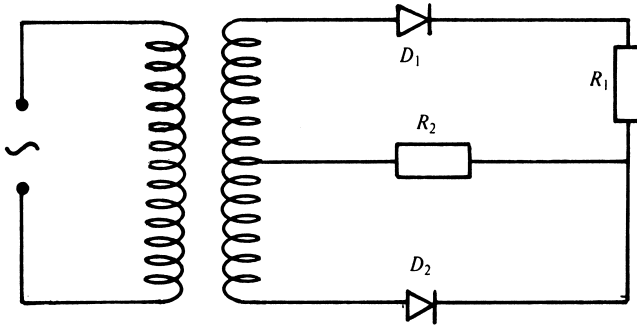


Fig. 9.34

Capítulo 10

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

10.1 *Campo electromagnético y progreso técnico*

Hasta el momento, hemos estudiado el campo eléctrico y el magnético por separado. Al analizar las oscilaciones electromagnéticas, vimos circuitos cuyo funcionamiento se basa en la presencia de los campos eléctrico y magnético, que garantizan que se produzcan y mantengan las oscilaciones de las partículas cargadas. Una característica de estos circuitos es que los campos permanecen enlazados a él en ciertas zonas bien precisadas: el campo eléctrico entre las placas del condensador, y el magnético en torno a los conductores y, en especial, en los enrollados o bobinas.

En este capítulo estudiaremos la estrecha relación que existe entre los campos eléctrico y magnético cuando se independizan de las partículas cargadas en movimiento, para constituir el campo electromagnético viajero.

La existencia del campo electromagnético fue formulada teóricamente por el genial físico inglés James C. Maxwell. El descubrimiento y la aplicación posterior que se le ha dado a las ondas electromagnéticas, ha tenido una gran significación en el desarrollo de la humanidad. Los actuales sistemas de telecomunicaciones, radiales y televisivos constituyen la aplicación más generalizada y conocida de las ondas electromagnéticas o hertzianas. En ellas se sustenta el funcionamiento de nuestros sistemas defensivos de exploración y localización aérea y marítima (radares), y de las guías conductoras de los proyectiles antiaéreos.

Elas han permitido localizar, conducir y mantener las comunicaciones con las naves espaciales, satélites y demás ingenios que han viajado a través del cosmos y se han posado en la superficie de otros planetas.

10.2 *Relación entre los campos eléctrico y magnético variables*

Al analizar el fenómeno de la inducción electromagnética, Maxwell se percató de que las variaciones del campo magnético “inducían” un campo eléctrico rotacional. Este hecho fue el punto de partida que le condujo a formular la siguiente hipótesis: si el campo magnético variable induce

un campo eléctrico rotacional, entonces, ¿no se dará en la naturaleza el proceso inverso, es decir, el que un campo eléctrico variable “induzca” un campo magnético rotacional?

En efecto, la práctica ha confirmado que la suposición de Maxwell era cierta. Toda variación de un campo eléctrico determina la inducción de un campo magnético rotacional.

En la figura 10.1a, se muestra el esquema que representa la inducción de un campo eléctrico rotacional, provocada por la variación de un campo magnético. En la figura 10.1b, en cambio, se representa el esquema de la inducción de un campo magnético rotacional por la variación de un campo eléctrico.

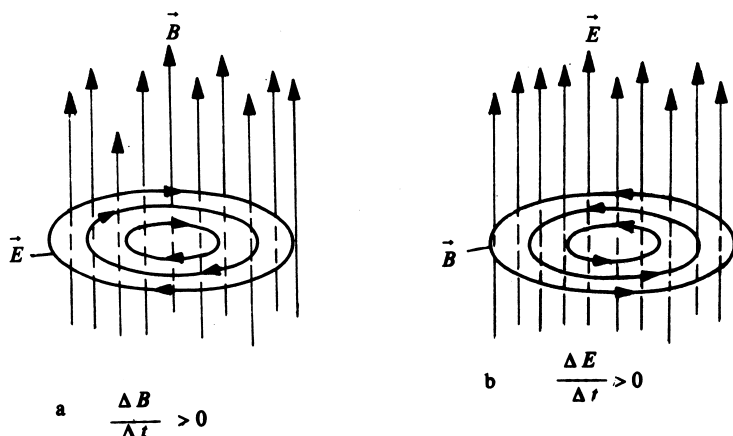


Fig. 10.1

En ambos casos se representa una etapa en la que los campos inductores se intensifican, es decir: $\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$ y $\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$.

Para determinar el sentido del campo eléctrico rotacional inducido, se utiliza el mismo criterio expuesto en la ley de Lenz. El campo eléctrico inducido tiene un sentido tal, que la corriente que él produce determina un efecto opuesto a la variación del campo magnético inductor. Puedes comprobar que esto es cierto en el caso representado en la figura 10.1a.

Para determinar el sentido del vector inducción magnética del campo magnético inducido, provocado por la variación de un campo eléctrico, Maxwell formuló la hipótesis de que toda variación del campo eléctrico es equivalente a la existencia de una corriente eléctrica, que denominó *corriente de desplazamiento* (I_d).

Según Maxwell, conocer el sentido de la corriente de desplazamiento es importante, pues ello permite determinar el sentido del campo magnético inducido, mediante la aplicación de las mismas reglas sencillas que se utilizan para hallar el sentido de la inducción magnética en el caso de un conductor con corriente (regla de la mano derecha).

Ahora, ¿cómo determinar el sentido de la corriente de desplazamiento?

Todo campo eléctrico variable se puede considerar como si fuera producido en un circuito que posee un condensador, que es la zona donde el campo eléctrico varía en forma significativa. En la figura 10.2a se muestra uno de estos circuitos. El campo eléctrico en el interior del condensador aumenta sólo cuando éste se está cargando, es decir, cuando por el circuito externo circula una corriente I del sentido indicado. Durante este proceso, la corriente I determina en los conductores un campo magnético cuyas líneas de inducción tienen el sentido que se muestra en la figura, y que se determina mediante la regla de la mano derecha.

Entre las placas del condensador, de acuerdo con la hipótesis de Maxwell, el campo eléctrico en aumento se comporta como una corriente de desplazamiento I_d , cuyo sentido, en este caso, es igual al de las líneas de fuerza del campo eléctrico e igual al de la corriente I en los conductores. Al aplicar la regla de la mano derecha considerando el sentido señalado de la corriente I_d , se obtiene el sentido del campo magnético inducido.

Si el campo eléctrico disminuye, éste se puede considerar similar al que existe entre las placas de un condensador que se descarga. En este caso la corriente I en el circuito circula en el sentido mostrado en la figura 10.2b, y la corriente de desplazamiento es de sentido contrario al de las líneas de fuerza del campo eléctrico. El sentido de las líneas de inducción del campo magnético que se induce entre las placas del condensador; tiene el sentido que se indica en la figura.

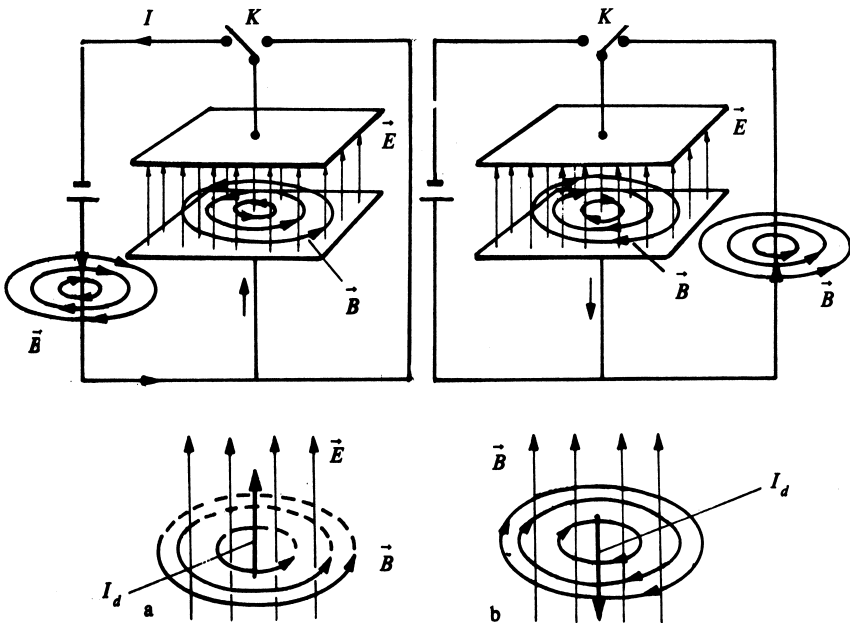


Fig. 10.2

Con la introducción del concepto de corriente de desplazamiento, se pueden considerar cerrados a través del condensador los circuitos que se muestran en las figuras 10.2 a y b. Por tanto, se puede determinar el sentido del campo magnético mediante la regla de la mano derecha. Comprueba en los casos que se muestran en las figuras 10.2a y 10.2b que los sentidos señalados de las líneas de inducción son correctos.

El conocimiento de los fenómenos analizados (la inducción de un campo eléctrico producto de la variación del campo magnético, y la inducción de un campo magnético como consecuencia de la variación del campo eléctrico), condujo a Maxwell a predecir la posibilidad de la obtención del campo electromagnético y la propagación de las ondas electromagnéticas.

Tareas

1. ¿A qué conclusión llegó Maxwell al analizar el fenómeno de la inducción de un campo eléctrico rotacional, como consecuencia de la variación del campo magnético?
2. ¿Cómo se utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo eléctrico rotacional inducido?
3. ¿Qué ventaja reporta el considerar la existencia de la corriente de desplazamiento en las zonas donde existen campos eléctricos variables?
4. En la figura 10.3a se muestra un campo magnético que se incrementa, y en la 10.3b, uno que se encuentra disminuyendo. Traza en cada caso las líneas de fuerza del campo eléctrico inducido, así como su sentido.

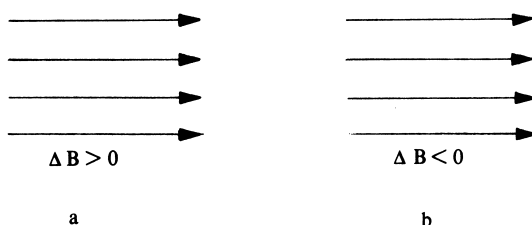


Fig. 10.3

5. En el circuito representado en la figura 10.4a el condensador se está cargando, y en la 10.4b, descargando. Representa en cada caso: las corrientes de desplazamiento I_d , las líneas de inducción magnética en el interior del condensador, así como su sentido.

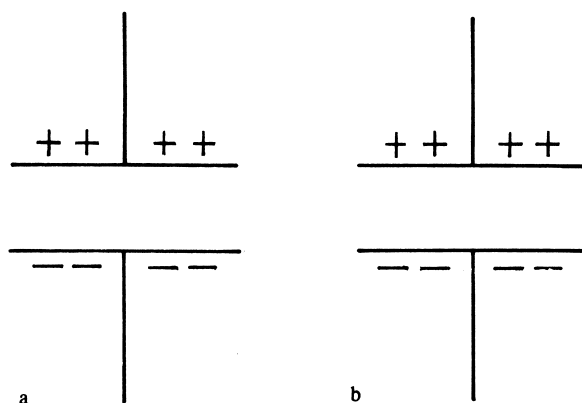


Fig. 10.4

10.3 Hipótesis de Maxwell sobre la generación del campo electromagnético

Maxwell postuló teóricamente que, cuando se hacen oscilar las partículas cargadas de un conductor, el campo eléctrico que las rodea, al variar periódicamente, induce un campo magnético que también es variable. Las variaciones de este campo, a su vez, inducen un campo eléctrico variable. Postuló, además, que estos procesos sucesivos de inducción mutua de ambos campos, se repiten. Esquemáticamente, este fenómeno se ha representado en la figura 10.5.

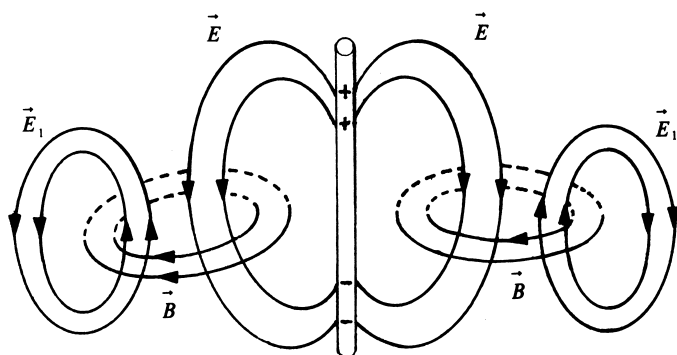


Fig. 10.5

La variación del campo eléctrico E induce un campo magnético rotacional $\vec{B}$. Este, a su vez, como es variable, induce un campo eléctrico rotacional $\vec{E}$. Estos procesos de inducción mutua de los campos eléctrico y magnético van ocurriendo en zonas cada vez más alejadas del lugar don-

de se iniciaron. Es decir, se produce la propagación de dichos campos a través del espacio. A este fenómeno Maxwell lo denominó propagación del campo electromagnético, pues, a partir de una excitación en cierta región de espacio, los dos campos van avanzando en estrecha relación, tal como hacen las ondas en la superficie del agua. Las que ahora estamos estudiando son *ondas electromagnéticas*. Una de las formulaciones más trascendentales realizadas por Maxwell en relación con la propagación de las ondas electromagnéticas, fue la que establece una velocidad finita para este proceso.

Lo más extraordinario de los trabajos teóricos de Maxwell fue el cálculo de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. El valor obtenido fue de 300 000 km/s igual al valor de la velocidad de la luz en el vacío.

Todos los trabajos realizados por Maxwell fueron teóricos, él no pudo obtener experimentalmente el campo electromagnético viajero, las ondas electromagnéticas. Diez años después de su muerte, estas fueron obtenidas experimentalmente, por el físico alemán Heinrich Hertz.

Tareas

6. Expresa con tus palabras el contenido de las hipótesis de Maxwell sobre la obtención del campo electromagnético. Utiliza como apoyo la figura 10.5.
7. Explica cómo se produce el proceso de propagación del campo electromagnético. ¿Cuál es el valor de su velocidad de propagación?

10.4 Obtención de las ondas electromagnéticas. *Experimento de Hertz*

Las ondas electromagnéticas se obtienen como consecuencia de las variaciones de los campos eléctrico y magnético, a partir de circuitos osciladores capaces de generarlas.

Puesto que ambos campos se relacionan estrechamente con las partículas cargadas, la emisión de ondas electromagnéticas se obtendrá como consecuencia de sus oscilaciones.

Las oscilaciones de las partículas cargadas se obtienen en los circuitos oscilatorios. Analicemos qué condiciones debe cumplir un circuito oscilatorio para que sea capaz de convertirse en generador de ondas electromagnéticas.

En la figura 10.6 se muestra el esquema de un circuito oscilatorio con el cual se pueden lograr oscilaciones que se automantienen de las partículas cargadas (electrones). Estos dispositivos reciben el nombre de circuitos autoosciladores.

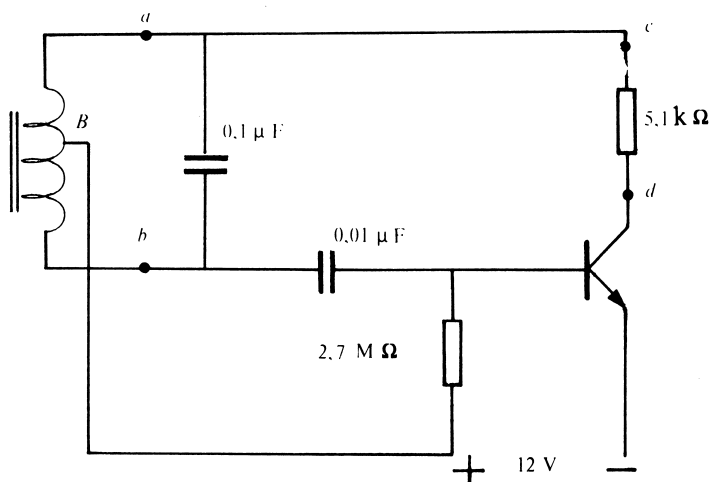


Fig. 10.6

Recuerda que, en décimo grado utilizaste como fuente sonora un autooscilador (fig. 10.6). En este, la frecuencia de las oscilaciones de la corriente depende del valor de la capacidad C del condensador y de la inductancia L de la bobina y se calcula mediante la ecuación:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Con ayuda de un osciloscopio, es fácil comprobar que la frecuencia del circuito es relativamente baja; de hecho, está en el rango de las denominadas audiodfrecuencias. La frecuencia del circuito se puede modificar variando los valores de la capacidad del condensador, o de la inductancia de la bobina o de ambas a la vez.

Al cerrar el interruptor, como ya conoces, en el circuito LC se producen oscilaciones de la corriente. Esto determina que en el punto B de la bobina se manifieste una tensión alterna con la misma frecuencia que la del circuito. Esta tensión variable, al actuar sobre la base del transistor, hace que por el circuito colector-emisor circule corriente durante parte de los semiperíodos en que la base se hace positiva. Ello origina una corriente pulsante de la misma frecuencia que la del oscilador LC .

En la figura 10.7 se muestra un oscilograma combinado de las oscilaciones de la tensión en el circuito LC y de la tensión en la resistencia de carga. Observa que ambas poseen frecuencias iguales y se mantienen en fase. Esto es lo que determina que las oscilaciones se automantengan, pues el transistor, mediante la corriente pulsante, solo suministra energía al circuito, en aquellos momentos en que este la requiere. A todo este proceso de autocontrol se le denomina *realimentación*.

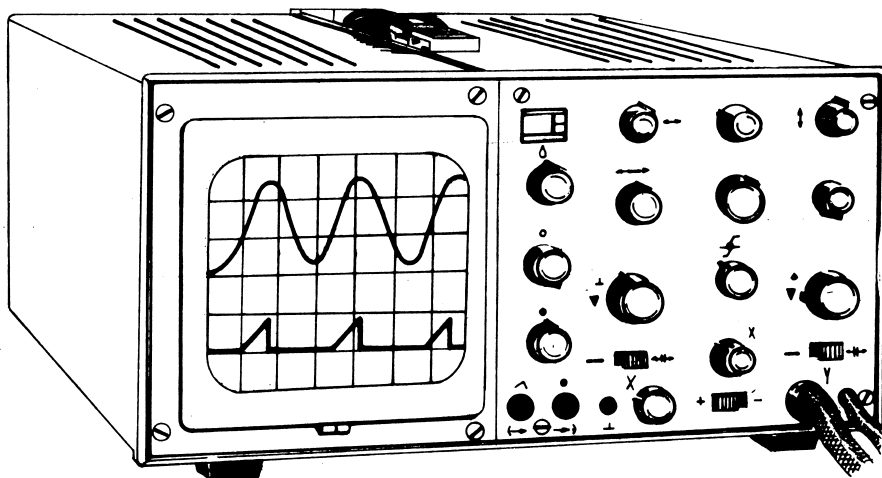


Fig. 10.7

Una característica de los circuitos autooscilatorios es que, en ellos, el campo eléctrico permanece enlazado al condensador y el magnético a la bobina. Por esta razón, se denominan cerrados; no son emisores de ondas electromagnéticas.

Analicemos ahora qué sucede si se incrementa la frecuencia de las oscilaciones.

TRABAJO DE LABORATORIO 14 Obtención de oscilaciones de alta frecuencia en un autooscilador

Instrumentos y materiales: tablero para el montaje de circuitos eléctricos y electrónicos. Conjunto de semiconductores, cables de conexión, fuente de CD.

Indicaciones para el trabajo

1. Monta un circuito similar al que se muestra en la figura 10.6. La tensión de salida de la fuente debe ser de 12 V.
2. Conecta los audífonos entre los puntos a y b. Escucha por ellos el sonido provocado por las oscilaciones de la corriente. ¿Cómo puedes variar la frecuencia de las oscilaciones? Compruébalo.
3. Desconecta el circuito que vincula el punto B de la bobina con la base del transistor. ¿Qué sucede?
4. Sustituye el condensador de $0,1 \mu\text{F}$ por la variable de capacidad $0-500 \text{ pF}$, y la bobina de 1 000 espiras por la pequeña sin núcleo. ¿Por qué no se percibe sonido? ¿Cómo demostrar que el circuito está oscilando?

Con el osciloscopio se comprueba que, en un circuito autooscilador en el que los valores de la capacidad y la inductancia son pequeños, la frecuencia de las oscilaciones de la corriente es alta. Si se explora con otro circuito oscilatorio similar las proximidades del autooscilador, se comprueba que, en el primero, se inducen oscilaciones forzadas de alta frecuencia, que se transmiten de un circuito al otro por medio de las variaciones de los campos eléctrico y magnético.

Sin embargo, solamente el valor de la frecuencia de las oscilaciones no garantiza la emisión de ondas electromagnéticas a distancias considerables. En este circuito las ondas electromagnéticas emitidas son muy débiles.

¿Cómo se generan las ondas electromagnéticas en un circuito oscilador?

El primero en obtener la generación de un campo electromagnético viajero fue Hertz. Para ello utilizó una instalación sencilla, denominada oscilador de Hertz. Este circuito constituyó el primer oscilador abierto creado por el hombre.

Teóricamente, un oscilador abierto se puede obtener a partir de uno cerrado si se reducen el número de espiras de la bobina y el área de las placas del condensador, y después se separan hasta obtener un circuito como el que se muestra en la figura 10.8.

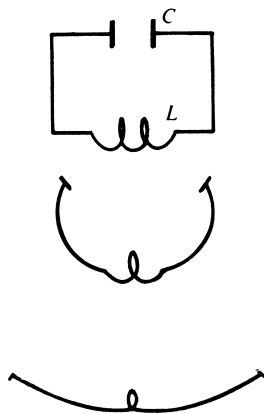


Fig. 10.8

En este circuito, los valores de la capacidad y de la inductancia son muy pequeños, por lo que las oscilaciones que se producen en él son de alta frecuencia, del orden de los megahertz.¹

¹ Un megahertz (MHz) = 10^6 Hz.

Para excitar oscilaciones en un circuito similar al descrito, Hertz preparó dos varillas separadas cierta distancia entre sí. Después, les aplicó una tensión elevada, del orden de los cientos de kilovolt, con ayuda de un carrete de inducción, de forma que las varillas adquirieron cargas de signos contrarios. Cuando la tensión entre las varillas alcanzó el valor de ruptura de la rigidez dieléctrica del aire, saltó una chispa. Durante el tiempo en que esta se mantuvo, el circuito se cerró a través de ella, y se produjeron oscilaciones de alta frecuencia de una varilla a la otra (fig. 10.9).

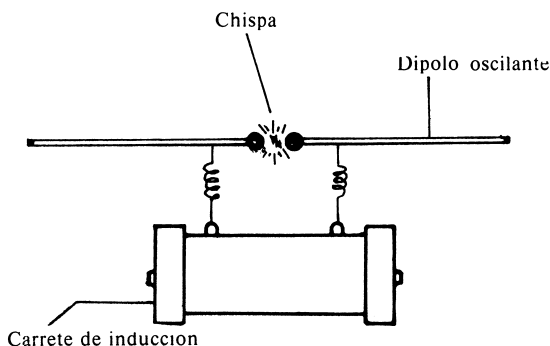


Fig. 10.9

Un instante antes de producirse la descarga, el campo eléctrico del sistema de varillas, que recibe el nombre de dipolo, tiene la configuración que se muestra en la figura 10.10a. Al iniciarse la chispa, las partículas cargadas se ponen en movimiento aceleradamente, por lo que el campo eléctrico comienza a variar. A la vez las partículas cargadas en movimiento determinan un campo magnético variable. La variación del campo eléctrico ocurre, en este caso, en un plano que contiene al dipolo, mientras que las variaciones del campo magnético tienen lugar en un plano perpendicular a este. En la figura 10.10b se muestran las líneas de inducción del campo magnético y las líneas de fuerza del campo eléctrico en torno al dipolo en el que se están produciendo las oscilaciones electromagnéticas.

Las variaciones de los campos eléctrico y magnético, como predijo Maxwell, hacen que estos se induzcan mutuamente, alejándose cada vez más del dipolo y dando lugar al campo electromagnético viajero, que recibe el nombre de onda electromagnética.

La emisión de las ondas electromagnéticas ocurre con máxima intensidad en la dirección OO' , perpendicular al eje del dipolo oscilador.

Hertz detectó las ondas electromagnéticas con la ayuda de un circuito oscilador móvil (resonador), constituido por una espira abierta en el punto P (fig. 10.11a). Al manipular el tornillo T , se regula la distancia entre los extremos del circuito y, por tanto, su frecuencia.

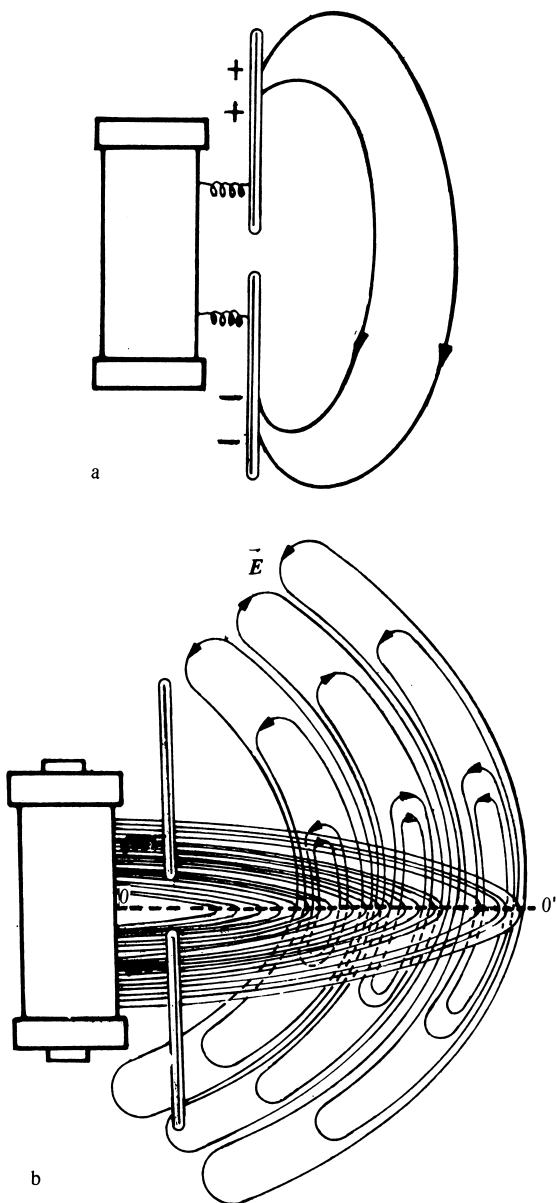


Fig. 10.10

Bajo la acción del campo eléctrico variable que forma parte de la onda electromagnética radiada por el dipolo, en la espira se inducen oscilaciones forzadas de la misma frecuencia que la de este campo. Cuando la

frecuencia propia del resonador coincide con la del emisor se produce la resonancia, lo que determina un máximo en la amplitud de la tensión inducida en el resonador. Hertz descubrió la existencia de las ondas electromagnéticas al observar una chispa en el punto P del resonador, colocado a cierta distancia del dipolo emisor (fig. 10.11b).

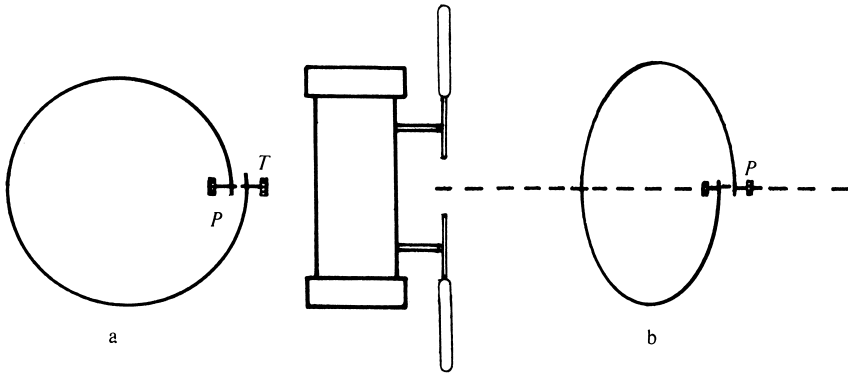


Fig. 10.11

Para detectar la generación de las ondas electromagnéticas también se puede emplear un dipolo explorador similar al del emisor, pero que posea una válvula de destello en la parte central del dipolo. Al actuar el campo electromagnético sobre el dipolo receptor, las oscilaciones forzadas de las partículas iluminan a la válvula (fig. 10.12).

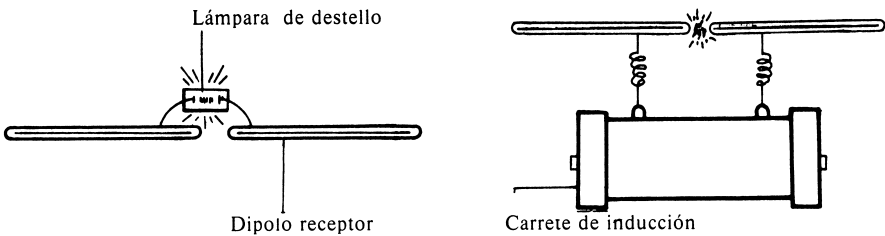


Fig. 10.12

Hertz no solo descubrió la existencia de las ondas electromagnéticas que se propagan lejos del oscilador que las excitó, sino que también realizó experimentos que evidenciaron su naturaleza ondulatoria y que condujeron a corroborar la certeza de las predicciones de Maxwell. ¿Cuáles propiedades caracterizan y evidencian el carácter ondulatorio de las ondas electromagnéticas?

Tareas

8. ¿Qué se debe entender por circuito cerrado?
Describe brevemente cómo se puede pasar de un circuito oscilante cerrado a uno abierto.
9. ¿Por qué el circuito representado en la figura 10.6 se denomina autooscilador?
10. ¿Cómo se puede variar la frecuencia de un circuito oscilador?
11. Si se desea incrementar al doble la frecuencia de un autooscilador, ¿qué debe hacerse a la capacidad del condensador?
12. ¿En qué consiste el experimento de Hertz?
13. ¿Cómo detectaba Hertz las ondas electromagnéticas emitidas por el emisor creado por él?
14. Describe el mecanismo de la generación de las ondas electromagnéticas en el dipolo de Hertz.

10.5 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Aunque Hertz detectó varias de las propiedades de las ondas electromagnéticas empleando su emisor de dipolo, este no es el más adecuado para estudiar en la escuela esas propiedades, pues no resulta fácil obtener la generación continua de ondas electromagnéticas, ya que en el dipolo de Hertz se producen sucesivas oscilaciones que se amortiguan con cada chispa. Además, la forma de detectarlas no permite localizarlas en zonas alejadas del dipolo, donde son muy débiles.

Para estudiar las propiedades de las ondas electromagnéticas emplearemos un generador de muy alta frecuencia, del orden de los 10 GHz (10^{10} Hz) (fig. 10.13). En éste, las ondas electromagnéticas son producidas por un autooscilador que produce oscilaciones en los electrones de una varilla, la cual se encuentra en posición vertical dentro de un recinto metálico que hace la función de antena emisora y que tiene forma de trompeta (1).

El generador (autooscilador) se alimenta de una fuente (2) capaz de incorporarle una señal de baja frecuencia, audible, a las ondas que genera el emisor.

Para detectar las ondas, el conjunto cuenta con dos receptores: uno del tipo de dipolo, constituido por una pequeña varilla de iguales dimensiones que la del oscilador (3), y el otro formado por un dipolo que se encuentra en el interior de una antena receptora de tipo trompeta (4) que refuerza a las ondas que recibe.

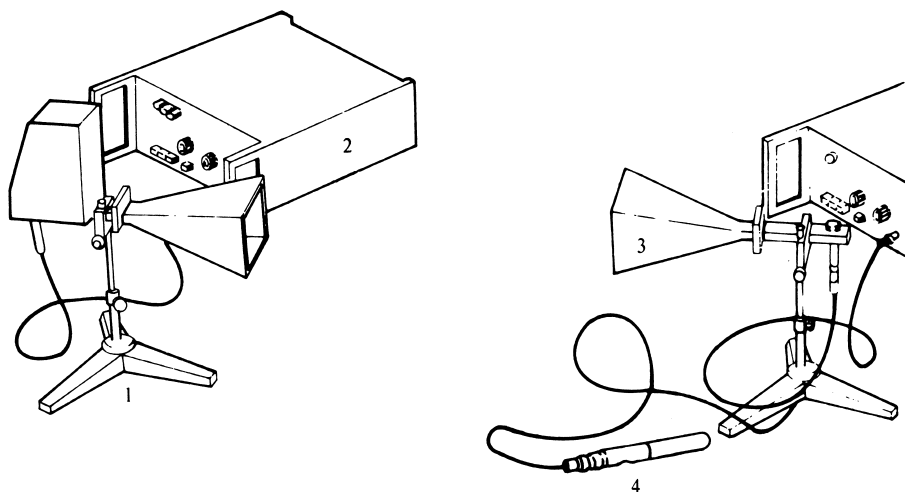


Fig. 10.13

Al conectar uno cualquiera de los receptores con un equipo amplificador, se detecta la presencia de las ondas electromagnéticas mediante la señal acústica de baja frecuencia que la acompaña, que se hace audible en una bocina que tiene el amplificador.

Generación y propagación de las ondas electromagnéticas

Con una instalación como la que se muestra en la figura 10.13, y empleando el dipolo receptor, se demuestra que el generador emite las ondas electromagnéticas según una dirección que pasa por la posición en la que se encuentra el dipolo del generador, y que la antena en forma de trompeta las emite según un haz estrecho, similar a como hace el espejo esférico de una linterna con la luz emitida por un bombillo situado en el foco del espejo.

Las ondas electromagnéticas se reflejan totalmente en las superficies metálicas. Esto se demuestra colocando una placa de metal como se ilustra en la figura 10.14. En esas condiciones las ondas no llegan al dipolo receptor, no se detectan. Entonces, una lámina de metal se comporta en forma análoga a como lo hace un espejo plano en el caso de la luz.

El cumplimiento de la ley de reflexión se comprueba con el montaje de la figura 10.15.

Si, en el caso del experimento que se muestra en la figura 10.14, la lámina metálica se sustituye por una de plástico, se comprueba que la señal recibida se debilita al atravesarla, es decir, al refractarse normalmente en ella.

Un experimento fundamental, que demuestra el carácter ondulatorio de las ondas electromagnéticas, consiste en producir con ellas el fenómeno de la difracción. Si a lo largo de la dirección de propagación de las on-

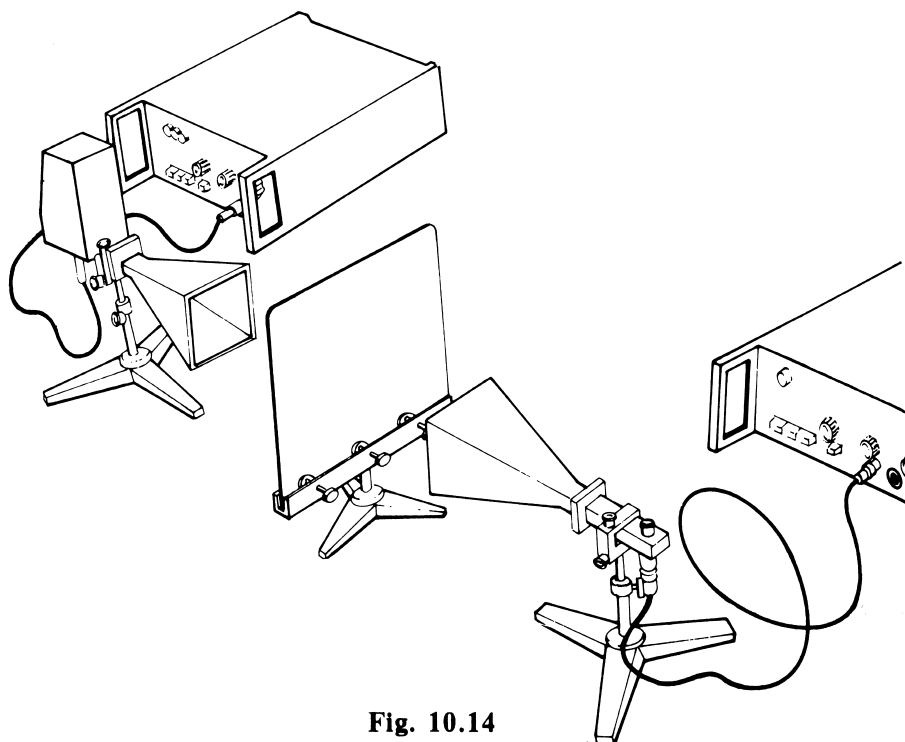


Fig. 10.14

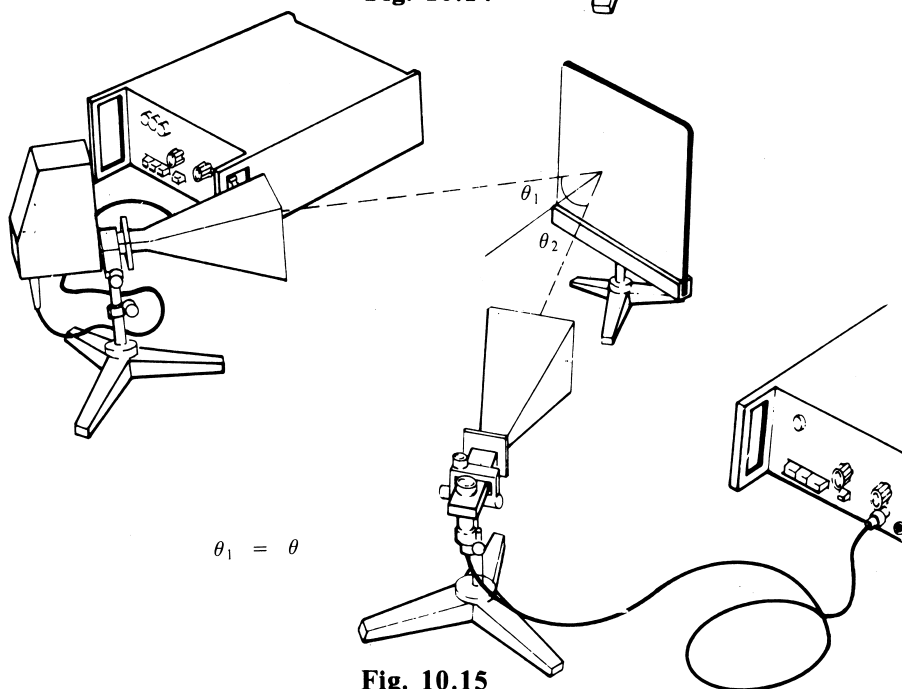


Fig. 10.15

das, colocamos un disco metálico de unos 10 cm de diámetro (fig. 10.16) y después exploramos la parte posterior del disco con el dipolo receptor, detectaremos algo aparentemente paradójico: exactamente detrás del disco se detecta la presencia de las ondas electromagnéticas. Esto significa que se produce el contorneo del disco. Además, al continuar la exploración detrás del disco, según una dirección AB perpendicular a la de propagación de las ondas, se detecta que hay zonas donde llegan las ondas y otras donde no llegan. Es decir, se encuentra un patrón de interferencia en el que se alternan las zonas de máximos y de mínimos, similar al que se produce durante la difracción de las ondas mecánicas en el agua.

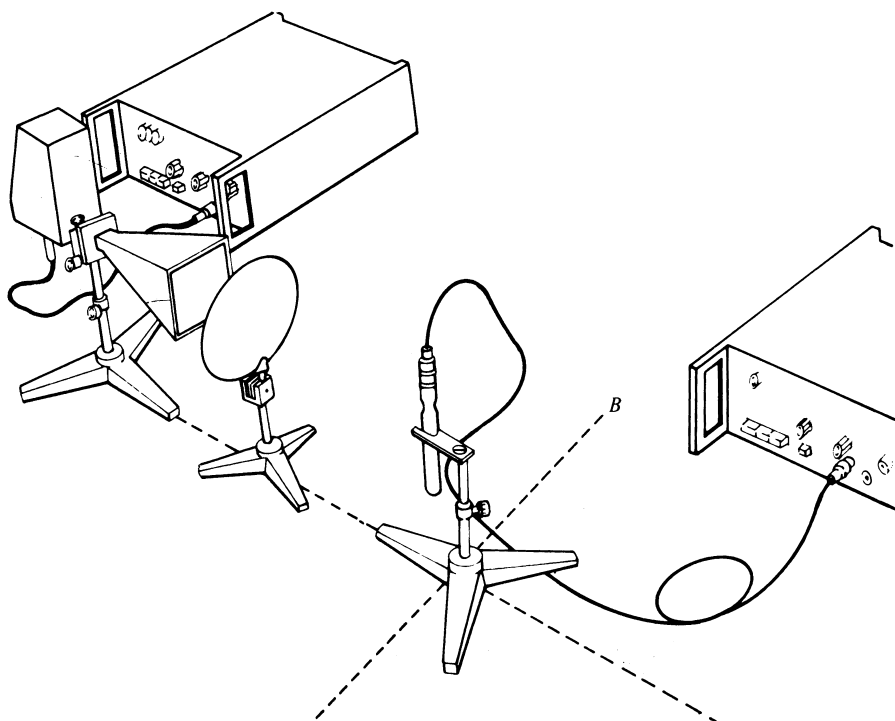


Fig. 10.16

Las ondas electromagnéticas son transversales. El campo eléctrico oscila en un plano que contiene al dipolo emisor, mientras que el magnético lo hace en un plano perpendicular al primero (fig. 10.17). Estas propiedades se comprueban mediante un experimento simple.

Cuando colocamos el receptor frente al emisor, las ondas se detectan porque el campo eléctrico de ellas provoca oscilaciones forzadas a lo largo del eje del dipolo receptor. Es decir, cuando los ejes del dipolo emisor y del receptor son paralelos. Si giramos el eje del dipolo receptor, la am-

plitud de las oscilaciones forzadas en él se reducen hasta anularse cuando su eje se encuentra a 90° con relación al del emisor. En este momento, el eje del dipolo es colineal a las líneas de inducción del campo magnético, pues la componente magnética de la fuerza de Lorentz no actúa sobre las cargas en reposo. Si el dipolo se lleva de nuevo a la posición inicial, se detectan nuevamente las oscilaciones forzadas por la componente eléctrica de la fuerza de Lorentz.

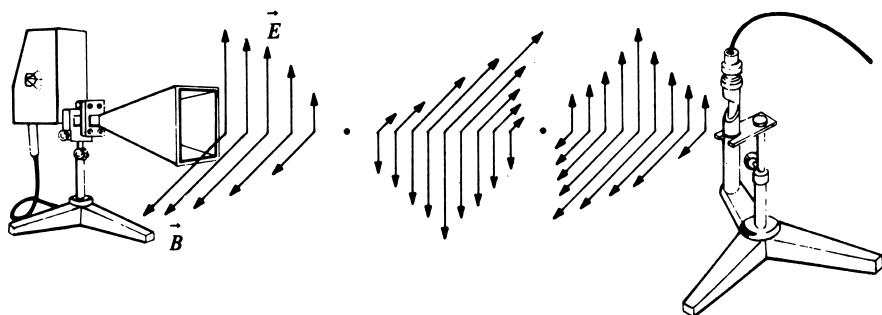


Fig. 10.17

Este tipo de ondas transversales, en el que las variaciones de los campos ocurren en un solo plano, reciben el nombre de *ondas polarizadas*. La polarización de las ondas emitidas por el generador utilizado, se puede comprobar también empleando una rejilla formada por varillas metálicas paralelas. Al colocar la rejilla de forma que las varillas queden paralelas al plano en el que ocurren las variaciones del campo eléctrico, la onda no la atraviesa, pues parte de su energía se disipa al producir oscilaciones forzadas de las partículas cargadas de las varillas, y el resto se refleja (fig 10.18). Cuando se gira la rejilla hasta que las varillas queden formando un ángulo de 90° con el plano de variación del campo eléctrico, entonces las ondas atraviesan la rejilla. Este fenómeno sólo ocurre en el caso de las ondas que son transversales.

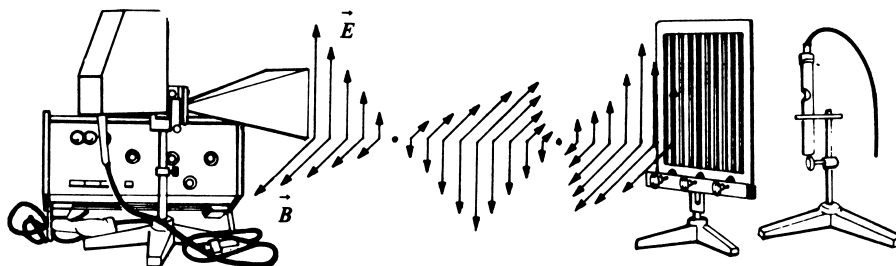


Fig. 10.18

Una confirmación de la certeza de las predicciones de Maxwell y del carácter ondulatorio de las ondas electromagnéticas, consiste en determinar experimentalmente su velocidad de propagación.

Con esta finalidad utilizaremos un método conocido, que empleamos en décimo grado para determinar la velocidad de propagación de las ondas sonoras: provocar un cuadro de ondas estacionarias y, a partir de él, medir la longitud de onda de las emitidas por el dipolo emisor. Puesto que conocemos que la frecuencia del generador es $\nu = 10 \text{ GHz}$, será fácil calcular la velocidad de las ondas electromagnéticas mediante la ecuación:

$$v = \lambda \nu \quad (10.1)$$

Con el montaje que se muestra en la figura 10.19a se produce en la zona comprendida entre el generador y la placa metálica, un cuadro de ondas estacionarias. Desplazando lenta y cuidadosamente el dipolo receptor a lo largo de la dirección OA , resulta fácil detectar la presencia de los vientres en las zonas donde las ondas, provenientes directamente del emisor, interfieren reforzándose con las reflejadas en la placa, así como las zonas de nodos en las que la interferencia es por atenuación (fig. 10.19b).

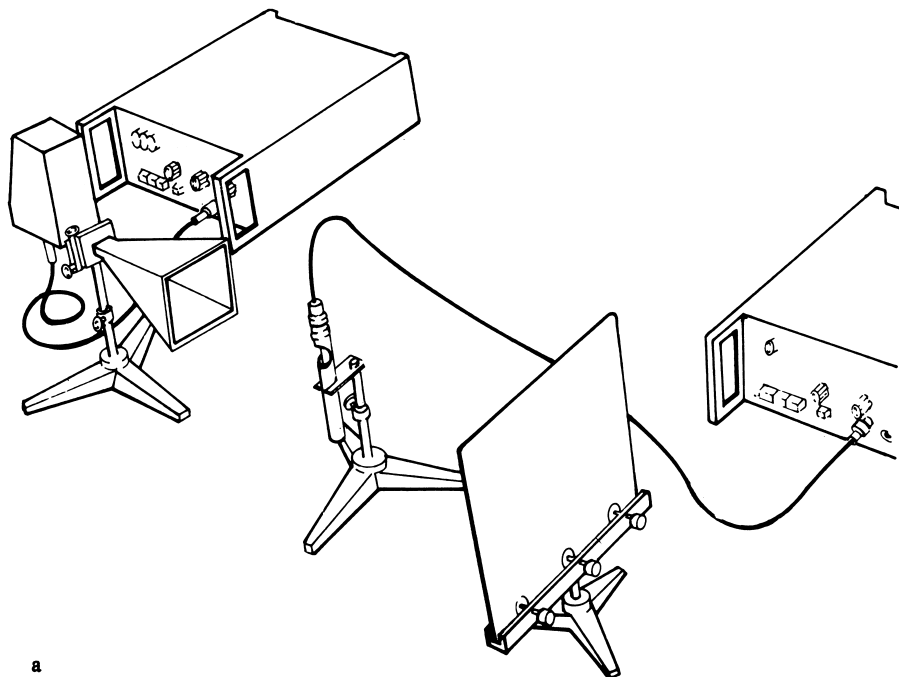


Fig. 10.19

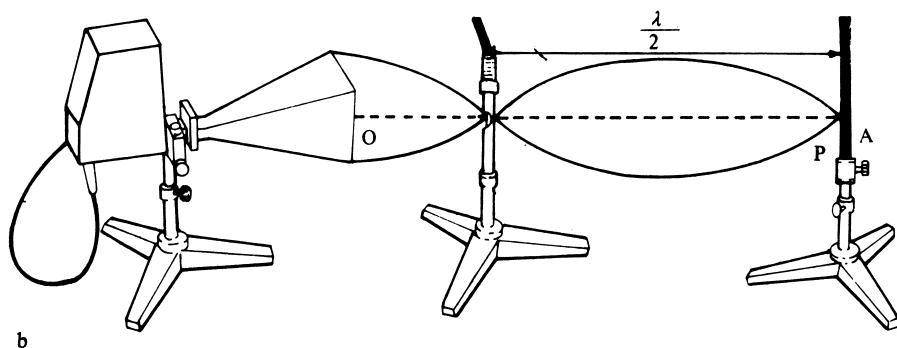


Fig. 10.19

Midiendo la distancia entre dos nodos o vientres consecutivos, se obtiene, con este generador, una distancia de 1,5 cm ($1,5 \cdot 10^{-2}$ m).

Puesto que esa distancia corresponde a media longitud de onda, es decir:

$$\frac{\lambda}{2} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

entonces el valor de la longitud de las ondas emitidas es de $3,0 \cdot 10^{-2}$ m.

Mediante la ecuación 10.1, se obtiene que la velocidad de las ondas electromagnéticas es:

$$v = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 10^{10} \text{ Hz}$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Valor que coincide con el de la velocidad de la luz, tal como fue previsto por Maxwell.

Tareas

15. Menciona tres propiedades de las ondas electromagnéticas. Describe el experimento que emplearías para evidenciar una de dichas propiedades.
16. En la figura 10.20 se representa esquemáticamente una onda electromagnética que sale del plano del papel. En la figura 10.20a se muestra el esquema de un dipolo receptor cuyo eje es colineal con las líneas de fuerza del campo eléctrico, y en la 10.20b el mismo dipolo pero en este caso colineal con las líneas de inducción del campo magnético. Explica en cuál caso el dipolo detecta la presencia de la onda electromagnética.

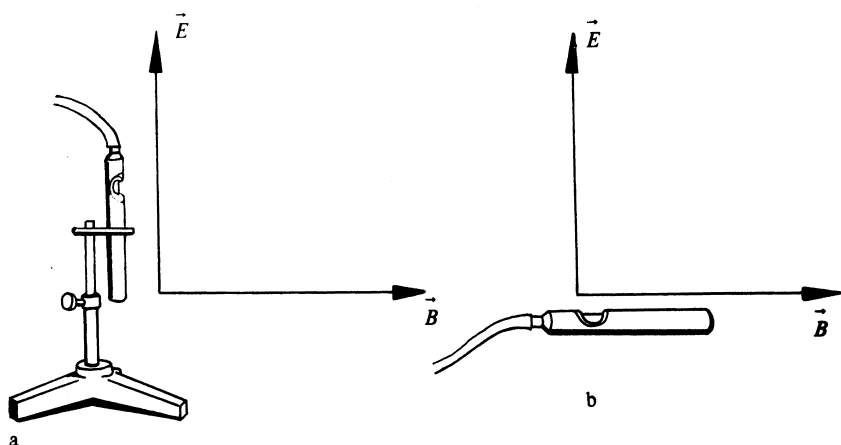


Fig. 10.20

17. Un radar emite ondas electromagnéticas de $\lambda = 1 \text{ m}$.

- ¿Cuál es la frecuencia del generador que activa el radar?
- ¿Qué propiedad de las ondas electromagnéticas es la que garantiza que el radar pueda detectar la presencia de un avión?

10.6 Principios de la telecomunicación

El siglo xx se ha caracterizado por un impetuoso desarrollo de las telecomunicaciones, es decir, que permiten transmitir a grandes distancias información oral y visual. La radio primero, y después la televisión han sido los exponentes más representativos de este hecho.

El principio de la telecomunicación se sustenta en el fenómeno de la generación, transmisión y recepción de las ondas electromagnéticas.

Las etapas que comprende este proceso son:

- 1) Un generador de alta frecuencia (G.A.F.) produce oscilaciones electromagnéticas en un radiador (antena emisora), el cual emite al espacio ondas electromagnéticas de alta frecuencia, capaces de propagarse por el espacio hasta grandes distancias del emisor.
- 2) Durante el proceso de generación de las ondas electromagnéticas, a estas se les incorpora la información a transmitir mediante un proceso denominado modulación, que consiste en superponer a las oscilaciones de alta frecuencia, oscilaciones de baja frecuencia para obtener oscilaciones resultantes, denominadas moduladas.
- 3) En la antena, las oscilaciones moduladas de alta frecuencia provocan la generación de ondas electromagnéticas también moduladas, que son las portadoras de la información.

- 4) Al llegar las ondas portadoras moduladas a una antena receptora, provocan en esta oscilaciones forzadas de alta frecuencia moduladas.
- 5) En el receptor se separan las oscilaciones de baja frecuencia de las oscilaciones de alta frecuencia. Este proceso se denomina demodulación o detección.
- 6) El resultado de la detección es una señal que se convierte en sonido, imágenes o ambas.

En la figura 10.21 se muestran esquemáticamente los distintos pasos del proceso descrito.

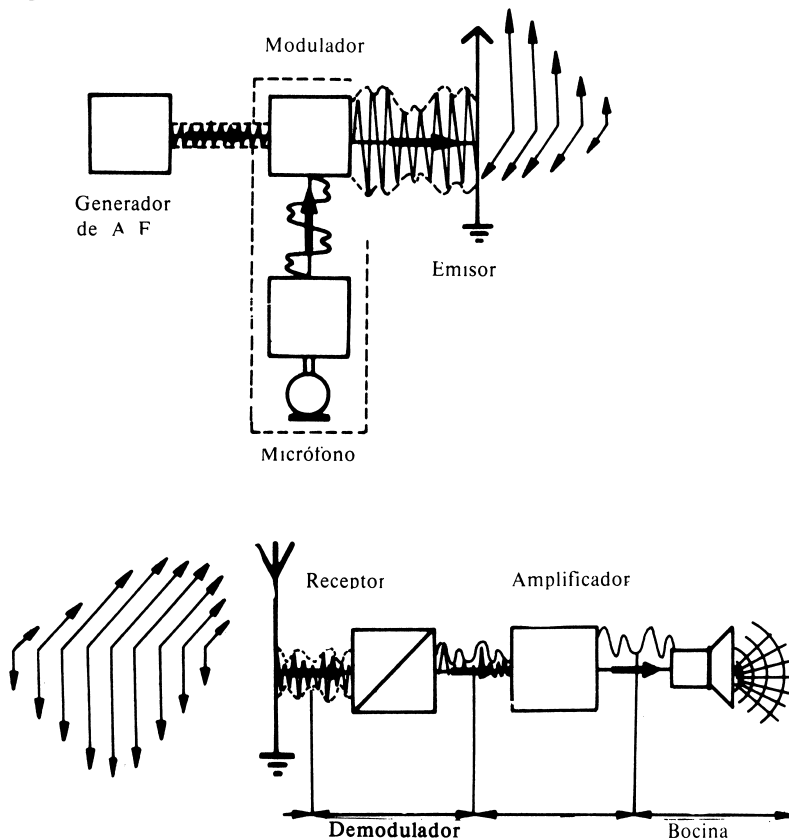


Fig. 10.21

Veamos ahora cómo se produce el proceso de modulación y demodulación de las ondas electromagnéticas.

Modulación de amplitudes

Analicemos cómo modular las oscilaciones de alta frecuencia que se producen en un autooscilador sencillo, como el que utilizaste en el traba-

jo de laboratorio 14. Las oscilaciones se automantienen porque el transistor regula el suministro de energía al circuito con la misma frecuencia que este oscila, pues el propio circuito, mediante su acoplamiento con la base del transistor, regula el proceso de realimentación.

Con el osciloscopio podemos comprobar que las oscilaciones en el circuito se mantienen aunque se varíe la frecuencia de sus oscilaciones al variar la capacidad del condensador.

Si, mediante un acoplamiento inductivo (fig. 10.22), suministramos oscilaciones de baja frecuencia por la base del transistor, estas se superponen a las de alta frecuencia. Se obtienen entonces oscilaciones con amplitud modulada por las de baja frecuencia.

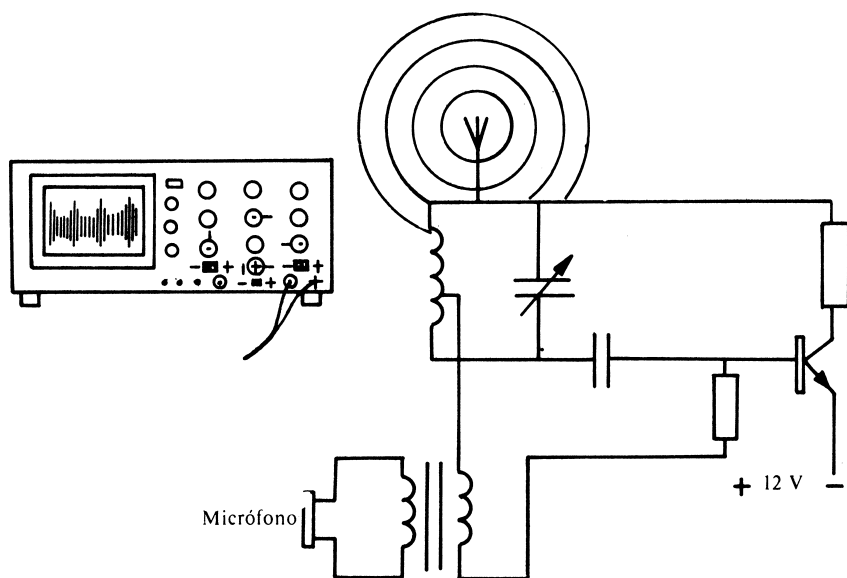


Fig. 10.22

El proceso de modulación de las oscilaciones de alta frecuencia (fig. 10.23a) por otras de baja frecuencia (fig. 10.23b) para obtener oscilaciones resultantes (fig. 10.23c), se puede estudiar con un osciloscopio.

Sintonización y detección de las ondas moduladas

Para recibir las ondas electromagnéticas moduladas se emplean receptores. Las ondas electromagnéticas provocan oscilaciones forzadas en el circuito del receptor, que se hacen máximas cuando su frecuencia es igual a la frecuencia de las ondas electromagnéticas recibidas. El proceso de llevar a resonancia el circuito receptor se denomina *sintonización*.

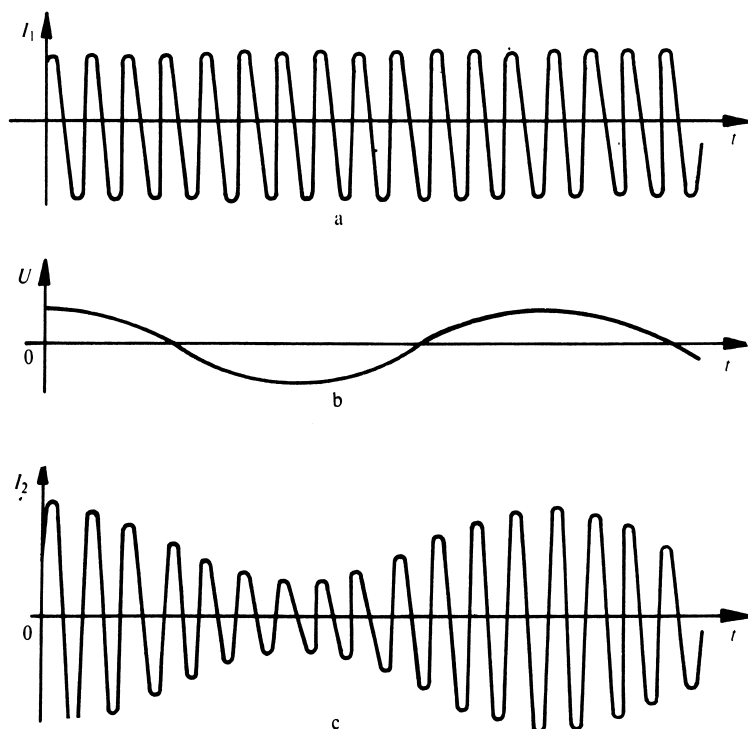


Fig. 10.23

TRABAJO DE LABORATORIO 15

Sintonización de un circuito oscilante

Instrumentos y materiales: tablero para el montaje de circuitos eléctricos y electrónicos, conjunto de semiconductores, fuente de CD, cables de conexión; multímetro.

Instrucciones para el trabajo

1. Conecta con la fuente de CD el autooscilador de alta frecuencia.
2. Prepara un circuito receptor constituido por los componentes que se muestran en la figura 10.24.
3. Lleva el control del condensador variable del generador a su posición central. Sitúa el receptor próximo al emisor. Manipula el control del capacitor variable del receptor hasta lograr que la intensidad de la corriente inducida en él sea máxima. Compara las posiciones de las placas de los condensadores de ambos circuitos.

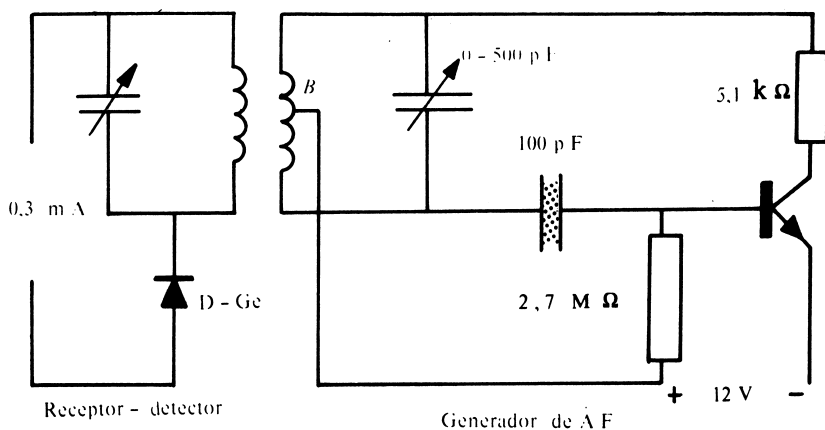


Fig. 10.24

4. Traza un esquema de la gráfica aproximada de la intensidad de la corriente en función de la frecuencia propia del circuito.
5. Cambia la frecuencia del generador. ¿Qué debes hacer para sintonizar de nuevo el receptor?

Si se conecta un osciloscopio primero con el generador y después con el receptor, se demuestra que la sintonización del receptor ocurre cuando su frecuencia propia coincide con la del generador. En estas condiciones, el receptor se encuentra en resonancia con el emisor, y razón por la cual la corriente en él es máxima.

Si estando sintonizado el receptor con el emisor se modulan las oscilaciones de este último con una señal de baja frecuencia, por ejemplo de 1 kHz (rango audible), y se conecta al receptor una bocina o altoparlante que esté acoplado a un amplificador, no se perciben las oscilaciones de baja frecuencia, aunque con el osciloscopio se comprueba que el receptor está recibiendo las ondas electromagnéticas de alta frecuencia moduladas.

Esto se debe a que la bocina no responde a oscilaciones de frecuencia elevadas. Incluso nuestros oídos no perciben oscilaciones de frecuencia mayor a los 20 kHz.

Entonces, para poder percibir la señal audible (1 kHz en este caso) es necesario separarla de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia.

El proceso de separación de las señales audibles de las de alta frecuencia se denomina *detección*.

Como detector se emplea un diodo. Si conectamos un diodo en serie con el circuito del receptor, la señal modulada de alta frecuencia queda rectificada en media onda, por lo que la corriente en la parte externa del circuito oscilante circula en un solo sentido.

Por el circuito circulará una corriente pulsante cuya gráfica se muestra en la figura 10.25.

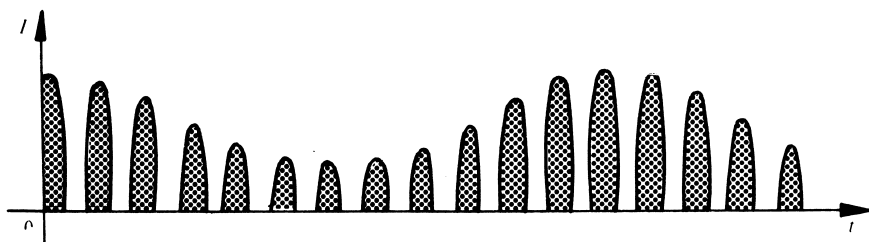


Fig. 10.25

Esta corriente se atenúa con un filtro sencillo (fig. 10.26), constituido por un condensador (filtro) conectado en paralelo con la resistencia de carga. El filtro trabaja de la manera siguiente: en el instante en que el diodo permite el paso de la corriente, una parte de esta circula a través de la resistencia de carga y la otra se ramifica por el condensador, cargándolo (flecha continua en la figura 10.26). La ramificación de la corriente disminuye el valor máximo de los picos de los pulsos que circula a través de la resistencia de carga. Posteriormente, en el intervalo entre los pulsos, cuando el diodo está bloqueado, el condensador se descarga a través de la resistencia. Por ello, en el intervalo entre los pulsos, la corriente también circula a través de la resistencia en el mismo sentido (línea discontinua en la figura 10.26) y la tensión en ella no desaparece. Cada nuevo pulso carga el condensador.

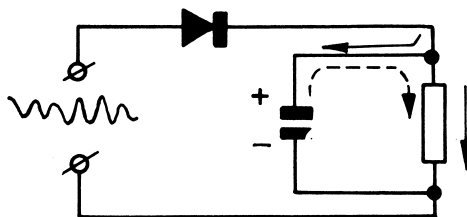


Fig. 10.26

Este proceso está representado en la figura 10.27a. A causa de ello, a través de la resistencia de carga circula una corriente de frecuencia audible en forma de oscilaciones, con características iguales a las de las señales de baja frecuencia producidas en la estación transmisora (fig. 10.27b). Esta corriente puede considerarse como la resultante de una corriente pulsante de baja frecuencia (I_1) idéntica a la que circula por el micrófono, que tiene superpuestas oscilaciones de pequeña amplitud pero de alta frecuencia (I_2) (fig. 10.27c).

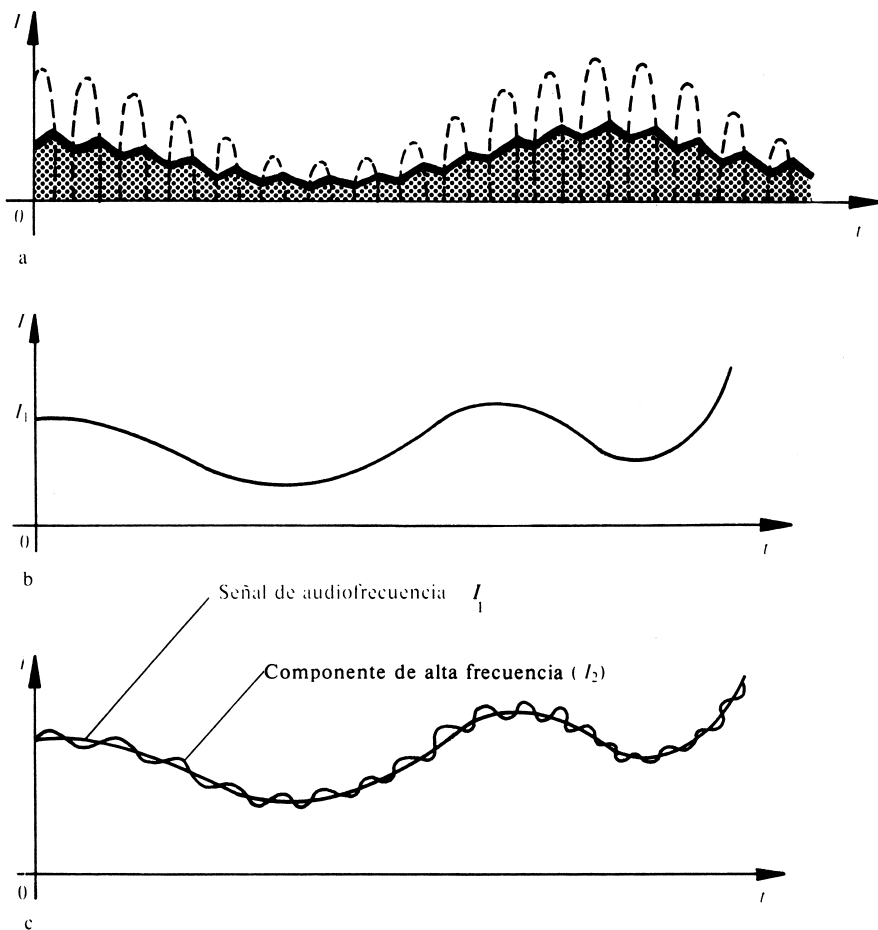


Fig. 10.27

Un receptor sencillo de detección está compuesto por un circuito oscilante conectado con una antena. En paralelo con dicho circuito están conectados el detector y los audífonos (fig. 10.28).

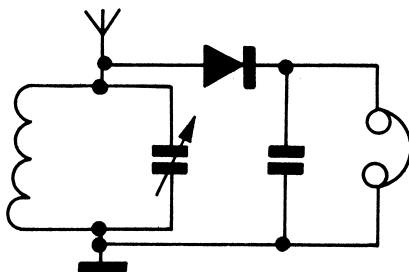


Fig. 10.28

La resistencia de los audífonos realiza la función de carga. A través de ella circula la corriente de frecuencia audible.

Las pulsaciones de alta frecuencia no interfieren notablemente las oscilaciones audibles de la membrana del micrófono porque ellas, además de no ser percibidas por los oídos, son desviadas a través del circuito del condensador.

En los radioreceptores las señales detectadas se amplifican para que se puedan percibir simultáneamente por varios oyentes. En la figura 10.29 se muestra el esquema de un radioreceptor sencillo, constituido por el circuito acoplado a un circuito de un paso de amplificación.

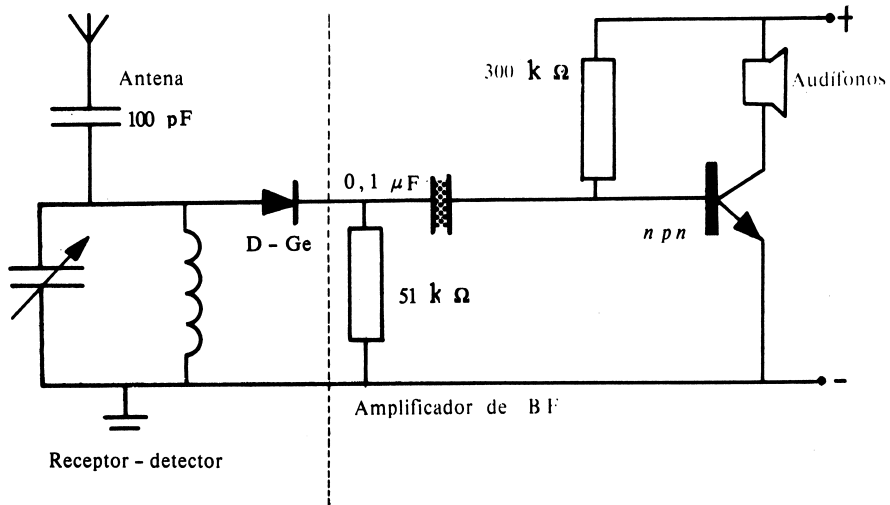


Fig. 10.29

Tareas

18. Menciona los fenómenos sobre los que se sustenta el principio de la telecomunicación.
19. Describe las etapas que comprende el proceso de la telecomunicación.
20. En qué consisten los fenómenos de modulación, sintonización y detección de las ondas electromagnéticas.
21. Generalmente, el control de sintonía de un radioreceptor está constituido por un condensador variable. Si el receptor se ha sintonizado con una estación de radio que trasmite a una frecuencia de 500 kHz.

¿Qué debe hacerse para sintonizar otra estación que transmite a una frecuencia de 700 kHz?

10.7 Utilización de las ondas electromagnéticas

La transmisión de múltiples programas radiales y televisivos simultáneamente por un número elevado de estaciones de radio y de televisión, exige que los transmisores empleen distintas frecuencias, de forma que se puedan sintonizar por separado sin que se interfieran.

Para lograr esto, se han desarrollado equipos que transmiten en distintas bandas de frecuencia.

La denominada banda de ondas largas de radio está integrada por un rango de frecuencias comprendidas entre 10 y 100 kHz (banda de 30 000 a 3 000 m), a la banda de onda media (OM), en la que transmiten las estaciones de radio comunes, le corresponde un rango de frecuencias que va desde los 100 kHz a los 1,5 MHz (banda de 3 000 a 200 m).

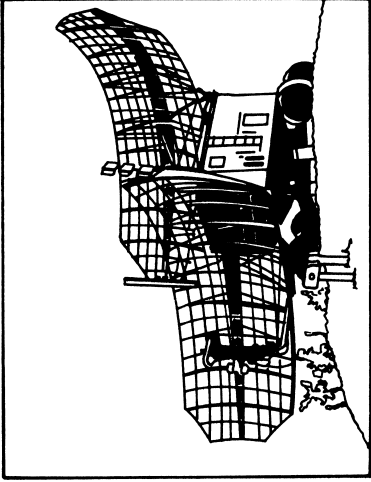
Las estaciones de televisión transmiten en bandas de frecuencia más elevadas. Los canales de televisión normales (del 2 al 13) transmiten en las denominadas altas frecuencias de video (VHF), en el rango de 30-300 MHz (bandas de 10-1 m). Los televisores que reciben transmisiones de ultra alta frecuencia (UHF) son capaces de sintonizarse en un rango de frecuencias de 300 a 3 000 MHz (banda de 100 a 10 cm).

La denominada frecuencia modulada, FM, se transmite en un rango que se extiende de los 88 a los 108 MHz, y ocupa parte de la banda VHF de televisión.

Las microondas, denominadas también de superalta frecuencia se corresponden con un rango de frecuencia que se extiende de los 1 000 MHz a los 300 000 MHz. En esta banda transmiten canales de televisión direccionales, por vía satélite (por ejemplo, el canal Cuba-Visión (internacional) transmite con una frecuencia próxima a los 3 GHz). Las microondas se emplean también en las técnicas de radar. En la figura 10.30 se muestra un esquema del proceso de radiolocalización por radar de un avión.

Los generadores de ondas electromagnéticas creados por el hombre, con funcionamiento basado en circuitos electrónicos osciladores, solo son capaces de radiar ondas hasta frecuencias del orden de 10^6 MHz, es decir, en la banda milimétrica. Ondas electromagnéticas de menor longitud de onda son generadas por los radiadores atómicos. En este caso se encuentran las radiaciones térmicas (o infrarrojas) y las ondas luminosas. En la figura 10.31 se muestra la escala de ondas electromagnéticas. Las radiaciones electromagnéticas de más alta frecuencia, conocidas hasta el momento, corresponden a las radiaciones gamma, que se producen en los procesos de desintegración nuclear.

Los denominados rayos X, tan utilizados en los centros hospitalarios, son un tipo de ondas electromagnéticas de muy corta longitud de onda y se obtienen durante el frenado brusco de los electrones.



a

b

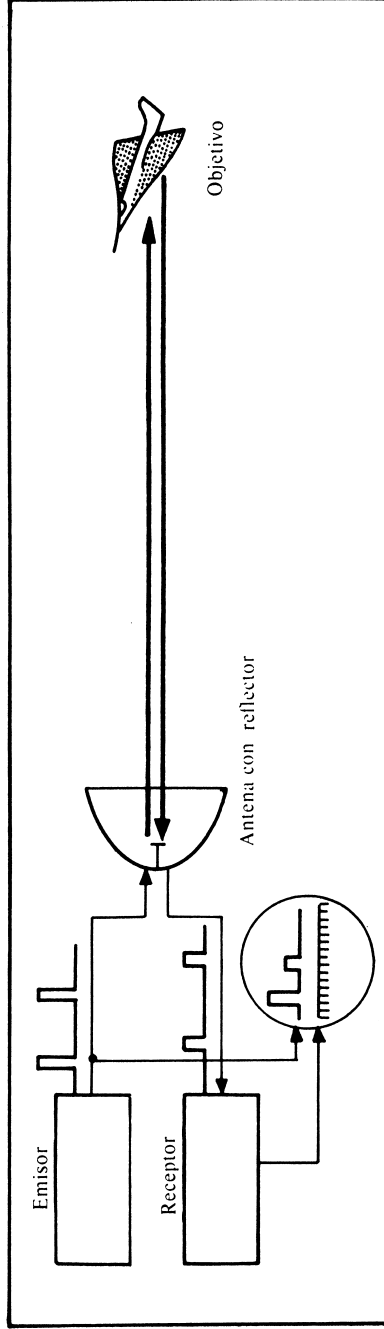


Fig. 10.30

Escala de ondas electromagnéticas

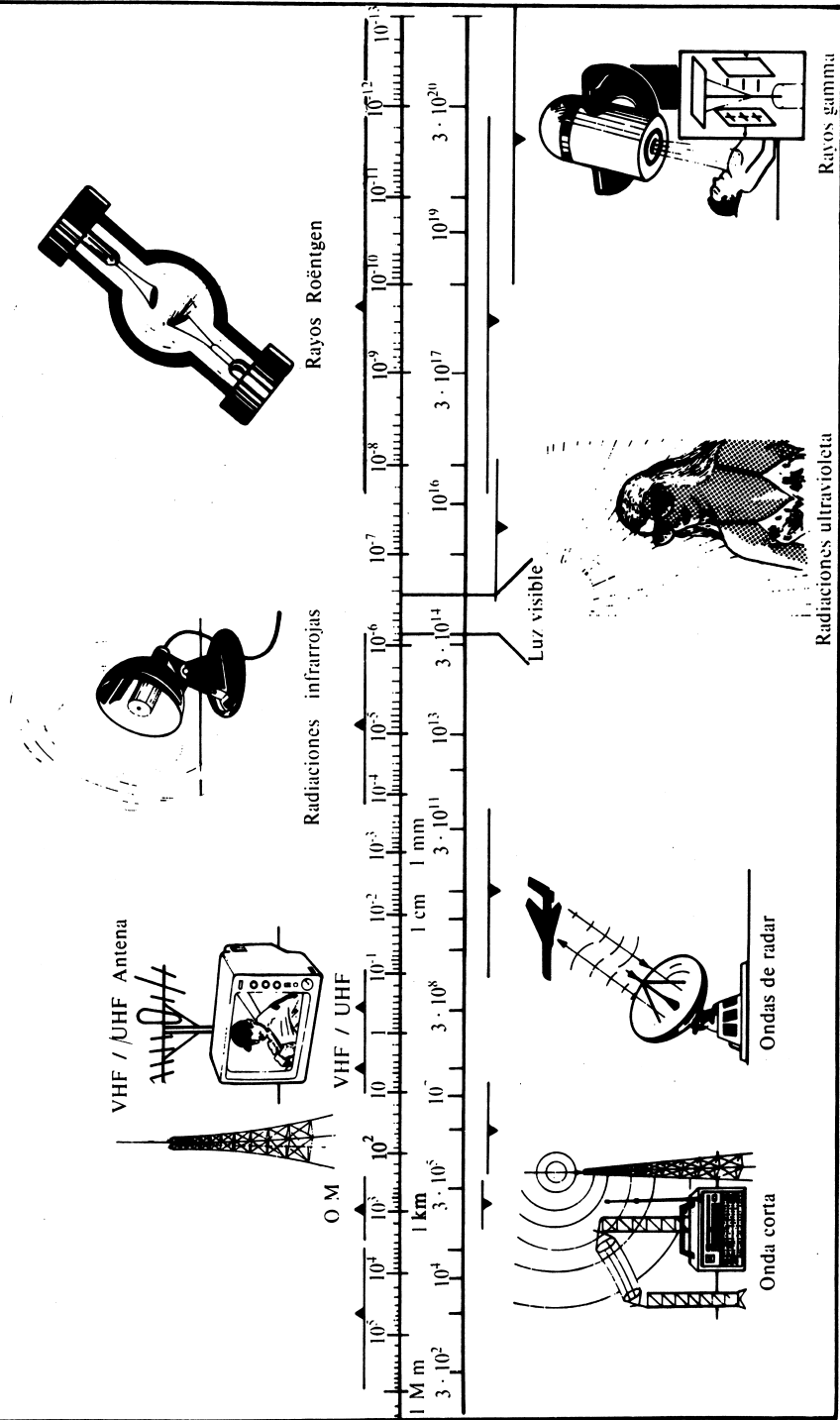


Fig. 10.31

RESPUESTAS A LAS TAREAS GENERALES DE LOS CAPÍTULOS

Capítulo 5

1. $r = 0,2 \, \Omega$; $I = 120 \, \text{A}$
2. $r = 0,2 \, \Omega$; $\varepsilon = 37 \, \text{V}$
3. Gráfica U/I , que pasa por $U_R = 6 \, \text{V}$ e $I = 60 \, \text{A}$
4. $U_R = 10 \, \text{V}$
5. $I_1 = 4 \, \text{A}$; $I_2 = 1 \, \text{A}$
6. a) $I_1 = 1 \, \text{A}$; $I_2 = 0,3 \, \text{A}$; $I_3 = 0,16 \, \text{A}$
b) $I_1 = 2 \, \text{A}$; $I_2 = 0,6 \, \text{A}$; $I_3 = 0,3 \, \text{A}$
7. $I = 1,52 \, \text{A}$; $D = 1,2 \cdot 10^{-4} \, \text{m}$
8. $R = 8,8 \, \Omega$; $I_1 = 2,75 \, \text{A}$; $I_2 = 1,83 \, \text{A}$
9. $I = 4,8 \, \text{A} = I_1 = I_3$; $I_2 = 2,5 \, \text{A}$; $I_4 = I_5 = 0,5 \, \text{A}$
 $U_1 = 24 \, \text{V}$; $U_2 = 15 \, \text{V}$; $U_3 = 28,8 \, \text{V}$; $U_5 = 5 \, \text{V}$

Capítulo 7

3. $B = 0,6 \, \text{T}$
11. a) El electrón se mueve en la dirección de las líneas de inducción magnética, que coinciden con las líneas de la intensidad del campo eléctrico. En este caso el vector inducción magnética, $\vec{B}$, puede tomar cualquier valor, pues sobre el electrón solo actúa la fuerza del campo eléctrico.
b) Las fuerzas que actúan sobre el electrón se encuentran en equilibrio, y los vectores $\vec{E}$, $\vec{B}$ y $\vec{v}$ son perpendiculares entre sí, entonces:

$$F_L = F_e$$

16. $M = I l B \sin \theta$
17. $W = 0,01 \, \text{N} \cdot \text{m} = 0,01 \, \text{J}$

Capítulo 8

15. $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 0,5 \, \text{Wb/s}$
16. $\Delta \Phi = 28 \cdot 10^{-4} \, \text{Wb}$
17. a) $\varepsilon_i = -0,58 \, \text{V}$; b) $\varepsilon_i = -5,8 \, \text{V}$; c) $\varepsilon_i = -58 \, \text{V}$
18. $N = 10$

19. $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
21. $U = 0,15 \text{ V}$
22. $B = 0,3 \text{ T}$
23. $B = 13 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
24. $v = 17,3 \text{ m/s}$
25. $I = 3,12 \text{ A}$
26. $\varepsilon_i = 1,6 \text{ V}; (R + r) = 0,32 \Omega$
27. $F = \frac{v l^2 B^2}{R}$
28. $I_i = - \frac{N \Delta \Phi / \Delta t}{R_i}$ (la intensidad de la corriente inducida, I_i , en la bobina, es independiente del tiempo).
29. $L = 7,08 \cdot 10^{-8} \text{ H}$
30. $\varepsilon_i = -56,3 \text{ V}; L = 0,04 \text{ H}$
31. $L = 250 \text{ H}$
32. 1 J
33. $1,2 \text{ J}$

Capítulo 9

1. $\nu = 562,98 \text{ Hz}; \nu = 353,5 \text{ rad/s}; T = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
2. $L = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
3. Se pueden obtener cuatro circuitos, para los cuales: $\nu = 1\,125,39 \text{ Hz}; \nu = 711,76 \text{ Hz}; \nu = 801,55 \text{ Hz}$ y $\nu = 1\,331,58 \text{ Hz}$ respectivamente.
4. $10^{-2} \text{ H} \leq L \leq 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ H}$
5. $E_{L \text{ máx}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ J}$
6. a) $I = 9,79 \text{ A}$; b) $U_M = 112,8 \text{ V}$; c) $U = 79,76 \text{ V}$; d) $u = 112 \sin 60 \omega t \text{ V}$
7. a) $U_M = 155,56 \text{ V}$; b) $\omega = 376,8 \text{ rad/s}$; c) $u = 155,56 \sin (376,8t + \varphi_0) \text{ V}$; d) $I_M = 7,78 \text{ A}; I = 5,50 \text{ A}$
8. $I_M = 0,28 \text{ A}$
9. a) $X_L = 2 \Omega; I_M = 3,10 \text{ A}$; c) $i = 3,18 (\sin 100\pi t - \pi/2) \text{ A}$
10. Aumenta
11. $Z = 950 \Omega$
12. a) $3\,535 \text{ rad/s}$; b) $X_C = 141,4 \Omega$; c) $X_L = 141,4 \Omega$; d) $Z = 0$
13. $T = 1,15 \cdot 10^{-9} \text{ s}; T = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$
14. a) $X_L = 169,56 \Omega; X_C = 2,89 \cdot 10^{-3} \Omega; Z = 3 \text{ k}\Omega$; b) $X_L \approx 33,9 \text{ k}\Omega; X_C = 1,45 \cdot 10^{-3} \Omega; Z = 34 \text{ k}\Omega$
15. a) $I = 10 \text{ A}$; b) $U = 42,4 \text{ V}$
16. $P = 135 \text{ W}; W = 4,89 \cdot 10^5 \text{ J}$

17. a) $U_L = 32 \text{ V}$; $U_R = 40 \text{ V}$; $U_C = 60 \text{ V}$;
b) $U_{AB} = 48,83 \text{ V}$; c) $N = 160 \text{ W}$
18. a) $I = 1,82 \text{ A}$; b) $I_M = 2,57 \text{ A}$; c) $i = 2,57 \sin 120\pi t$
19. $\alpha \approx 36^\circ$
20. a) $I = 0,59 \text{ A}$; b) $U_L = 118,59 \text{ V}$; c) $\cos \alpha = 0,56$; d) $P = 41,3 \text{ W}$
21. a) $\cos \alpha = 0,8$; b) $P = 774,4 \text{ W}$; c) $P_{\max} = 1\,210 \text{ W}$
22. $L \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ H}$
23. a) $I = 52 \text{ A}$; b) $P = 16\,224 \text{ W}$; c) $C = 6,94 \cdot 10^{-5} \text{ F}$
24. a) el B ; b) $v_{OA} = v_{OB}$; c) el A .
26. a) el B ; b) el A ; c) $c = 1,26 \cdot 10^{-13} \text{ F}$
27. a) $C = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{ F}$; b) $L = 10,6 \text{ mH}$; c) $I = 16,14 \text{ A}$
d) $U_1 = 110,07 \text{ V}$; $U_2 = 210 \text{ V}$; $U_3 = 210 \text{ V}$; e) $I = 14 \text{ A}$
28. a) $x = 545 \text{ } \Omega$; b) $545,2 \text{ } \Omega$; c) $I = 0,32 \text{ A}$; d) No
29. $C_2 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
30. $I = 55,1 \text{ A}$
31. b, d y c

Este libro forma parte del conjunto de trabajos dirigidos al Perfeccionamiento Continuo del Sistema Nacional de Educación en la Educación General Politécnica y Laboral. Ha sido elaborado por un colectivo de autores integrado por metodólogos, profesores y especialistas y revisado por la subcomisión correspondiente de la Comisión Nacional Permanente para la Revisión de Planes, Programas y Textos de Estudio del Instituto Central de Ciencias Pedagógicas.

