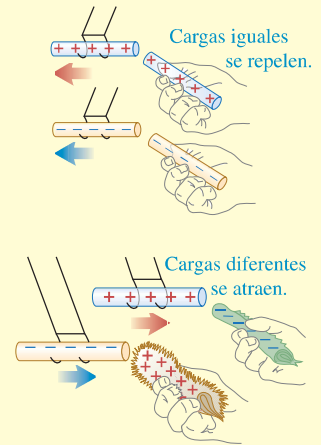


# CAPÍTULO 21 RESUMEN

**Carga eléctrica, conductores y aislantes:** La cantidad fundamental en electrostática es la carga eléctrica. Hay dos clases de carga: positiva y negativa. Las cargas del mismo signo se repelen mutuamente; las cargas de signo opuesto se atraen. La carga se conserva; la carga total en un sistema aislado es constante.

Toda la materia ordinaria está hecha de protones, neutrones y electrones. Los protones positivos y los neutrones eléctricamente neutros del núcleo de un átomo se mantienen unidos por la fuerza nuclear; los electrones negativos circundan el núcleo a distancias mucho mayores que el tamaño de éste. Las interacciones eléctricas son las principales responsables de la estructura de átomos, moléculas y sólidos.

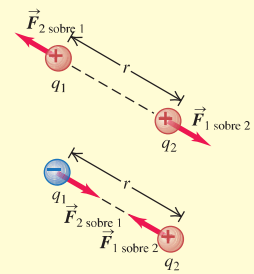
Los conductores son materiales que permiten que la carga eléctrica se mueva con facilidad a través de ellos. Los aislantes permiten el movimiento de las cargas con mucha menos facilidad. La mayoría de los metales son buenos conductores; en tanto que la mayoría de los no metales son aislantes.



**Ley de Coulomb:** La ley de Coulomb es la ley fundamental de la interacción de cargas eléctricas puntuales. Para las cargas  $q_1$  y  $q_2$  separadas por una distancia  $r$ , la magnitud de la fuerza sobre cualquiera de ellas es proporcional al producto  $q_1 q_2$  e inversamente proporcional a  $r^2$ . La fuerza sobre cada carga ocurre a lo largo de la línea que las une, de repulsión si  $q_1$  y  $q_2$  tienen el mismo signo, y de atracción si tienen el signo opuesto. Las fuerzas forman un par de acción-reacción y obedecen la tercera ley de Newton. En unidades del SI, la unidad de la carga eléctrica es el coulomb, que se simboliza como C. (Véanse los ejemplos 21.1 y 21.2.)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (21.2)$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

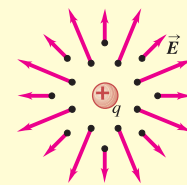


El principio de superposición de fuerzas establece que cuando dos o más cargas ejercen cada una fuerza sobre otra carga, la fuerza total sobre esa carga es la suma vectorial de las fuerzas que ejercen las cargas individuales. (Véanse los ejemplos 21.3 y 21.4.)

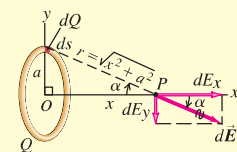
**Campo eléctrico:** El campo eléctrico  $\vec{E}$ , una cantidad vectorial, es la fuerza por unidad de carga que se ejerce sobre una carga de prueba en cualquier punto, siempre que la carga de prueba sea tan pequeña que no perturbe las cargas que generan el campo. El campo eléctrico producido por una carga puntual está dirigido radialmente hacia fuera de la carga o hacia ella. (Véanse los ejemplos 21.5 a 21.8.)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} \quad (21.3)$$

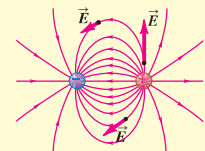
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (21.7)$$



**Superposición de campos eléctricos:** El principio de superposición de campos eléctricos establece que el campo eléctrico  $\vec{E}$  de cualquier combinación de cargas es la suma vectorial de los campos producidos por las cargas individuales. Para calcular el campo eléctrico generado por una distribución continua de carga, la distribución se divide en elementos pequeños, se calcula el campo producido por cada elemento, y luego se hace la suma vectorial o la suma de cada componente, por lo general con técnicas de integración. Las distribuciones de carga están descritas por la densidad lineal de carga,  $\lambda$ , densidad superficial de carga,  $\sigma$ , y densidad volumétrica de carga,  $\rho$ . (Véanse los ejemplos 21.9 a 21.13.)



**Líneas de campo eléctrico:** Las líneas de campo proporcionan una representación gráfica de los campos eléctricos. En cualquier punto sobre una línea de campo, la tangente a la línea está en dirección de  $\vec{E}$  en ese punto. El número de líneas por unidad de área (perpendicular a su dirección) es proporcional a la magnitud de  $\vec{E}$  en ese punto.

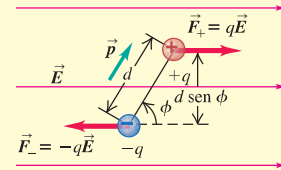


**Dipolos eléctricos:** Un dipolo eléctrico consiste en un par de cargas eléctricas de igual magnitud  $q$  pero signo contrario, separadas por una distancia  $d$ . Por definición, el momento dipolar eléctrico  $\vec{p}$  tiene magnitud  $p = qd$ . La dirección de  $\vec{p}$  va de la carga negativa a la carga positiva. Un dipolo eléctrico en un campo eléctrico  $\vec{E}$  que experimenta un par de torsión  $\vec{\tau}$  igual al producto vectorial de  $\vec{p}$  y  $\vec{E}$ . La magnitud del par de torsión depende del ángulo  $\phi$  entre  $\vec{p}$  y  $\vec{E}$ . La energía potencial,  $U$ , para un dipolo eléctrico en un campo eléctrico también depende de la orientación relativa de  $\vec{p}$  y  $\vec{E}$ . (Véanse los ejemplos 21.14 y 21.15.)

$$\tau = pE \sin \phi \quad (21.15)$$

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (21.16)$$

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (21.18)$$



## Términos clave

carga eléctrica, 710

electrostática, 710

electrón, 711

protón, 711

neutrón, 711

núcleo, 711

número atómico, 712

ion positivo, 712

ion negativo, 712

ionización, 712

principio de conservación de la carga, 712

conductor, 713

aislante, 713

inducción, 714

carga inducida, 714

carga puntual, 716

ley de Coulomb, 716

coulomb, 717

principio de superposición de fuerzas, 719

campo eléctrico, 722

carga de prueba, 722

punto de origen, 723

punto del campo, 723

campo vectorial, 724

principio de superposición de campos eléctricos, 727

densidad lineal de carga, 727

densidad superficial de carga, 727

densidad volumétrica de carga, 727

línea de campo eléctrico, 733

dipolo eléctrico, 735

momento dipolar eléctrico, 735

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

Las moléculas de agua tienen un momento dipolar eléctrico permanente: un extremo de la molécula tiene carga positiva; y el otro extremo tiene carga negativa. Estos extremos atraen iones negativos y positivos, respectivamente, y los mantienen separados en solución. El agua es menos eficaz como solvente de materiales cuyas moléculas no se ionizan (llamadas sustancias *no iónicas*), como los aceites.

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**21.1 Respuestas: a) la varilla de plástico pesa más, b) la varilla de vidrio pesa menos, c) la piel pesa un poco menos, d) la seda pesa un poco menos.** La varilla de plástico obtiene una carga negativa al tomar electrones de la piel, por lo que la varilla pesa un poco más y la piel pierde peso después del frotamiento. En contraste, la varilla de vidrio obtiene una carga positiva porque cede electrones a la seda, así que después de frotarse, la varilla de vidrio pesa un poco menos, y la seda un poco más. El cambio en el peso es *muy* pequeño: el número de electrones transferidos es una fracción pequeña del mol, y un mol de electrones tiene una masa de tan sólo  $(6.02 \times 10^{23} \text{ electrones}) (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg/electrón}) = 5.48 \times 10^{-7} \text{ kg} = 0.548 \text{ miligramos!}$

**21.2 Respuestas: a) i), b) ii)** Antes de que las dos esferas se toquen, la esfera con carga negativa ejerce una fuerza de repulsión sobre los electrones de la otra esfera, lo cual origina zonas de carga inducida negativa y positiva (véase la figura 21.7b). La zona positiva está más cerca de la esfera cargada negativamente que la zona negativa, por lo que hay una fuerza neta de atracción que jala a las esferas una hacia la otra, como en el caso del peine y el aislante de la figura 21.8b. Una vez que se tocan las dos esferas metálicas, algo del exceso de electrones de la esfera con carga negativa fluirá hacia la otra esfera (porque los metales son conductores). Entonces, las dos esferas tendrán una carga negativa neta y se repelerán mutuamente.

**21.3 Respuesta: iv)** La fuerza ejercida por  $q_1$  sobre  $Q$  es como en el ejemplo 21.4. La magnitud de la fuerza ejercida por  $q_2$  sobre  $Q$  es incluso igual a  $F_1$  sobre  $Q$ , pero la dirección de la fuerza ahora es *hacia*  $q_2$  con un ángulo  $\alpha$  por debajo del eje  $x$ . Entonces, las componentes  $x$  de las dos fuerzas se anulan, mientras que las componentes  $y$  (negativas) se suman, y la fuerza eléctrica total ocurre en la dirección negativa del eje  $y$ .

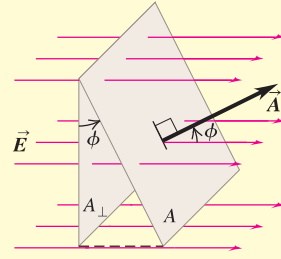
**21.4 Respuestas: a) ii), b) i)** El campo eléctrico  $\vec{E}$  producido por una carga puntual positiva apunta directamente alejándose de la carga (véase la figura 21.18a) y tiene una magnitud que depende de la distancia  $r$  entre la carga y el punto del campo. De ahí que una segunda carga puntual negativa,  $q < 0$ , recibirá una fuerza  $\vec{F} = q\vec{E}$  que apunta directamente hacia la carga positiva y tiene una magnitud que depende de la distancia  $r$  entre las dos cargas. Si la carga negativa se mueve directamente hacia la carga positiva, la dirección de la fuerza permanece igual (a lo largo de la línea del movimiento de la carga negativa); pero la magnitud de la fuerza se incrementa a medida que disminuye la distancia  $r$ . Si la carga negativa se mueve en círculo alrededor de la carga positiva, la magnitud de la fuerza permanece igual (porque la distancia  $r$  es constante); pero la dirección de la fuerza cambia (cuando la carga negativa está en el lado derecho de la carga positiva, la fuerza va hacia la izquierda; cuando la carga negativa está en el lado izquierdo de la carga positiva, la fuerza va hacia la derecha).

**21.5 Respuesta: iv)** Piense en un par de segmentos de longitud  $dy$ , uno en la coordenada  $y > 0$  y el otro en la coordenada  $-y < 0$ . El segmento superior tiene carga positiva y produce un campo eléctrico  $d\vec{E}$  en  $P$ , que apunta alejándose del segmento, por lo que  $d\vec{E}$  tiene una componente  $x$  positiva y una componente  $y$  negativa, como el vector  $d\vec{E}$  en la figura 21.25. El segmento inferior tiene la misma cantidad de carga negativa. Produce una  $d\vec{E}$  que tiene la misma magnitud pero apunta *hacia* el segmento inferior, así que tiene una componente  $x$  negativa y una componente  $y$  también negativa. Por simetría, las dos componentes  $x$  son iguales pero opuestas, de manera que se cancelan. De esta manera, el campo eléctrico total únicamente tiene una componente  $y$  negativa.

# CAPÍTULO 22 RESUMEN

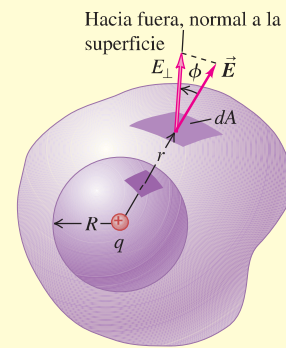
**Flujo eléctrico:** El flujo eléctrico es una medida del “flujo” del campo eléctrico a través de una superficie. Es igual al producto de un elemento de área por la componente perpendicular de  $\vec{E}$ , integrada sobre una superficie. (Véanse los ejemplos 22.1 a 22.3.)

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \int E \cos \phi \, dA \\ &= \int E_{\perp} \, dA = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}\end{aligned}\quad (22.5)$$



**Ley de Gauss:** La ley de Gauss establece que el flujo eléctrico total a través de una superficie cerrada, que se escribe como la integral de superficie de la componente de  $\vec{E}$ , que es normal a la superficie, es igual a una constante por la carga total  $Q_{\text{enc}}$  encerrada por la superficie. La ley de Gauss es un equivalente lógico de la ley de Coulomb, pero su uso simplifica mucho los problemas con un alto grado de simetría. (Véanse los ejemplos 22.4 a 22.10.)

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \oint E \cos \phi \, dA \\ &= \oint E_{\perp} \, dA = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \\ &= \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}\end{aligned}\quad (22.8), (22.9)$$



Cuando se coloca carga en exceso en un conductor en reposo, ésta permanece toda en la superficie, y  $\vec{E} = \mathbf{0}$  en todos los puntos del material del conductor. (Véanse los ejemplos 22.11 a 22.13.)

**Campo eléctrico de varias distribuciones simétricas de carga:** En la siguiente tabla se listan los campos eléctricos generados por varias distribuciones simétricas de carga. En la tabla,  $q$ ,  $Q$ ,  $\lambda$  y  $\sigma$  se refieren a las *magnitudes* de las cantidades.

Distribución de la carga	Punto en el campo eléctrico	Magnitud del campo eléctrico
Una sola carga puntual	Distancia $r$ desde $q$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Carga $q$ en la superficie de una esfera conductora de radio $R$	Esfera exterior, $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
	Esfera interior, $r < R$	$E = 0$
Alambre infinito, carga por unidad de longitud $\lambda$	Distancia $r$ desde el alambre	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
Cilindro conductor infinito con radio $R$ , carga por unidad de longitud $\lambda$	Cilindro exterior, $r > R$	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
	Cilindro interior, $r < R$	$E = 0$
Esfera aislante sólida con radio $R$ , carga $Q$ distribuida de manera uniforme en todo el volumen	Esfera exterior, $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
	Esfera interior, $r < R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qr}{R^3}$
Placa infinita cargada con carga uniforme por unidad de área $\sigma$	Cualquier punto	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$
Dos placas conductoras con cargas opuestas con densidades superficiales de carga $+\sigma$ y $-\sigma$	Cualquier punto entre las placas	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

# CAPÍTULO 23 RESUMEN

**Energía potencial eléctrica:** La fuerza eléctrica causada por cualquier conjunto de cargas es una fuerza conservativa. El trabajo  $W$  realizado por la fuerza eléctrica sobre una partícula con carga que se mueve en un campo eléctrico se representa por el cambio en una función de energía potencial  $U$ .

La energía potencial eléctrica para dos cargas puntuales  $q$  y  $q_0$  depende de su separación  $r$ . La energía potencial eléctrica para una carga  $q_0$  en presencia de un conjunto de cargas  $q_1, q_2, q_3$  depende de la distancia de  $q_0$  a cada una de las demás cargas. (Véanse los ejemplos 23.1 y 23.2.)

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b \quad (23.2)$$

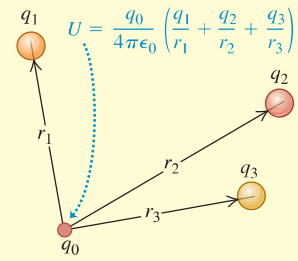
$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} \quad (23.9)$$

(dos cargas puntuales)

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) \quad (23.10)$$

$$= \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

( $q_0$  en presencia de otras cargas puntuales)



**Potencial eléctrico:** El potencial, denotado por  $V$ , es energía potencial por unidad de carga. La diferencia de potencial entre dos puntos es igual a la cantidad de trabajo que se requeriría para trasladar una unidad de carga de prueba positiva entre esos puntos. El potencial  $V$  debido a una cantidad de carga se calcula mediante una suma (si la carga es un conjunto de cargas puntuales) o mediante integración (si la carga es una distribución). (Véanse los ejemplos 23.3, 23.4, 23.5, 23.7, 23.11 y 23.12.)

La diferencia de potencial entre dos puntos  $a$  y  $b$ , también llamada *potencial de  $a$  con respecto a  $b$* , está dado por la integral de línea de  $\vec{E}$ . El potencial de un punto dado se encuentra obteniendo primero  $\vec{E}$  y después resolviendo la integral. (Véanse los ejemplos 23.6, 23.8, 23.9 y 23.10.)

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (23.14)$$

(debido a una carga puntual)

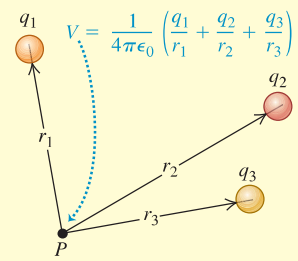
$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (23.15)$$

(debido a un conjunto de cargas puntuales)

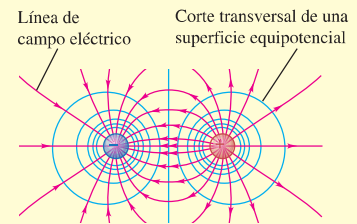
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (23.16)$$

(debido a una distribución de carga)

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos \phi \, dl \quad (23.17)$$



**Superficies equipotenciales:** Una superficie equipotencial es aquella en la que el potencial tiene el mismo valor en cada punto. En el punto en que una línea de campo cruza una superficie equipotencial, ambas son perpendiculares. Cuando todas las cargas están en reposo, la superficie de un conductor siempre es una superficie equipotencial y todos los puntos en el interior del conductor están al mismo potencial. Cuando una cavidad dentro de un conductor no contiene carga, toda la cavidad es una región equipotencial y no hay carga superficial en ninguna parte de la superficie de la cavidad.



### Cálculo del campo eléctrico a partir del potencial eléctrico:

Si se conoce el potencial  $V$  como función de las coordenadas  $x, y$  y  $z$ , las componentes del campo eléctrico  $\vec{E}$  en cualquier punto están dadas por las derivadas parciales de  $V$ . (Véanse los ejemplos 23.13 y 23.14.)

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (23.19)$$

$$\vec{E} = -\left( \hat{i} \frac{\partial V}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial V}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (23.20)$$

(forma vectorial)

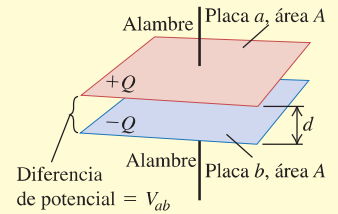
# CAPÍTULO 24 RESUMEN

**Capacitores y capacitancia:** Un capacitor es todo par de conductores separados por un material aislante. Cuando el capacitor está cargado hay cargas de igual magnitud  $Q$  y signo opuesto en los dos conductores, y el potencial  $V_{ab}$  del conductor con carga positiva con respecto al que tiene carga negativa es proporcional a  $Q$ . La capacitancia  $C$  se define como la razón de  $Q$  a  $V_{ab}$ . La unidad del SI para la capacitancia es el farad (F):  $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$ .

Un capacitor de placas paralelas consiste en dos placas conductoras paralelas, cada una con área  $A$ , separadas por una distancia  $d$ . Si están separadas por vacío, la capacitancia sólo depende de  $A$  y  $d$ . Para otras geometrías, la capacitancia se obtiene a partir de la definición  $C = Q/V_{ab}$ . (Véanse los ejemplos 24.1 a 24.4.)

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad (24.1)$$

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (24.2)$$



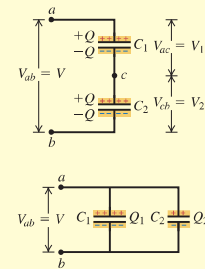
**Capacitores en serie y en paralelo:** Cuando se conectan en serie capacitores con capacitancias  $C_1, C_2, C_3, \dots$ , el recíproco de la capacitancia equivalente  $C_{eq}$  es igual a la suma de los recíprocos de las capacitancias individuales. Cuando los capacitores se conectan en paralelo, la capacitancia equivalente  $C_{eq}$  es igual a la suma de las capacitancias individuales. (Véanse los ejemplos 24.5 y 24.6.)

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (24.5)$$

(capacitores en serie)

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (24.7)$$

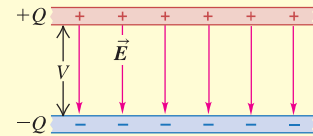
(capacitores en paralelo)



**Energía en un capacitor:** La energía  $U$  que se requiere para cargar un capacitor  $C$  a una diferencia de potencial  $V$  y carga  $Q$ , es igual a la energía almacenada en el capacitor. Esta energía se puede considerar como si residiera en el campo eléctrico entre los conductores; la densidad de energía  $u$  (energía por unidad de volumen) es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico. (Véanse los ejemplos 24.7 a 24.9.)

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (24.9)$$

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (24.11)$$



**Dieléctricos:** Cuando el espacio entre conductores está ocupado por un material dieléctrico, la capacitancia se incrementa en un factor  $K$ , llamado constante dieléctrica del material. La cantidad  $\epsilon = K\epsilon_0$  se llama permitividad del dieléctrico. Para una cantidad fija de carga en las placas del capacitor, las cargas inducidas en la superficie del dieléctrico disminuyen el campo eléctrico y la diferencia de potencial entre las placas en el mismo factor  $K$ . La carga superficial proviene de la polarización, que es el reacondo microscópico de la carga en el dieléctrico. (Véase el ejemplo 24.10.)

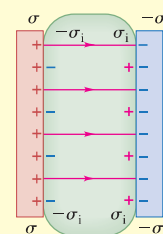
$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{A}{d} \epsilon \quad (24.19)$$

(capacitor de placas paralelas con un dieléctrico)

$$u = \frac{1}{2} K\epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (24.20)$$

$$\oint K\vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc-libre}}{\epsilon_0} \quad (24.23)$$

Dieléctrico entre las placas



Bajo la influencia de campos eléctricos suficientemente intensos, los dieléctricos se vuelven conductores, una situación que se conoce como ruptura del dieléctrico. El campo máximo que un material puede soportar sin sufrir ruptura se llama rigidez dieléctrica.

En un dieléctrico la expresión para la densidad de energía es la misma que en el vacío pero sustituyendo  $\epsilon_0$  por  $\epsilon = K\epsilon_0$ . (Véase el ejemplo 24.11.)

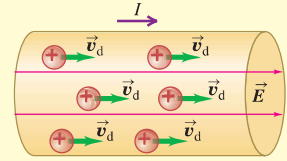
La ley de Gauss en un dieléctrico tiene casi la misma forma que en el vacío, con dos diferencias clave:  $\vec{E}$  se sustituye por  $K\vec{E}$  y  $Q_{enc}$  se sustituye por  $Q_{enc-libre}$ , que incluye solo la carga libre (no la carga ligada) encerrada por la superficie gaussiana. (Véase el ejemplo 24.12.)

# CAPÍTULO 25 RESUMEN

**Corriente y densidad de corriente:** Corriente es la cantidad de carga que fluye a través de un área especificada, por unidad de tiempo. La unidad del SI para la corriente es el amperio, que es igual a un coulomb por segundo ( $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ ). La corriente  $I$  a través de un área  $A$  depende de la concentración  $n$  y la carga  $q$  de los portadores de carga, así como de la magnitud de su velocidad de deriva  $\vec{v}_d$ . La densidad de corriente es corriente por unidad de área de la sección transversal. La corriente se describe convencionalmente en términos de un flujo de carga positiva, aun cuando los portadores de carga real sean negativos o de ambos signos. (Véase el ejemplo 25.1.)

$$I = \frac{dQ}{dt} = n|q|v_d A \quad (25.2)$$

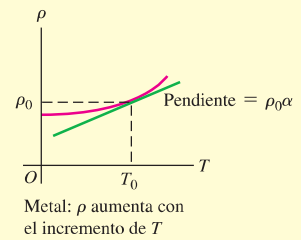
$$\vec{J} = nq\vec{v}_d \quad (25.4)$$



**Resistividad:** La resistividad  $\rho$  de un material es la razón de las magnitudes del campo eléctrico y la densidad de corriente. Los buenos conductores tienen poca resistividad; los buenos aislantes tienen alta resistividad. La ley de Ohm, que obedecen en forma aproximada muchos materiales, establece que  $\rho$  es una constante independiente del valor de  $E$ . La resistividad por lo general se incrementa con la temperatura; para cambios pequeños de temperatura, esta variación queda representada aproximadamente por la ecuación (25.6), donde  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura de la resistividad.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (25.5)$$

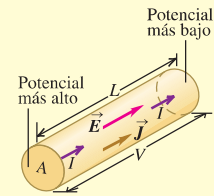
$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (25.6)$$



**Resistores:** Para los materiales que obedecen la ley de Ohm, la diferencia de potencial  $V$  a través de una muestra particular de material es proporcional a la corriente  $I$  a través del material. La razón  $V/I = R$  es la resistencia de la muestra. La unidad del SI para la resistencia es el ohm ( $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ ). La resistencia de un conductor cilíndrico se relaciona con su resistividad  $\rho$ , longitud  $L$  y área de sección transversal  $A$ . (Véanse los ejemplos 25.2 a 25.4.)

$$V = IR \quad (25.11)$$

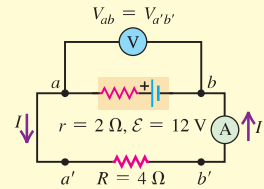
$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (25.10)$$



**Circuitos y fem:** Un circuito completo tiene una trayectoria continua por la que circula corriente. Un circuito completo que lleva una corriente constante debe contener una fuente de fuerza electromotriz (fem)  $\mathcal{E}$ . La unidad del SI para la fuerza electromotriz es el volt (1 V). Una fuente ideal de fem mantiene una diferencia de potencial constante, independiente de la corriente que pasa a través del dispositivo, pero toda fuente real de fem tiene alguna resistencia interna  $r$ . Por consiguiente, la diferencia de potencial terminal  $V_{ab}$  depende de la corriente. (Véanse los ejemplos 25.5 a 25.8.)

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir \quad (25.15)$$

(fuente con resistencia interna)



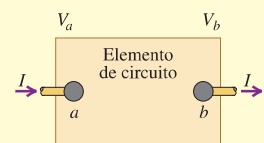
**Energía y potencia en los circuitos:** Un elemento de circuito con diferencia de potencial  $V_a - V_b = V_{ab}$  y corriente  $I$  introduce energía al circuito si la dirección de la corriente es del potencial más bajo al más alto en el dispositivo, y extrae energía del circuito si la corriente es la opuesta. La potencia  $P$  (tasa de transferencia de energía) es igual al producto de la diferencia de potencial por la corriente. Un resistor siempre extrae energía eléctrica del circuito. (Véanse los ejemplos 25.9 a 25.11.)

$$P = V_{ab}I \quad (25.17)$$

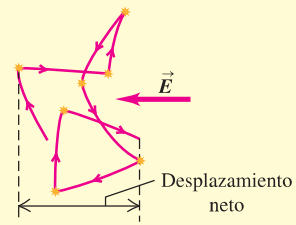
(elemento general de circuito)

$$P = V_{ab}I = I^2R = \frac{V_{ab}^2}{R} \quad (25.18)$$

(potencia que entra en un resistor)



**Conducción en los metales:** La base microscópica de la conducción en los metales es el movimiento de los electrones que se desplazan con libertad por el cristal metálico, chocando con los centros iónicos del cristal. En un modelo clásico aproximado de este movimiento, la resistividad del material se relaciona con la masa del electrón, la carga, la rapidez de movimiento aleatorio, la densidad y el tiempo libre medio entre las colisiones. (Véase el ejemplo 25.12.)



## Términos clave

corriente, 847  
 velocidad de deriva, 847  
 corriente convencional, 848  
 ampere, 848  
 concentración, 848  
 densidad de corriente, 849  
 ley de Ohm, 850

resistividad, 851  
 conductividad, 851  
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 852  
 resistencia, 853  
 ohm, 854  
 resistor, 854  
 circuito completo, 857

fuerza electromotriz (fem), 857  
 fuente de fem, 857  
 resistencia interna, 859  
 voltaje terminal, 859  
 voltímetro, 860  
 amperímetro, 860  
 tiempo libre medio, 868

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

La corriente que sale es igual a la corriente que entra. En otras palabras, la carga debe entrar a la bombilla con la misma rapidez con la que sale. Conforme fluye por la bombilla no “se gasta” ni se consume.

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**25.1 Respuesta: v)** Al duplicarse el diámetro se incrementa el área de la sección transversal  $A$  en un factor de 4. Por lo tanto, la magnitud de la densidad de corriente  $J = I/A$  se reduce a  $\frac{1}{4}$  del valor del ejemplo 25.1, y la magnitud de la velocidad de deriva  $v_d = J/n|q|$  se reduce en el mismo factor. La nueva magnitud es  $v_d = (0.15 \text{ mm/s})/4 = 0.038 \text{ mm/s}$ . Este comportamiento es el mismo que el de un fluido incompresible, que disminuye cuando pasa de un tubo estrecho a otro más ancho (véase la sección 14.4).

**25.2 Respuesta: ii)** La figura 25.6b indica que la resistividad  $\rho$  de un semiconductor se incrementa conforme disminuye la temperatura. De la ecuación (25.5), la magnitud de la densidad de corriente es  $J = E/\rho$ , por lo que la densidad de corriente disminuye a medida que la temperatura se reduce y la resistividad aumenta.

**25.3 Respuesta: iii)** La solución de la ecuación (25.11) para la corriente indica que  $I = V/R$ . Si la resistencia  $R$  del alambre permanece sin cambio, la duplicación del voltaje  $V$  haría que la corriente  $I$  también se duplicara. Sin embargo, en el ejemplo 25.3 se vio que la resistencia *no* es constante: a medida que la corriente aumenta y la temperatura se eleva,  $R$  también aumenta. Así que la duplicación del voltaje produce una corriente *menor* que el doble de la corriente original. Un conductor óhmico es aquel para el que  $R = V/I$  tiene el mismo

valor sin importar cuál sea el voltaje; así pues, el alambre es *no óhmico*. (En muchos problemas prácticos, el cambio de temperatura del alambre es tan pequeño que se ignora, por lo que se puede considerar sin problema que el alambre es óhmico. En casi todos los ejemplos del libro se hace así.)

**25.4 Respuestas: iii), ii), i)** Para el circuito i), se calcula la corriente con la ecuación (25.16):  $I = \mathcal{E}/(R + r) = (1.5 \text{ V})/(1.4 \Omega + 0.10 \Omega) = 1.0 \text{ A}$ . Para el circuito ii), se observa que el voltaje terminal  $V_{ab} = 3.6 \text{ V}$  es igual al voltaje  $IR$  a través del resistor de  $1.8 \Omega$ :  $V_{ab} = IR$ , por lo que  $I = V_{ab}/R = (3.6 \text{ V})/(1.8 \Omega) = 2.0 \text{ A}$ . Para el circuito iii), se utiliza la ecuación (25.15) para determinar el voltaje terminal:  $V_{ab} = \mathcal{E} - Ir$ , por lo que  $I = (\mathcal{E} - V_{ab})/r = (12.0 \text{ V} - 11.0 \text{ V})/(0.20 \Omega) = 5.0 \text{ A}$ .

**25.5 Respuestas: iii), ii), i)** Éstos son los mismos circuitos que se analizaron en Evalúe su comprensión de la sección 25.4. En cada caso, la potencia neta de salida de la batería es  $P = V_{ab}I$ , donde  $V_{ab}$  es el voltaje terminal de la batería. Para el circuito i), se vio que  $I = 1.0 \text{ A}$ , por lo que  $V_{ab} = \mathcal{E} - Ir = 1.5 \text{ V} - (1.0 \text{ A})(0.10 \Omega) = 1.4 \text{ V}$ , de manera que  $P = (1.4 \text{ V})(1.0 \text{ A}) = 1.4 \text{ W}$ . Para el circuito ii), se tiene que  $V_{ab} = 3.6 \text{ V}$  y se encontró que  $I = 2.0 \text{ A}$ , por lo que  $P = (3.6 \text{ V})(2.0 \text{ A}) = 7.2 \text{ W}$ . Para el circuito iii), se tiene que  $V_{ab} = 11.0 \text{ V}$  y se determinó que  $I = 5.0 \text{ A}$ , así que  $P = (11.0 \text{ V})(5.0 \text{ A}) = 55 \text{ W}$ .

**25.6 Respuesta: i)** La dificultad de producir cierta cantidad de corriente se incrementa conforme aumenta la resistividad  $\rho$ . De la ecuación (25.24),  $\rho = m/ne^2\tau$ , por lo que al aumentar la masa  $m$  se incrementará la resistividad. Esto es así porque una partícula más masiva con carga responderá con más lentitud ante la aplicación de un campo eléctrico, por lo que la deriva será más lenta. Para generar la misma corriente se necesitaría un campo eléctrico más intenso. (El aumento de  $n$ ,  $e$  o  $\tau$  haría que la resistividad disminuyera y sería más fácil producir una corriente dada.)

## PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite [www.masteringphysics.com](http://www.masteringphysics.com)



## Preguntas para análisis

**P25.1.** La definición de resistividad ( $\rho = E/J$ ) implica que existe un campo eléctrico dentro de un conductor. Pero en el capítulo 21 se vio

que en el interior de un conductor no puede haber ningún campo eléctrico. ¿Hay alguna contradicción en esto? Dé una explicación.

**P25.2.** Una varilla cilíndrica tiene resistencia  $R$ . Si se triplica su longitud y diámetro, ¿cuál será su resistencia en términos de  $R$ ?

# CAPÍTULO 26 RESUMEN

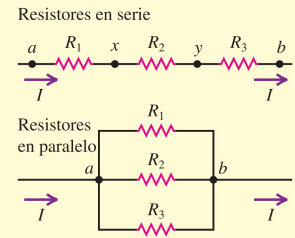
**Resistores en serie y en paralelo:** Cuando se conectan en serie varios resistores  $R_1, R_2, R_3, \dots$ , la resistencia equivalente  $R_{eq}$  es la suma de las resistencias individuales. En una conexión en serie fluye la misma corriente a través de todos los resistores. Cuando se conectan en paralelo varios resistores, el recíproco de la resistencia equivalente  $R_{eq}$  es la suma del recíproco de las resistencias individuales. Todos los resistores en una conexión en paralelo tienen la misma diferencia de potencial entre sus terminales. (Véanse los ejemplos 26.1 y 26.2.)

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (26.1)$$

(resistores en serie)

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (26.2)$$

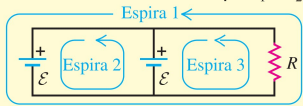
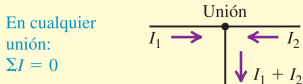
(resistores en paralelo)



**Reglas de Kirchhoff:** La regla de Kirchhoff de las uniones se basa en la conservación de la carga. Establece que la suma algebraica de las corrientes en una unión debe ser igual a cero. La regla de Kirchhoff de las espiras se basa en la conservación de la energía y la naturaleza conservativa de los campos electrostáticos. Dice que la suma algebraica de las diferencias de potencial alrededor de una espira debe ser igual a cero. Al aplicar las reglas de Kirchhoff es esencial tener cuidado con los signos. (Véanse los ejemplos 26.3 a 26.7.)

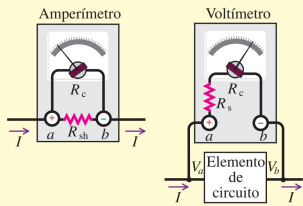
$$\sum I = 0 \quad (\text{regla de las uniones}) \quad (26.5)$$

$$\sum V = 0 \quad (\text{regla de las espiras}) \quad (26.6)$$



Alrededor de cualquier espira:  $\sum V = 0$ .

**Instrumentos de medición eléctrica:** En un galvanómetro de d'Arsonval, la desviación es proporcional a la corriente en la bobina. Para tener una escala de corriente más amplia se agrega un resistor de derivación, de manera que parte de la corriente se desvíe de la bobina del medidor. Un instrumento de este tipo se llama amperímetro. Si la bobina y cualquier resistencia adicional en serie obedecen la ley de Ohm, el instrumento también se puede calibrar para que lea diferencias de potencial o voltaje, en cuyo caso recibe el nombre de voltímetro. Un buen amperímetro tiene resistencia muy baja; un buen voltímetro tiene resistencia muy alta. (Véanse los ejemplos 26.8 a 26.11.)



**Circuitos R-C:** Cuando un capacitor se carga mediante una batería en serie con un resistor, la corriente y la carga en el capacitor no son constantes. La carga tiende a su valor final de manera asintótica, y la corriente tiende a cero del mismo modo. La carga y la corriente en el circuito están dadas por las ecuaciones (26.12) y (26.13). Después del tiempo  $\tau = RC$ , la carga se ha acercado a menos de  $1/e$  de su valor final. Este tiempo se llama constante de tiempo o tiempo de relajación del circuito. Cuando se descarga el capacitor, la carga y la corriente están dadas como función del tiempo por las ecuaciones (26.16) y (26.17). La constante de tiempo es la misma en la carga y en la descarga. (Véanse los ejemplos 26.12 y 26.13.)

**Capacitor en carga:**

$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}) \quad (26.12)$$

$$= Q_f(1 - e^{-t/RC})$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R}e^{-t/RC} \quad (26.13)$$

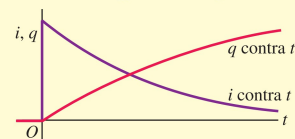
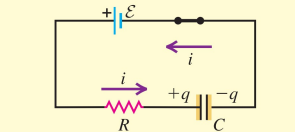
$$= I_0e^{-t/RC}$$

**Capacitor en descarga:**

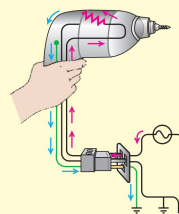
$$q = Q_0e^{-t/RC} \quad (26.16)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q_0}{RC}e^{-t/RC} \quad (26.17)$$

$$= I_0e^{-t/RC}$$



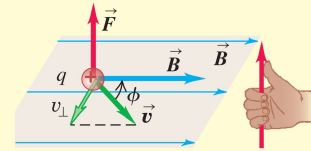
**Cableado de una casa:** En los sistemas de cableado doméstico, los distintos aparatos eléctricos están conectados en paralelo a través de la línea de energía, que consiste en un par de conductores, uno "con corriente" y otro "neutro". Además, por seguridad se incluye un alambre "a tierra". La corriente máxima permisible en un circuito está determinada por el tamaño de los alambres y la temperatura máxima que pueden tolerar. Los fusibles e interruptores de circuito dan seguridad contra un exceso de corriente y el incendio que podría resultar. (Véase el ejemplo 26.14.)



# CAPÍTULO 27 RESUMEN

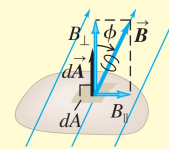
**Fuerzas magnéticas:** Las interacciones magnéticas son fundamentalmente interacciones entre partículas cargadas en movimiento. Estas interacciones se describen mediante el campo magnético vectorial, denotado con  $\vec{B}$ . Una partícula con carga  $q$  que se mueva con velocidad  $\vec{v}$  en un campo magnético  $\vec{B}$  experimenta una fuerza  $\vec{F}$  perpendicular tanto a  $\vec{v}$  como a  $\vec{B}$ . La unidad del SI para el campo magnético es la tesla: ( $1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$ ). (Véase el ejemplo 27.1.)

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (27.2)$$



**Campo y flujo magnético:** Un campo magnético se representa gráficamente con líneas de campo magnético. Para un punto cualquiera, una línea de campo magnético es tangente a la dirección de  $\vec{B}$  en ese punto. Donde las líneas de campo están muy cercanas entre sí, la magnitud del campo es grande y viceversa. El flujo magnético  $\Phi_B$  a través de un área se define en forma similar al flujo eléctrico. La unidad del SI para el flujo magnético es el weber ( $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ ). El flujo magnético neto a través de cualquier superficie cerrada es igual a cero (ley de Gauss del magnetismo). Como resultado, las líneas de campo magnético siempre se cierran sobre sí mismas. (Véase el ejemplo 27.2.)

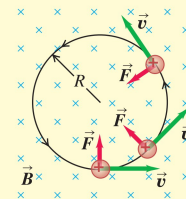
$$\begin{aligned} \Phi_B &= \int B_{\perp} dA \\ &= \int B \cos \phi dA \\ &= \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \end{aligned} \quad (27.6)$$



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{superficie cerrada}) \quad (27.8)$$

**Movimiento en un campo magnético:** La fuerza magnética siempre es perpendicular a  $\vec{v}$ ; una partícula que se mueve solo bajo la acción de un campo magnético lo hace con rapidez constante. En un campo uniforme, una partícula con velocidad inicial perpendicular al campo se mueve en un círculo con radio  $R$ , que depende de la intensidad del campo magnético  $B$ , y la masa de la partícula  $m$ , la rapidez  $v$  y la carga  $q$ . (Véanse los ejemplos 27.3 y 27.4.)

$$R = \frac{mv}{|q|B} \quad (27.11)$$

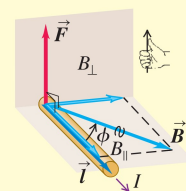


Los campos eléctricos y magnéticos transversales se usan como selector de velocidad. Las fuerzas eléctricas y magnéticas se cancelan exactamente si  $v = E/B$ . (Véanse los ejemplos 27.5 y 27.6.)

**Fuerza magnética sobre un conductor:** Un segmento rectilíneo de conductor que transporta una corriente  $I$  en un campo magnético uniforme  $\vec{B}$  experimenta una fuerza  $\vec{F}$  perpendicular tanto a  $\vec{B}$  como al vector  $\vec{l}$ , que apunta en la dirección de la corriente y tiene magnitud igual a la longitud del segmento. Una relación similar da la fuerza  $d\vec{F}$  sobre un segmento infinitesimal que transporte corriente  $d\vec{l}$ . (Véanse los ejemplos 27.7 y 27.8.)

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (27.19)$$

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (27.20)$$

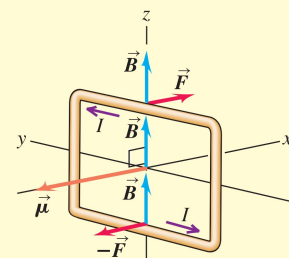


**Par de torsión magnético:** Una espira de corriente con área  $A$  y corriente  $I$  en un campo magnético uniforme  $\vec{B}$  no experimenta fuerza magnética neta, pero sí un par de torsión magnético de magnitud  $\tau$ . El par de torsión vectorial  $\vec{\tau}$  se expresa en términos del momento magnético  $\vec{\mu} = I\vec{A}$  de la espira, igual que la energía potencial  $U$  de un momento magnético en un campo magnético  $\vec{B}$ . El momento magnético de una espira sólo depende de la corriente y del área; es independiente de la forma de la espira. (Véanse los ejemplos 27.9 y 27.10.)

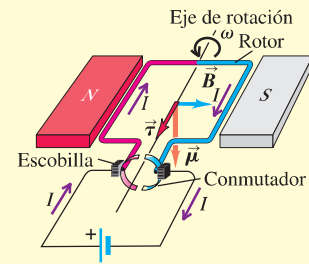
$$\tau = IBA \sin \phi \quad (27.23)$$

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (27.26)$$

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \phi \quad (27.27)$$

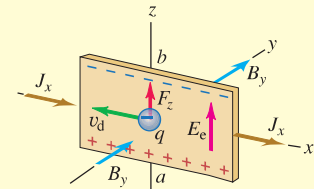


**Motores eléctricos:** En un motor de cd, un campo magnético ejerce un par de torsión sobre una corriente en el rotor. El movimiento del rotor a través del campo magnético causa una fem inducida llamada fuerza contraelectromotriz. Para un motor en serie, en el que la bobina del rotor está conectada en paralelo con las bobinas que producen el campo magnético, el voltaje terminal es la suma de la fuerza contraelectromotriz y la caída  $Ir$  a través de la resistencia interna. (Véase el ejemplo 27.11.)



**El efecto Hall:** El efecto Hall es una diferencia de potencial perpendicular a la dirección de la corriente en un conductor, cuando el conductor se coloca en un campo magnético. El potencial de Hall está determinado por el requerimiento de que el campo eléctrico asociado debe compensar exactamente la fuerza magnética sobre una carga en movimiento. Las mediciones del efecto Hall se utilizan para determinar el signo de los portadores de carga y su concentración  $n$ . (Véase el ejemplo 27.12.)

$$nq = \frac{-J_x B_y}{E_z} \quad (27.30)$$



### Términos clave

imán permanente, 917  
 monopolo magnético, 918  
 campo magnético, 918  
 tesla, 920  
 gauss, 920  
 línea de campo magnético, 922

flujo magnético, 924  
 weber, 924  
 densidad de flujo magnético, 925  
 frecuencia de ciclotrón, 926  
 espectrómetro de masas, 930  
 isótopo, 931

momento dipolar magnético, 937  
 momento magnético, 937  
 dipolo magnético, 937  
 solenoide, 938

### Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

En la IRM los núcleos de los átomos de hidrógeno dentro de los tejidos suaves actúan como espiras de corriente en miniatura, cuyos momentos magnéticos se alinean con un campo aplicado. Véase la sección 27.7 para mayores detalles.

### Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

- 27.1 Respuesta: sí** Cuando un imán se corta, cada parte tiene un polo norte y otro sur (véase la figura 27.4). Entonces, la parte roja pequeña se comporta en gran medida como la aguja completa original de la brújula.
- 27.2 Respuesta: trayectoria 3** La aplicación de la regla de la mano derecha a los vectores  $\vec{v}$  (que apuntan a la derecha) y  $\vec{B}$  (que apuntan hacia el plano de la figura) dice que la fuerza  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  sobre una carga positiva apuntaría hacia arriba. Como la carga es negativa, la fuerza apunta hacia abajo y la partícula sigue una trayectoria curva hacia abajo.
- 27.3 Respuestas: a) ii), b) no** La magnitud de  $\vec{B}$  se incrementaría a medida que se moviera hacia la derecha, y alcanzaría un máximo al cruzar el plano de la espira. Al moverse más allá del plano de la espira, disminuiría la magnitud del campo. Lo que se puede decir del espaciamiento de las líneas de campo es que cuanto más cerca estén unas de otras, más intenso será el campo. La dirección del campo sería a la derecha de todos los puntos a lo largo de la trayectoria, ya que ésta ocurre a lo largo de una línea de campo y la dirección de  $\vec{B}$  en cualquier punto es tangente a la línea de campo a través de dicho punto.
- 27.4 Respuestas: a) ii), b) i)** El radio de la órbita como lo da la ecuación (27.11) es directamente proporcional a la rapidez, por lo que duplicar la rapidez de la partícula ocasiona que el radio también se duplique. La partícula tiene que viajar lo doble para completar una órbita, pero lo hace al doble de rapidez, así que el tiempo requerido para

una órbita no cambia. Este resultado también se obtiene con la ecuación (27.12), que afirma que la rapidez angular  $\omega$  es independiente de la rapidez lineal  $v$ . De ahí que el tiempo por órbita,  $T = 2\pi/\omega$ , tampoco depende de  $v$ .

**27.5 Respuesta: iii)** De la ecuación (27.13), la rapidez  $v = E/B$  con que viajan las partículas en línea recta a través del selector de velocidades no depende de la magnitud, el signo de la carga, o la masa de la partícula. Todo lo que se requiere es que las partículas (iones, en este caso) tengan una carga distinta de cero.

**27.6 Respuesta: A** Esta orientación hará que la corriente fluya en sentido horario alrededor del circuito y, por ello, a través de la barra conductora de la parte superior a la parte inferior de la figura. Entonces, según la regla de la mano derecha, la fuerza magnética  $\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$  sobre la barra apuntará a la derecha.

**27.7 Respuestas: a) a la derecha; b) el polo norte a la derecha, el polo sur a la izquierda** Si usted cierra los dedos de su mano derecha alrededor de la bobina en la dirección de la corriente, su pulgar derecho apunta a la derecha (perpendicular al plano de la bobina). Ésta es la dirección del momento magnético  $\vec{\mu}$ . El momento magnético apunta del polo sur al polo norte, por lo que el lado derecho de la espira es equivalente a un polo norte, y el lado izquierdo equivale a un polo sur.

**27.8 Respuesta: no** El rotor no comenzará a girar cuando se cierre el interruptor, si el rotor está orientado inicialmente como se muestra en la figura 27.39b. En este caso, no hay corriente a través del rotor y, por ello, no hay par de torsión magnético. Esta situación se remedia mediante el uso de bobinas múltiples en el rotor, orientadas a ángulos diferentes en torno al eje de rotación. Con este arreglo siempre habrá un par de torsión magnético sin importar la orientación.

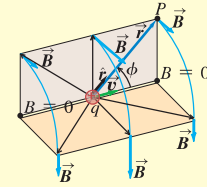
**27.9 Respuesta: ii)** Los portadores móviles de carga en el cobre son electrones cargados negativamente, que se mueven por el alambre hacia arriba para dar una corriente hacia abajo. Según la regla de la mano

# CAPÍTULO 28 RESUMEN

## Campo magnético de una carga en movimiento:

El campo magnético  $\vec{B}$  creado por una carga  $q$  en movimiento con velocidad  $\vec{v}$  depende de la distancia  $r$  entre el punto de fuente (ubicación de  $q$ ) y el punto de campo (donde se mide  $\vec{B}$ ). El campo  $\vec{B}$  es perpendicular a  $\vec{v}$  y a  $\hat{r}$ , el vector unitario dirigido del punto de fuente al punto de campo. El principio de superposición de campos magnéticos dice que el campo total  $\vec{B}$  producido por varias cargas en movimiento es la suma vectorial de los campos producidos por las cargas individuales. (Véase el ejemplo 28.1.)

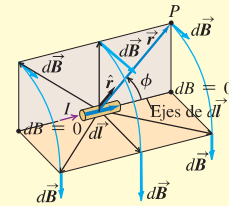
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \quad (28.2)$$



## Campo magnético de un conductor que transporta corriente:

La ley de Biot y Savart da el campo magnético  $d\vec{B}$  creado por un elemento  $d\vec{l}$  de un conductor que transporta una corriente  $I$ . El campo  $d\vec{B}$  es perpendicular tanto a  $d\vec{l}$  como a  $\hat{r}$ , el vector unitario dirigido desde el elemento hasta el punto de campo. El campo  $\vec{B}$  creado por un conductor finito que transporta corriente es la integral de  $d\vec{B}$  sobre la longitud del conductor. (Véase el ejemplo 28.2.)

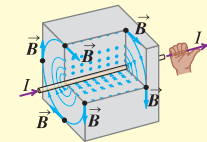
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (28.6)$$



## Campo magnético de un conductor largo, recto y portador de corriente:

El campo magnético  $\vec{B}$  a una distancia  $r$  de un conductor largo, recto y que transporta una corriente  $I$  tiene una magnitud inversamente proporcional a  $r$ . Las líneas de campo magnético son círculos coaxiales con el cable, con direcciones dadas por la regla de la mano derecha. (Véanse los ejemplos 28.3 y 28.4.)

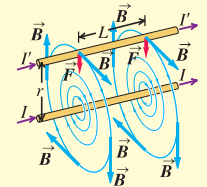
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (28.9)$$



## Fuerza magnética entre conductores que transportan corriente:

Dos conductores largos, paralelos y que transportan corriente se atraen si las corrientes van en el mismo sentido, y se repelen si las corrientes tienen sentidos opuestos. La fuerza magnética por unidad de longitud entre los conductores depende de sus corrientes  $I$  e  $I'$  y su separación  $r$ . La definición de amperio se basa en esta relación. (Véase el ejemplo 28.5.)

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r} \quad (28.11)$$



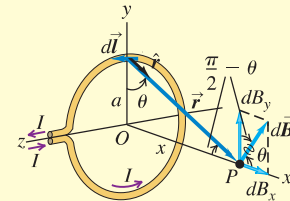
## Campo magnético de una espira de corriente:

La ley de Biot y Savart permite calcular el campo magnético producido a lo largo del eje de una espira circular conductora, de radio  $a$ , que transporta una corriente  $I$ . El campo depende de la distancia  $x$  a lo largo del eje desde el centro de la espira al punto de campo. Si hay  $N$  espiras, el campo se multiplica por  $N$ . En el centro de la espira,  $x = 0$ . (Véase el ejemplo 28.6.)

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (28.15)$$

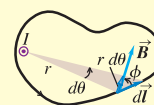
$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2a} \quad (28.17)$$

(centro de  $N$  espiras circulares)



**Ley de Ampère:** La ley de Ampère establece que la integral de línea de  $\vec{B}$  alrededor de cualquier trayectoria cerrada es igual a  $\mu_0$  multiplicado por la corriente neta a través del área encerrada por la trayectoria. El sentido positivo de la corriente se determina mediante la regla de la mano derecha. (Véanse los ejemplos 28.7 a 28.10.)

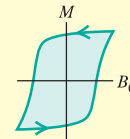
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (28.20)$$



**Campos magnéticos debidos a distribuciones de corriente:** La siguiente tabla lista los campos magnéticos causados por varias distribuciones de corriente. En cada caso, el conductor transporta una corriente  $I$ .

Distribución de corriente	Punto en el campo magnético	Magnitud del campo magnético
Conductor largo y recto	Distancia $r$ desde el conductor	$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
Espiras circular de radio $a$	Sobre el eje de la espira	$B = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$
	En el centro de la espira	$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$ (para $N$ espiras, multiplique estas expresiones por $N$ )
Conductor largo y cilíndrico de radio $R$	Dentro del conductor, $r < R$	$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$
	Afuera del conductor, $r > R$	$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
Solenoides largo, con devanado compacto y $n$ vueltas por unidad de longitud, cerca de su punto medio	Dentro del solenoide, cerca del centro	$B = \mu_0 n I$
	Afuera del solenoide	$B \approx 0$
Solenoides toroidal (toroide) con devanado compacto y $N$ vueltas	Dentro del espacio encerrado por los devanados, a una distancia $r$ del eje de simetría.	$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$
	Afuera del espacio encerrado por los devanados	$B \approx 0$

**\*Materiales magnéticos:** Cuando están presentes materiales magnéticos, la magnetización del material ocasiona una contribución adicional a  $\vec{B}$ . Para materiales paramagnéticos y diamagnéticos,  $\mu_0$  se sustituye en las expresiones del campo magnético por  $\mu = K_m \mu_0$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad del material y  $K_m$  es su permeabilidad relativa. La susceptibilidad magnética  $\chi_m$  se define como  $\chi_m = K_m - 1$ . Las susceptibilidades magnéticas para materiales paramagnéticos son pequeñas cantidades positivas; las de los materiales diamagnéticos son pequeñas cantidades negativas. Para materiales ferromagnéticos,  $K_m$  es mucho mayor que la unidad y no es constante. Algunos materiales ferromagnéticos son imanes permanentes y retienen su magnetización aun después de retirado el campo magnético externo. (Véanse los ejemplos 28.11 y 28.12.)



### Términos clave

punto de fuente, 958  
 punto de campo, 958  
 principio de superposición de campos magnéticos, 960  
 ley de Biot y Savart, 961  
 ampere, 966

ley de Ampère, 972  
 solenoide toroidal, 975  
 magnetón de Bohr, 977  
 magnetización, 978  
 paramagnético, 978  
 permeabilidad relativa, 978

permeabilidad, 978  
 susceptibilidad magnética, 978  
 diamagnético, 980  
 ferromagnético, 980  
 dominio magnético, 980  
 histéresis, 980

### Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

En la intensidad del campo magnético *no* habría cambio. De acuerdo con el ejemplo 28.9 (sección 28.7), el campo dentro de un solenoide tiene magnitud  $B = \mu_0 n I$ , donde  $n$  es el número de vueltas de alambre por unidad de longitud. Al unir dos solenoides por sus extremos se duplica tanto el número de vueltas como la longitud, por lo que el número de vueltas por unidad de longitud no cambia.

### Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**28.1 Respuestas: a) i), b) ii)** La situación es la misma de la figura 28.2, excepto que el protón superior tiene velocidad  $\vec{v}$  en lugar de  $-\vec{v}$ . El campo magnético debido al protón inferior es el mismo que el de la figura 28.2, pero se invierte la dirección de la fuerza magnética  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  sobre el protón superior. Así que la fuerza magnética es de atracción. Como la velocidad  $v$  es pequeña en comparación con  $c$ ,

la fuerza magnética es mucho menor que la fuerza eléctrica de repulsión, por lo que la fuerza neta es de repulsión.

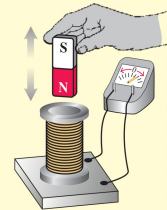
**28.2 Respuestas: i) y iii) (empate), iv), ii)** De la ecuación (28.5) la magnitud del campo  $dB$  debido al elemento de corriente de longitud  $dl$  que transporta una corriente  $I$  es  $dB = (\mu_0/4\pi)(I dl \sin \phi/r^2)$ . En esta expresión,  $r$  es la distancia del elemento al punto de campo, y  $\phi$  es el ángulo entre la dirección de la corriente y un vector desde el elemento de corriente al punto de campo. Los cuatro puntos están a la misma distancia  $r = L$  desde el elemento de corriente, por lo que el valor  $dB$  es proporcional al valor de  $\sin \phi$ . Para los cuatro puntos, el ángulo es i)  $\phi = 90^\circ$ , ii)  $\phi = 0^\circ$ , iii)  $\phi = 90^\circ$  y iv)  $\phi = 45^\circ$ , por lo que los valores de  $\sin \phi$  son i) 1, ii) 0, iii) 1 y iv)  $1/\sqrt{2}$ .

**28.3 Respuesta: A** Esta orientación hará que la corriente fluya alrededor del circuito en sentido horario. Así que la corriente fluirá hacia el sur a través del alambre que se encuentra bajo la brújula. Según la regla de la mano derecha para el campo magnético producido por un conductor largo, recto y que lleva corriente, esto producirá un campo

# CAPÍTULO 29 RESUMEN

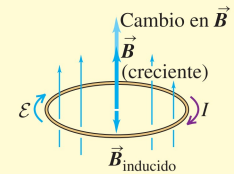
**Ley de Faraday:** La ley de Faraday establece que la fem inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo a través de la espira. Esta relación es válida ya sea que el cambio de flujo se deba a un campo magnético variable, al movimiento de la espira, o ambos factores. (Véanse los ejemplos 29.1 a 29.7.)

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.3)$$



El movimiento del imán ocasiona un campo magnético cambiante a través de la bobina, lo que induce una corriente en esta última.

**Ley de Lenz:** La ley de Lenz afirma que una corriente o fem inducida siempre tiende a oponerse al cambio que la generó, o a cancelarlo. La ley de Lenz se deduce de la de Faraday y a menudo es más fácil de usar. (Véanse los ejemplos 29.8 y 29.9.)



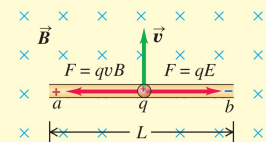
**Fem de movimiento:** Si un conductor se mueve en un campo magnético, se induce una fem de movimiento. (Véanse los ejemplos 29.10 y 29.11.)

$$\mathcal{E} = vBL \quad (29.6)$$

(conductor con longitud  $L$  se mueve en un campo  $\vec{B}$  uniforme,  $\vec{L}$  y  $\vec{v}$  son perpendiculares a  $\vec{B}$  y entre sí)

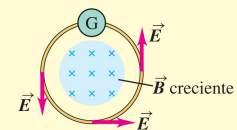
$$\mathcal{E} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (29.7)$$

(la totalidad o parte de una espira cerrada se mueve en un campo  $\vec{B}$ )



**Campos eléctricos inducidos:** Cuando un flujo magnético cambiante a través de un conductor fijo induce una fem, hay un campo eléctrico inducido  $\vec{E}$  de origen no electrostático. Este campo es no conservativo y no está asociado con un potencial. (Véase el ejemplo 29.12.)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.10)$$



### Corriente de desplazamiento y ecuaciones de Maxwell:

Un campo eléctrico que varía en el tiempo genera una corriente de desplazamiento  $i_D$ , que actúa como fuente de un campo magnético exactamente de la misma manera que una corriente de conducción. La relación entre los campos eléctricos y magnéticos y sus fuentes se enuncia en forma compacta en las cuatro ecuaciones de Maxwell. En conjunto forman una base completa para la relación de los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  con sus fuentes.

$$i_D = \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (29.14)$$

(corriente de desplazamiento)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (29.18)$$

(ley de Gauss para campos  $\vec{E}$ )

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (29.19)$$

(ley de Gauss para campos  $\vec{B}$ )

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( i_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{enc} \quad (29.20)$$

(ley de Ampère que incluye la corriente de desplazamiento)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.21)$$

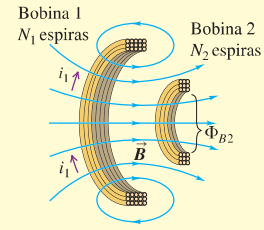
(ley de Faraday)

# CAPÍTULO 30 RESUMEN

**Inductancia mutua:** Cuando una corriente variable  $i_1$  en un circuito ocasiona un flujo magnético variable en un segundo circuito, en este último se induce una fem  $\mathcal{E}_2$ . Del mismo modo, una corriente variable  $i_2$  en el segundo circuito induce una fem  $\mathcal{E}_1$  en el primero. La inductancia mutua  $M$  depende de la geometría de las dos bobinas y el material entre ellas. Si los circuitos son bobinas de alambre con  $N_1$  y  $N_2$  espiras,  $M$  se expresa en términos del flujo medio  $\Phi_{B2}$  a través de cada espira de la bobina 2 que es ocasionado por la corriente  $i_1$  en la bobina 1, o en términos del flujo medio  $\Phi_{B1}$  a través de cada espira de la bobina 1 ocasionado por la corriente  $i_2$  en la bobina 2. La unidad del SI de la inductancia mutua es el henry, que se abrevia con H. (Véanse los ejemplos 30.1 y 30.2.)

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad \text{y} \quad \mathcal{E}_1 = -M \frac{di_2}{dt} \quad (30.4)$$

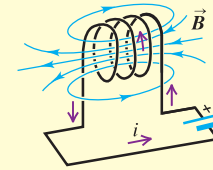
$$M = \frac{N_2 \Phi_{B2}}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_{B1}}{i_2} \quad (30.5)$$



**Autoinductancia:** Una corriente  $i$  variable en cualquier circuito ocasiona una fem  $\mathcal{E}$  autoinducida. La inductancia (o autoinductancia)  $L$  depende de la geometría del circuito y el material que lo rodea. La inductancia de una bobina de  $N$  espiras se relaciona con el flujo medio  $\Phi_B$  a través de cada espira creado por la corriente  $i$  en la bobina. Un inductor es un elemento de circuito, que por lo general incluye una bobina de alambre, cuya finalidad es tener una inductancia sustancial. (Véanse los ejemplos 30.3 y 30.4.)

$$\mathcal{E} = -L \frac{di}{dt} \quad (30.7)$$

$$L = \frac{N \Phi_B}{i} \quad (30.6)$$



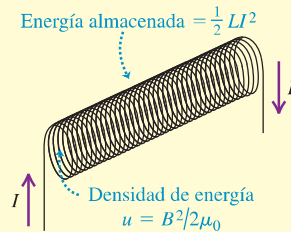
**Energía del campo magnético:** Un inductor con inductancia  $L$  que lleve corriente  $I$  tiene energía  $U$  asociada con el campo magnético del inductor. La densidad de energía magnética  $u$  (energía por unidad de volumen) es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo magnético. (Véanse los ejemplos 30.5 y 30.6.)

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (30.9)$$

$$u = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{en el vacío}) \quad (30.10)$$

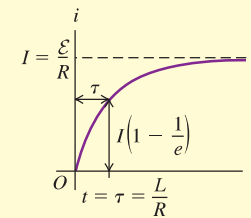
$$u = \frac{B^2}{2\mu} \quad (30.11)$$

(en un material con permeabilidad magnética  $\mu$ )



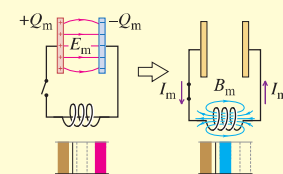
**Circuitos R-L:** En un circuito que contiene un resistor  $R$ , un inductor  $L$  y una fuente de fem, el crecimiento y el decaimiento de la corriente son exponenciales. La constante de tiempo  $\tau$  es el tiempo requerido para que la corriente se aproxime a una fracción  $1/e$  de su valor final. (Véanse los ejemplos 30.7 y 30.8.)

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (30.16)$$



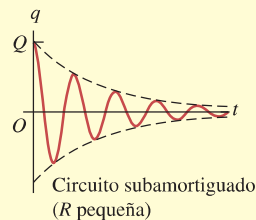
**Circuito L-C:** Un circuito que contiene inductancia  $L$  y capacitancia  $C$  experimenta oscilaciones eléctricas con frecuencia angular  $\omega$  que depende de  $L$  y  $C$ . Tal circuito es análogo a un oscilador armónico mecánico, con inductancia  $L$  análoga a la masa  $m$ ; el recíproco de la capacitancia  $1/C$ , a la constante de fuerza  $k$ ; la carga  $q$ , al desplazamiento  $x$ ; y la corriente  $i$ , a la velocidad  $v_x$ . (Véanse los ejemplos 30.9 y 30.10.)

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (30.22)$$



**Circuitos L-R-C en serie:** Un circuito que contiene inductancia, resistencia y capacitancia experimenta oscilaciones amortiguadas para una resistencia suficientemente pequeña. La frecuencia  $\omega'$  de las oscilaciones amortiguadas depende de los valores de  $L$ ,  $R$  y  $C$ . Conforme  $R$  aumenta, el amortiguamiento se incrementa; si  $R$  es mayor que cierto valor el comportamiento se vuelve sobreamortiguado y deja de haber oscilación. La transición entre el subamortiguamiento y el sobreamortiguamiento ocurre cuando  $R^2 = 4L/C$ ; cuando se satisface esta condición, las oscilaciones están críticamente amortiguadas. (Véase el ejemplo 30.11.)

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (30.29)$$



## Términos clave

inductancia mutua, 1031

henry, 1032

fem autoinducida, 1034

inductancia (autoinductancia), 1034

inductor, 1034

densidad de energía magnética, 1039

circuito R-L, 1041

constante de tiempo, 1043

circuito L-C, 1045

oscilación eléctrica, 1046

circuito en serie L-R-C, 1049

movimiento armónico amortiguado, 1050

subamortiguado, 1050

críticamente amortiguado, 1050

sobreamortiguado, 1050

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

Como se explicó en la sección 30.2, los sensores de semáforos funcionan midiendo el cambio en la inductancia de una bobina enterrada bajo el pavimento cuando un automóvil pasa por encima de ella.

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**30.1 Respuesta: iii)** Duplicar tanto la longitud del solenoide ( $l$ ) como el número de espiras de alambre en éste ( $N_1$ ) no tendría efecto en la inductancia mutua  $M$ . El ejemplo 30.1 muestra que  $M$  depende del cociente de estas cantidades, las cuales permanecerían sin cambio. Esto se debe a que el campo magnético producido por el solenoide depende del número de espiras *por unidad de longitud*, y el cambio propuesto no tiene efecto sobre esta cantidad.

**30.2 Respuestas: iv), i), iii), ii)** De acuerdo con la ecuación (30.8), la diferencia de potencial a través del inductor es  $V_{ab} = L di/dt$ . Para los cuatro casos se encuentra que i)  $V_{ab} = (2.0 \mu\text{H})(2.0 \text{ A} - 1.0 \text{ A})/(0.50 \text{ s}) = 4.0 \mu\text{V}$ ; ii)  $V_{ab} = (4.0 \mu\text{H})(0 - 3.0 \text{ A})/(2.0 \text{ s}) = -6.0 \mu\text{V}$ ; iii)  $V_{ab} = 0$  porque la tasa de cambio de la corriente es igual a cero; y iv)  $V_{ab} = (1.0 \mu\text{H})(4.0 \text{ A} - 0)/(0.25 \text{ s}) = 16 \mu\text{V}$ .

**30.3 Respuestas: a) sí, b) no** La inversión del sentido de la corriente no tiene efecto sobre la magnitud del campo magnético, pero ocasiona que se invierta el sentido del campo magnético. No tiene efecto sobre la densidad de energía del campo magnético, que es proporcional al cuadrado de la *magnitud* del campo magnético.

**30.4 Respuestas: a) i), b) ii)** Recuerde que  $v_{ab}$  es el potencial en  $a$  menos el potencial en  $b$ , y de manera similar para  $v_{bc}$ . Para cualquier

arreglo de los interruptores, la corriente fluye a través del resistor de  $a$  a  $b$ . El extremo corriente arriba del resistor siempre está en el potencial mayor, por lo que  $v_{ab}$  es positiva. Con  $S_1$  cerrado y  $S_2$  abierto, la corriente a través del inductor fluye de  $b$  a  $c$  y va en aumento. La fem autoinducida se opone a este incremento, por lo que se dirige de  $c$  a  $b$ , lo que significa que  $b$  está a un potencial mayor. Por lo tanto,  $v_{bc}$  es positiva. Con  $S_1$  abierto y  $S_2$  cerrado, la corriente en el inductor otra vez fluye de  $b$  a  $c$ , pero ahora disminuye. La fem autoinducida se dirige de  $b$  a  $c$  en un esfuerzo por sostener la corriente que decae, por lo que  $c$  está a un potencial mayor y  $v_{bc}$  es negativa.

**30.5 Respuestas: a) positivo, b) eléctrica, c) negativo, d) eléctrica** El capacitor pierde energía entre las etapas  $a$ ) y  $b$ ), por lo que realiza trabajo positivo sobre las cargas. Esto lo logra ejerciendo una fuerza eléctrica que empuja la corriente lejos de la placa izquierda del capacitor con carga positiva y hacia la derecha con carga negativa. Al mismo tiempo, el inductor gana energía y efectúa trabajo negativo sobre las cargas en movimiento. Aunque el inductor almacena energía magnética, la fuerza que ejerce el inductor es *eléctrica*. Esta fuerza proviene de la fem autoinducida del inductor (véase la sección 30.2).

**30.6 Respuestas: i), iii)** No hay oscilaciones si  $R^2 \geq 4L/C$ . En cada caso,  $R^2 = (2.0 \Omega)^2 = 4.0 \Omega^2$ . En el caso i)  $4L/C = 4(3.0 \mu\text{H})/(6.0 \mu\text{F}) = 2.0 \Omega^2$ , por lo que no hay oscilaciones (el sistema está sobreamortiguado); en el caso ii)  $4L/C = 4(6.0 \mu\text{H})/(3.0 \mu\text{F}) = 8.0 \Omega^2$ , de manera que hay oscilaciones (el sistema está subamortiguado), y en el caso iii)  $4L/C = 4(3.0 \mu\text{H})/(3.0 \mu\text{F}) = 4.0 \Omega^2$ , por lo que no hay oscilaciones (el sistema está críticamente amortiguado).

## PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite [www.masteringphysics.com](http://www.masteringphysics.com)



## Preguntas para análisis

**P30.1.** En un trolebús eléctrico, un tipo de autobús, el motor del vehículo toma corriente de un alambre que corre por arriba por medio de un brazo largo con un dispositivo en su extremo que se desliza a lo largo del alambre. Con frecuencia se observa una chispa eléctrica brillante cuando el dispositivo cruza las uniones de los alambres, donde el contacto se pierde momentáneamente. Explique este fenómeno.

**P30.2.** Un transformador consiste básicamente en dos bobinas muy cercanas, pero sin que estén en contacto eléctrico. Una corriente en una de las bobinas induce magnéticamente una fem en la otra, con propiedades que se controlan ajustando la geometría de ambas bobinas. Sin embargo, ese dispositivo sólo funciona con corriente alterna, y no con corriente directa. Explique la razón.

# CAPÍTULO 31 RESUMEN

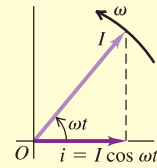
**Fasores y corriente alterna:** Un alternador o fuente de ca produce una fem que varía en forma sinusoidal con el tiempo. Un voltaje o corriente sinusoidal se puede representar mediante un fasor, que es un vector que gira en sentido antihorario con velocidad angular constante  $\omega$  igual a la frecuencia angular de la cantidad sinusoidal. Su proyección sobre el eje horizontal en cualquier instante representa el valor instantáneo de la cantidad.

Para una corriente sinusoidal, las corrientes media rectificada y eficaz (rms, cuadrática media) son proporcionales a la amplitud de corriente  $I$ . De manera similar, el valor rms de un voltaje sinusoidal es proporcional a la amplitud de voltaje  $V$ . (Véase el ejemplo 31.1.)

$$I_{\text{vmr}} = \frac{2}{\pi} I = 0.637 I \quad (31.3)$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (31.4)$$

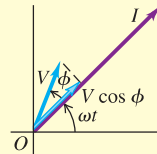
$$V_{\text{rms}} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (31.5)$$



**Voltaje, corriente y ángulo de fase:** En general, el voltaje instantáneo entre dos puntos en un circuito de ca no está en fase con la corriente instantánea que pasa a través de esos puntos. La cantidad  $\phi$  se llama ángulo de fase del voltaje con respecto a la corriente.

$$i = I \cos \omega t \quad (31.2)$$

$$v = V \cos(\omega t + \phi)$$

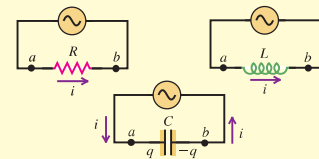


**Resistencia y reactancia:** El voltaje entre las terminales de un resistor  $R$  está en fase con la corriente. El voltaje entre las terminales de un inductor  $L$  se adelanta a la corriente en  $90^\circ$  ( $\phi = +90^\circ$ ), mientras que el voltaje entre las terminales de un capacitor  $C$  tiene un retraso de  $90^\circ$  ( $\phi = -90^\circ$ ) con respecto a la corriente. La amplitud del voltaje entre las terminales de cada tipo de dispositivo es proporcional a la amplitud de la corriente  $I$ . Un inductor tiene reactancia inductiva  $X_L = \omega L$ , y un capacitor tiene reactancia capacitiva  $X_C = 1/\omega C$ . (Véanse los ejemplos 31.2 y 31.3.)

$$V_R = IR \quad (31.7)$$

$$V_L = IX_L \quad (31.13)$$

$$V_C = IX_C \quad (31.19)$$



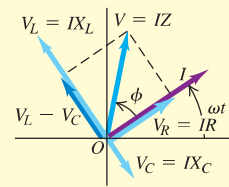
**Impedancia y el circuito L-R-C en serie:** En un circuito de ca general, las amplitudes del voltaje y la corriente están relacionadas mediante la impedancia del circuito  $Z$ . En un circuito L-R-C en serie, los valores de  $L$ ,  $R$ ,  $C$  y la frecuencia angular  $\omega$  determinan la impedancia y el ángulo de fase  $\phi$  del voltaje en relación con la corriente. (Véanse los ejemplos 31.4 y 31.5.)

$$V = IZ \quad (31.22)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (31.23)$$

$$= \sqrt{R^2 + [\omega L - (1/\omega C)]^2}$$

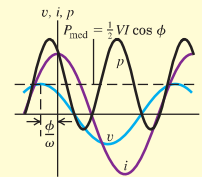
$$\tan \phi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (31.24)$$



**Potencia en circuitos de ca:** La potencia media de alimentación,  $P_{\text{med}}$ , a un circuito de ca depende de las amplitudes de voltaje y de corriente (o, de manera equivalente, de sus valores rms) y del ángulo de fase  $\phi$  del voltaje en relación con la corriente. La cantidad  $\cos \phi$  se llama *factor de potencia*. (Véanse los ejemplos 31.6 y 31.7.)

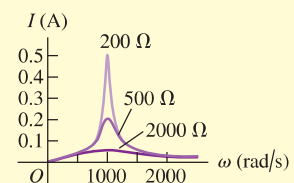
$$P_{\text{med}} = \frac{1}{2} VI \cos \phi \quad (31.31)$$

$$= V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \phi$$



**Resonancia en circuitos de ca:** En un circuito L-R-C en serie, la corriente es máxima y la impedancia mínima a cierta frecuencia angular llamada frecuencia angular de resonancia. Este fenómeno se llama resonancia. En la resonancia, el voltaje y la corriente están en fase, y la impedancia  $Z$  es igual a la resistencia  $R$ . (Véase el ejemplo 31.8.)

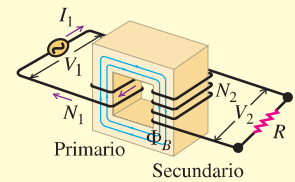
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (31.32)$$



**Transformadores:** Un transformador se utiliza para transformar los niveles de voltaje y de corriente en un circuito de ca. En un transformador ideal sin pérdidas de energía, si el devanado primario tiene  $N_1$  espiras y el secundario tiene  $N_2$  espiras, las amplitudes (o valores rms) de los dos voltajes están relacionadas por medio de la ecuación (31.35). Las amplitudes (o valores rms) de los voltajes y las corrientes del primario y del secundario están relacionadas por la ecuación (31.36). (Véase el ejemplo 31.9.)

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (31.35)$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (31.36)$$



## Términos clave

corriente alterna (ca), 1061  
fuente de ca, 1062  
amplitud de voltaje, 1062  
amplitud de corriente, 1062  
fasor, 1062  
diagrama de fasores, 1062  
corriente de valor medio rectificadora, 1063

corriente eficaz (rms), 1063  
ángulo de fase, 1066  
reactancia inductiva, 1066  
reactancia capacitiva, 1068  
impedancia, 1071  
factor de potencia, 1076  
resonancia, 1078

frecuencia angular de resonancia, 1078  
frecuencia de resonancia, 1078  
transformador, 1080  
primario, 1080  
secundario, 1080

## Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

Sí. En realidad el radio detecta simultáneamente transmisiones en todas las frecuencias. Sin embargo, un radio es un circuito  $L$ - $R$ - $C$  en serie y, en cualquier momento dado, se sintoniza para que tenga una resonancia en una sola frecuencia. De ahí que la respuesta del radio a esa frecuencia sea mucho mayor que a cualquier otra; por eso, sólo se escucha una estación transmisora a través del altavoz del radio. (En ocasiones se oye una segunda estación si su frecuencia está suficientemente cerca de la que se sintoniza.)

## Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

**31.1 Respuestas: a) D; b) A; c) B; d) C** Para cada fasor, la corriente real está representada por la proyección de ese fasor sobre el eje horizontal. Todos los fasores giran en sentido antihorario alrededor del origen con rapidez angular  $\omega$ , por lo que en el instante mostrado, la proyección del fasor A es positiva, pero tiende a cero; la proyección del fasor B es negativa y se hace más negativa; la proyección del fasor C es negativa y tiende a cero; y la proyección del fasor D es positiva y se hace más positiva.

**31.2 Respuestas: a) iii; b) ii; c) i** En el caso de un resistor  $V_R = IR$ , así que  $I = V_R/R$ . La amplitud de voltaje  $V_R$  y la resistencia  $R$  no cambian con la frecuencia, de manera que la amplitud de corriente  $I$  permanece constante. En el caso de un inductor,  $V_L = IX_L = I\omega L$ , por lo que  $I = V_L/\omega L$ . La amplitud de voltaje  $V_L$  y la inductancia  $L$  son constantes, así que la amplitud de la corriente  $I$  disminuye a medida que la frecuencia aumenta. En el caso de un capacitor,  $V_C = IX_C = I/\omega C$ , por lo que  $I = V_C\omega C$ . La amplitud de voltaje  $V_C$  y la capacitancia  $C$  son constantes, de manera que la amplitud de corriente  $I$  aumenta a medida que la frecuencia se incrementa.

**31.3 Respuestas: iv), ii), i), iii)** Para el circuito del ejemplo 31.4,  $I = V/Z = (50 \text{ V})/(500 \Omega) = 0.10 \text{ A}$ . Si se eliminan el capacitor y el inductor, de manera que sólo permanezca la fuente de ca y el resistor, el circuito es como el que se aprecia en la figura 31.7a; de esta forma,  $I = VR = (50 \text{ V})/(300 \Omega) = 0.17 \text{ A}$ . Si se eliminan el resistor y el capacitor, de manera que sólo queden la fuente de ca y el inductor, el circuito es como el que se ilustra en la figura 31.8a; en tal caso,  $I = V/X_L = (50 \text{ V})/(600 \Omega) = 0.083 \text{ A}$ . Por último, si el resistor y el inductor se eliminan, de manera que sólo continúen la fuente de ca y el capacitor, el circuito es como el de la figura 31.9a; en ese caso,  $I = V/X_C = (50 \text{ V})/(200 \Omega) = 0.25 \text{ A}$ .

**31.4 Respuestas: a) v; b) iv)** La energía no puede ser extraída del resistor, puesto que en éste se disipa y no se recupera. En vez de ello, la energía debe extraerse ya sea del inductor (que almacena energía del campo magnético) o del capacitor (que almacena energía del campo eléctrico). La potencia positiva significa que la energía se está transfiriendo de la fuente de ca al circuito, de manera que la potencia *negativa* implica que la energía se transfiere de regreso a la fuente.

**31.5 Respuesta: ii)** La capacitancia  $C$  aumenta si disminuye la separación de las placas (véase la sección 24.1). Por ello, disminuye la frecuencia de resonancia  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1/2\pi\sqrt{LC}$ .

**31.6 Respuestas: ii), iv), i), iii)** De la ecuación (31.35), la razón de espiras es  $N_2/N_1 = V_2/V_1$ ; por lo tanto, el número de espiras en el secundario es  $N_2 = N_1 V_2/V_1$ . De esta forma, para los cuatro casos se tiene que i)  $N_2 = (1000)(6.0 \text{ V})/(120 \text{ V}) = 50$  espiras; ii)  $N_2 = (1000)(240 \text{ V})/(120 \text{ V}) = 2000$  espiras; iii)  $N_2 = (1000)(6.0 \text{ V})/(240 \text{ V}) = 25$  espiras; y iv)  $N_2 = (1000)(120 \text{ V})/(240 \text{ V}) = 500$  espiras. Advierta que i), iii) y iv) son transformadores reductores con menos espiras en el secundario que en el primario, mientras que ii) es un transformador elevador con más espiras en el secundario que en el primario.

## PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite [www.masteringphysics.com](http://www.masteringphysics.com)



## Preguntas para análisis

**P31.1.** La energía eléctrica para consumo doméstico se suministra a 240 V en la mayor parte de Europa, y no a 120 V como en Estados

Unidos y Canadá. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de cada sistema?

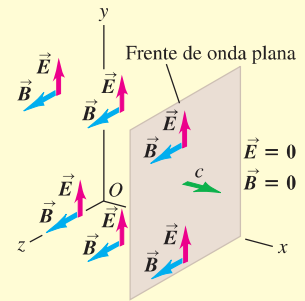
# CAPÍTULO 32 RESUMEN

**Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas:** Las ecuaciones de Maxwell pronostican la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío con la rapidez de la luz  $c$ . El espectro electromagnético cubre frecuencias desde 1 Hz hasta  $10^{24}$  Hz, y el correspondiente amplio intervalo de longitudes de onda. La luz visible, con longitudes de onda de 400 a 700 nm, es sólo una parte muy pequeña de ese espectro. En una onda plana, los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son uniformes sobre cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación. Las leyes de Faraday y Ampere establecen relaciones entre las magnitudes de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ ; la exigencia de que se satisfagan estas dos relaciones permite obtener una expresión para  $c$  en términos de  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ . Las ondas electromagnéticas son transversales; los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son perpendiculares entre sí y con respecto a la dirección de propagación, la cual es la dirección del producto vectorial  $\vec{E} \times \vec{B}$ .

$$E = cB \quad (32.4)$$

$$B = \epsilon_0 \mu_0 c E \quad (32.8)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (32.9)$$

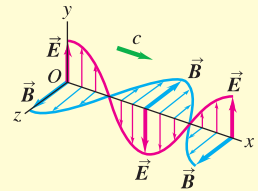


**Ondas electromagnéticas sinusoidales:** Las ecuaciones (32.17) y (32.18) describen una onda electromagnética plana sinusoidal que viaja en el vacío en la dirección  $+x$ . (Véase el ejemplo 32.1.)

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t) \quad (32.17)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{\text{máx}} \cos(kx - \omega t) \quad (32.18)$$

$$E_{\text{máx}} = c B_{\text{máx}} \quad (32.18)$$



**Ondas electromagnéticas en la materia:** Cuando una onda electromagnética viaja a través de un dieléctrico, la rapidez de onda  $v$  es menor que la rapidez de la luz en el vacío  $c$ . (Véase el ejemplo 32.2.)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (32.21)$$

$$= \frac{c}{\sqrt{KK_m}}$$

**Energía y cantidad de movimiento de las ondas electromagnéticas:** La tasa de flujo de energía (potencia por unidad de área) de una onda electromagnética en vacío está dada por el vector de Poynting  $\vec{S}$ . La magnitud del valor promediado en el tiempo del vector de Poynting se llama la intensidad  $I$  de la onda. Las ondas electromagnéticas también transportan cantidad de movimiento, y cuando una de ellas golpea una superficie ejerce una presión de radiación  $p_{\text{rad}}$ . Si la superficie es perpendicular a la dirección de propagación de la onda y es totalmente absorbente,  $p_{\text{rad}} = I/c$ ; si la superficie es un reflector perfecto,  $p_{\text{rad}} = 2I/c$ . (Véanse los ejemplos 32.3 a 32.5.)

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (32.28)$$

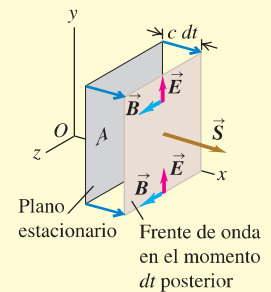
$$I = S_{\text{med}} = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} \quad (32.29)$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_{\text{máx}}^2$$

$$= \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\text{máx}}^2$$

$$\frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{S}{c} = \frac{EB}{\mu_0 c} \quad (32.31)$$

(tasa de flujo de cantidad de movimiento electromagnética)



**Ondas electromagnéticas estacionarias:** Si se coloca una superficie perfectamente reflejante en  $x = 0$ , las ondas incidente y reflejada forman una onda estacionaria. Los planos nodales para  $\vec{E}$  se presentan en  $kx = 0, \pi, 2\pi, \dots$ , y los planos nodales para  $\vec{B}$  en  $kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ . En cada punto, las variaciones sinusoidales de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  con respecto al tiempo están  $90^\circ$  fuera de fase. (Véanse los ejemplos 32.6 y 32.7.)

